



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia. Enfoque teórico y metodológico

Paola Borita Giraldo Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales - IDEA

Bogotá, Colombia

2022

Análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia. Enfoque teórico y metodológico

Paola Borita Giraldo Rodríguez

Trabajo Final presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

Doctora en Ciencias – Biología. María del Rosario Rojas Robles

Línea de Investigación:

Ecología, conflictos ambientales y territorio

Grupo de Investigación:

Instituto de Estudios Ambientales Sede Bogotá

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales - IDEA

Bogotá, Colombia

2022

“..no podemos pretender sanar nuestra relación con la naturaleza y el ambiente sin sanar todas las relaciones básicas del ser humano...”

(Papa Francisco, 2015)

A Dios y María Santísima por dirigir mis pasos en el desarrollo de este trabajo, por darme la entereza y la tranquilidad para afrontar todos y cada uno de los retos que aparecieron.

A mi hogar, a mi familia y a mi tía Leo, por el amor que me brindan y por caminar conmigo incondicionalmente para lograr esta meta. Gracias por el apoyo en todos los sentidos, los amo y son lo más importante de mi vida.

A mi papi por enseñarme a sonreír y a ocuparme, pero no preocuparme, incluso en los momentos más difíciles de la vida.

A mi mami por enseñarme el valor de la fortaleza y perseverancia para alcanzar lo que me proponga.

Declaración de obra original

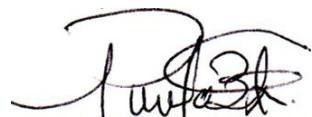
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Paola Borita Giraldo Rodríguez

Fecha 22/04/2022

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a María Santísima por toda la fortaleza y bendiciones recibidas para lograr ajustar todo y poder cumplir esta meta.

A Isa y JuanSe, por tener paciencia, amor y alegría mientras “mamá” estudiaba.

A mi compañero de vida Andrés Avella, por sus aportes técnicos y orientación en el desarrollo del trabajo. Gracias por estar a mi lado y apoyarme siempre.

A mi tía Leonor, Lili y mi papi, por enseñarme el valor de ayudar y servir sin esperar nada a cambio.

A mi Mami, por enseñarme a no desfallecer y con firmeza sacar adelante mis metas. Gracias por el apoyo y el amor y cuidado de mis bebés.

A mi tía Betty, Mela, Doña Stella y Betty, por ayudarme en el cuidado de lo más importante de mi vida, Isa y JuanSe, pues sin su apoyo, hoy esta meta no sería realidad.

A la Universidad Nacional de Colombia y al programa de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo por su adaptación a la virtualidad que obligó la pandemia y por brindarme educación de calidad.

A la profesora María Rosario Rojas Robles, por su dirección y acompañamiento en el desarrollo del trabajo. Gracias por la comprensión, paciencia y apoyo en todo sentido.

Al profesor José Javier Toro Calderón, por acompañarme como tutor, definir el alcance y motivarme a ser constante y concreta en la escritura. Gracias por ser un excelente profesor.

A mi amigo y compañero de trabajo Cristhian Forero, porque sin su apoyo incondicional y asesorías técnicas no lo hubiese logrado.

A mi profesor Ned Horning, por sus asesorías y disposición de ayuda en el desarrollo de la propuesta.

A Sandra Galán y Clara Solano de Fundación Natura y a Juan Bello de ONU Medio Ambiente, por la oportunidad de participar en 2019 en el proyecto: Soluciones Ambientales para la construcción de paz y resiliencia en Colombia, pues allí nació esta idea y me recordó lo interesante de trabajar en sistemas de información geográfica.

Y a mis compañeritos de maestría Sebastián, Marysabel y Kelly por hacer de la virtualidad algo más llevadero y en especial a Kelly por su apoyo en la edición del documento final

Resumen

Análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia.

Enfoque teórico y metodológico

Históricamente Colombia ha basado su desarrollo en un modelo donde el extractivismo y la degradación ambiental han sido protagonistas y por lo tanto comprender las relaciones ecosistema – cultura es fundamental. Contar con indicadores que de forma cuantitativa y espacialmente explícita aporten en el análisis de fenómenos ambientales que surgen por las dinámicas en los sistemas sociales y ecológicos es un constante desafío que enfrenta el país. En esta propuesta se presenta un enfoque teórico y metodológico para el desarrollo del Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – (IEDAN) en el contexto colombiano. El IEDAN integra variables sociales y ecológicas, para aportar en la gestión sustentable del territorio colombiano y evidenciar espacialmente áreas del país que pueden ser foco de degradación ambiental.

Este trabajo se basó en la teoría general de sistemas, la perspectiva ambiental y el enfoque de sistemas sociales y ecológicos. En total, 12 recursos geográficos fueron procesados e integrados mediante herramientas de álgebra de mapas. Los resultados evidenciaron que; (i) la mayor degradación ambiental se concentra en las zonas hidrográficas de Caribe y Magdalena – Cauca, pues el IEDAN mostró tres focos de degradación con valores altos y muy altos solo en estas áreas. (ii) existen zonas donde en un mismo punto coincidieron diferentes tipos de degradación ambiental; y (iii) las zonas de degradación ambiental en categorías medias hacia las regiones de la Orinoquía, Amazonía y Pacífico corresponden con las condiciones socioculturales de estas áreas del país.

Palabras clave: Teoría general de los sistemas, perspectiva ambiental, sistemas sociales y ecológicos, degradación ambiental, análisis espacial.

Abstract

Spatial analysis of environmental degradation in Colombia.

Theoretical and methodological approach

Historically, Colombia has based its development on a model where extractivism and environmental degradation have been the key drivers. Therefore, understanding ecosystem-culture relationships is essential. Having indicators that can be used to quantify and spatially display environmental degradation will help the analysis of environmental problems, resulting from the dynamics of the social and ecological systems. However, this is still a challenge in the country. This research proposes a theoretical and methodological approach to develop the Normalized Spatial Environmental Degradation Index (IEDAN) applied to the Colombian context. The index integrated, social and ecological variables, seeking to spatially identify environmental degradation hotspots.

The research was based on the general systems theory, the environmental perspective, and the social and ecological systems approach. In total, twelve spatially explicit resources were processed to calculate a spatial summation using map algebra tools. Result showed that (i), the largest environmental degradation was concentrated in the Caribbean and Magdalena-Cauca basins, as three hotspots were identified there with high and very-high values were detected. (ii) There were areas in the country where different degradation types coincided at the same place, and (iii) areas with moderate environmental degradation were observed in the Orinoquia, Amazonia and Pacific region, which is in agreement with the socio-cultural condition of these areas in the country.

Keywords: General systems theory, environmental perspective, social and ecological systems, environmental degradation, spatial análisis.

Contenido

| | Pág. |
|---|------------|
| Resumen..... | VI |
| Abstract..... | VII |
| Lista de figuras..... | X |
| Lista de tablas..... | XI |
| Lista de Abreviaturas | XII |
| Introducción | 1 |
| 1. Enfoque teórico propuesto para analizar la degradación ambiental en Colombia..... | 3 |
| 1.1 Teoría general de sistemas – TGS..... | 3 |
| 1.1.1 Características de la TGS | 4 |
| 1.1.2 La TGS como enfoque para el análisis de la degradación ambiental en Colombia | 5 |
| 1.2 La perspectiva ambiental y su enfoque teórico para el análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia | 6 |
| 1.2.1 Enfoque de sistemas sociales y ecológicos (SES)..... | 7 |
| 2. Degradación Ambiental..... | 10 |
| 2.1 Revisión del concepto de degradación ambiental y su relación con los sistemas sociales y ecológicos | 10 |
| 2.2 Tipos de degradación ambiental a representar espacialmente en Colombia | 13 |
| 2.3 La degradación ambiental como indicador espacial de cambios en los sistemas sociales y ecológicos | 13 |
| 3. Índice espacial de degradación ambiental normalizado – IEDAN. Propuesta metodológica..... | 15 |
| 3.1 Antecedentes metodológicos para el análisis espacial de la degradación ambiental | 15 |
| 3.2 Metodología propuesta..... | 19 |
| 3.2.1 Fase 1: Selección y descripción de variables | 20 |
| 3.2.2 Fase 2: Diseño del modelo conceptual y espacial | 22 |
| 3.2.3 Fase 3: Cálculo del índice | 25 |
| 4. Aplicación del Índice espacial de degradación ambiental normalizado – IEDAN..... | 27 |
| 4.1 Aplicación del protocolo del IEDAN..... | 27 |
| 4.1.1 Fase 1: Selección y descripción de variables | 28 |
| 4.1.2 Fase 2: Diseño del modelo conceptual y cartográfico | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.3 Fase 3: Cálculo del Índice | 33 |
| 4.2 Discusión de resultados | 39 |
| 4.2.1 Enfoque teórico y metodológico en el desarrollo del IEDAN. | 39 |
| 4.2.2 Comportamiento del IEDAN y sus implicaciones | 43 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones | 48 |
| 5.1 Conclusiones | 48 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 49 |
| A. Anexo Cartográfico..... | 51 |
| Bibliografía | 52 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1-1: Características de la TGS..... | 4 |
| Figura 1-2: Modelo Ecosistema y Cultura..... | 7 |
| Figura 1-3: Marco conceptual para analizar las relaciones en los sistemas sociales y ecológicos*. | 8 |
| Figura 3-1: Metodología general del índice propuesto..... | 21 |
| Figura 3-2: Modelo conceptual..... | 22 |
| Figura 3-3: Modelo cartográfico..... | 24 |
| Figura 3-4: Estructura general del índice propuesto..... | 25 |
| Figura 4-1: Ubicación general de Colombia..... | 28 |
| Figura 4-2: Visualización de las variables seleccionadas con sus rangos de medida..... | 31 |
| Figura 4-3: Modelo conceptual..... | 32 |
| Figura 4-4: Modelo cartográfico..... | 32 |
| Figura 4-5: Estructura del IEDAN..... | 33 |
| Figura 4-6: Visualización variables seleccionadas normalizadas..... | 34 |
| Figura 4-7: Ráster de degradación ambiental – RDA..... | 35 |
| Figura 4-8: Histograma del RDA..... | 35 |
| Figura 4-9: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN..... | 37 |
| Figura 4-10: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN categorizado. .. | 38 |
| Figura 4-11: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN por departamentos | 40 |
| Figura 4-12: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN para los 50 municipios con mayor degradación. | 41 |
| Figura 4-13: Visualización Hotspots del IEDAN..... | 44 |
| Figura 4-14: Visualización IEDAN y otros estudios relacionados con deterioro ambiental. B: Estado de los Ecosistemas Colombianos (Etter et al., 2017) y C: Spatiotemporal Evaluation of The Human Footprint in Colombia: Four Decades of Anthropic Impact in Highly Biodiverse Ecosystems (Correa A et al., 2020)..... | 47 |
| Figura 5-1: Visualización de organización del Anexo Cartográfico en el drive..... | 51 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 3-1: Estudios relevantes de mapeo de degradación ambiental a nivel nacional e internacional. | 18 |
| Tabla 3-2: Recursos geográficos identificados para estudiar la degradación ambiental en Colombia. | 23 |
| Tabla 4-1: Variables seleccionadas para el mapeo de la degradación ambiental en Colombia. | 29 |
| Tabla 4-2: Descripción general de las variables seleccionadas y criterio de especificidad aplicado. | 30 |

Lista de Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|--------------------|--|
| CO2SH | Proporción del CO2 total mundial. |
| DC | Dimensión del Sistema Cultural. |
| DE | Dimensión Ecosistémica. |
| GLADIS | Índice de Impacto de Degradación del suelo, por sus siglas en inglés. |
| IEDAN | Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado. |
| IPBES | Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas |
| IPCC | Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC |
| OECD | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico |
| PAPCPM | Papel de impresión y escritura consumido per cápita. |
| PCCO2 | Emisión de CO2 per cápita, por sus siglas en inglés. |
| PCFWW | Extracciones anuales de agua dulce per cápita, por sus siglas en inglés. |
| PIB | Producto Interno bruto |
| RDA | Raster de degradación ambiental |
| SES | Sistemas sociales y ecológicos, por sus siglas en inglés. |
| SSE | Sistemas Sociales y Ecológicos |
| TGS | Teoría General de Sistemas |

Introducción

El modelo de desarrollo adoptado por la humanidad es uno de los responsables de la degradación ambiental (Alvarado & Toledo, 2017). En Colombia, este fenómeno para el 2015 costó 16.6 billones de pesos, es decir el 2.08% del producto interno bruto (PIB) de ese año (Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2018a). Sin embargo, su estudio ha relacionado principalmente aspectos biofísicos (Olsson et al., 2019; Wang & Dong, 2019; Wu et al., 2019) e integrar la dimensión cultural ha sido un reto constante. En este sentido, resulta clave comprender que lo ambiental va más allá de la dimensión ecosistémica y que para estudiar la degradación ambiental se requiere enfrentar desafíos en el abordaje teórico y en el análisis espacial de algunas de las aristas que ésta puede asumir en el contexto colombiano.

Actualmente, el país cuenta con estudios importantes que representan espacialmente el estado de amenaza de los ecosistemas, mediante la aplicación de la metodología de lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Etter et al., 2017), así como con el cambio en la huella ecológica humana (Correa A et al., 2020). Cada uno de estos estudios identifica impactos causados por los humanos o evalúa la capacidad de los ecosistemas de proveer servicios. No obstante, para el análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia, se tienen vacíos de información y desafíos en la comprensión de este fenómeno, como un proceso complejo emergente de la interacción de factores humanos y biofísicos (Prakash et al., 2016), donde se generan relaciones a nivel biofísico, social y económico (Webb et al., 2020).

En este trabajo se busca: proponer un enfoque teórico y metodológico para el desarrollo de un índice espacial de degradación ambiental en el contexto colombiano, desarrollando tres objetivos específicos: i) definir un marco teórico y metodológico que integre la dimensión cultural en el estudio de la degradación ambiental en Colombia; ii) plantear un índice espacial de degradación ambiental en Colombia que integre variables del orden ecosistémico y cultural; y iii) exponer el comportamiento del índice a nivel nacional y las implicaciones de diferente orden que tendría su desarrollo en función de algunos tipos de degradación ambiental.

El documento se organiza y desarrolla en cuatro capítulos: el primero y el segundo hacen referencia al marco conceptual y teórico de la propuesta, el cual se centra en la definición de la degradación ambiental y su abordaje desde la teoría de la complejidad; el tercero expone la propuesta de un índice espacial para su mapeo, sintetiza la metodología y las fases de desarrollo, y el cuarto, presenta algunos resultados preliminares de su aplicación y los retos e implicaciones de este, para finalmente realizar un aparte de conclusiones y recomendaciones en futuros desarrollos del índice.

1. Enfoque teórico propuesto para analizar la degradación ambiental en Colombia

De acuerdo con Rockström et al., (2009), el crecimiento exponencial de las actividades humanas podría desestabilizar los sistemas biofísicos y provocar cambios catastróficos para el bienestar humano y el de todas las especies. Algunos de estos cambios se viven actualmente y se padece el famoso ‘efecto mariposa’, prueba de que el mundo es un sistema en el que todo elemento, interactúa con otros y acaba por influenciar el conjunto (Ramonet, 2019). En esta propuesta al considerarse la degradación ambiental como indicador de estos cambios y objeto de estudio, se hace pertinente trabajar bajo los lineamientos de la Teoría General de Sistemas (TGS) presentada por Bertalanffy von (1986) y el enfoque de la perspectiva ambiental. Este capítulo presenta una revisión general, para comprender su aplicación en el contexto colombiano.

1.1 Teoría general de sistemas – TGS

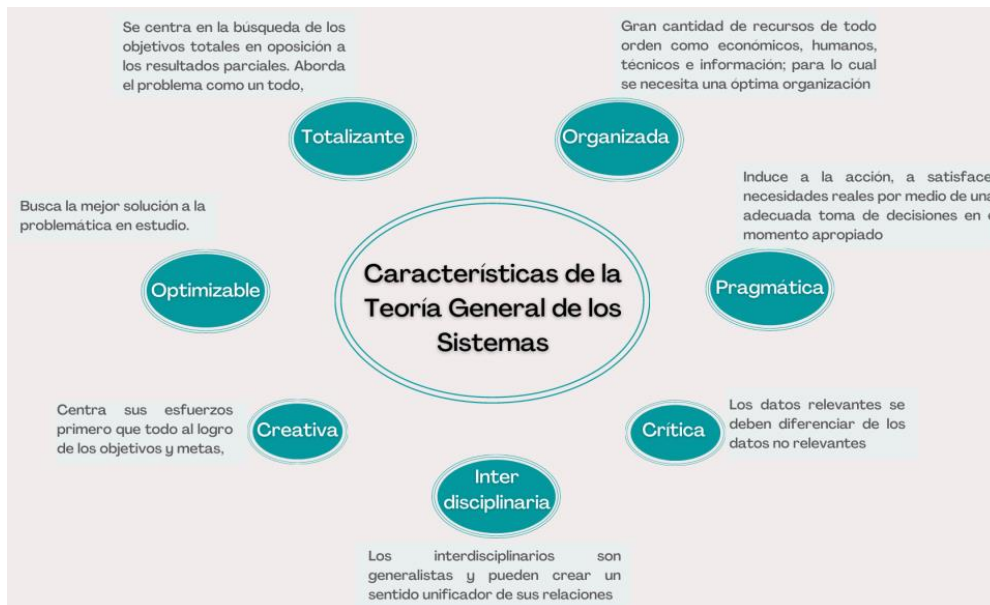
La TGS, se ocupa de la “totalidad”, es decir, de estudiar “sistemas” de varios órdenes (Bertalanffy von, 1986). Sus objetivos originales son: i) Impulsar el desarrollo de una terminología general que permita describir las características, funciones y comportamientos sistémicos; ii) Desarrollar un conjunto de leyes aplicables a todos estos comportamientos y, iii) Promover una formalización (matemática) de estas leyes (Arnold et al., 1998). Esta teoría tiene como eje principal la comprensión de las múltiples interacciones de los componentes (McNeill & Freiburger, 1993 citado por Concha et al., 2012) como condición necesaria para explicar y predecir el comportamiento de un fenómeno de estudio. En un sentido amplio, es una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad que orienta hacia una práctica estimulante de formas de trabajo transdisciplinarias (Arnold et al., 1998). La TGS realiza una crítica a la ciencia mecanicista, al considerarse en parte responsable de problemas ambientales que se enfrentan actualmente (Hammond, 2019 citado por Van Assche et al., 2019).

1.1.1 Características de la TGS

La TGS formula principios válidos para «sistemas» en general, sea cual fuere la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o «fuerzas» entre ellos (Bertalanffy von, 1986). Se fundamenta en tres aspectos: i) la ciencia de sistemas, que direcciona la exploración científica y la teoría de sistemas a diferentes disciplinas del conocimiento, ii) la tecnología de sistemas, y iii) la filosofía de sistemas, el cambio del paradigma de un mundo segmentado y mecánico por aquel que reconstruya la visión del mundo, como un mundo variable y permeado por sus interrelaciones (Alba, 1995; Latorre, 1996 en: Boada, 2016).

En sus postulados expone que dos sistemas compuestos por los mismos elementos, pueden evolucionar en forma diferente, debido a que: i) existe mutua dependencia entre los componentes, ii) los sistemas no son cerrados, y iii) el sistema siempre reaccionará globalmente, y el efecto total de ese cambio se presentará como un ajuste de todo el sistema, muchas veces difícil de predecir y explicar (Sarabia, 1995 citado por: Concha et al., 2012). La TGS, no busca establecer una "teoría general de prácticamente todo" Boulding (1956), sino que presenta una perspectiva holística e integradora Arnold et al (1998) donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ellas emergen. Se caracteriza, por ser: totalizante, organizada, creativa, crítica, interdisciplinaria, optimizable y pragmática (Tamayo, 1999) (Figura 1-1).

Figura 1-1: Características de la TGS.



Fuente: Elaboración propia con base en (Tamayo, 1999)

1.1.2 La TGS como enfoque para el análisis de la degradación ambiental en Colombia

Cuando se habla de degradación ambiental en Colombia, generalmente se hace referencia a la degradación de la dimensión biofísica y como en varios países de la subregión andina, esta, se subordina ante las dimensiones política y económica. Al optar por esta subordinación, se asume lo ambiental como los “recursos” en función de las necesidades del “desarrollo ” y se deja de lado la necesidad de asumirlo como un todo y por lo tanto resultan análisis por separado, como por ejemplo, tratando el nexo entre la degradación y el agotamiento de los bienes naturales por un lado y el crecimiento poblacional por el otro (Lavaux, 2004).

En general las definiciones adoptadas en los análisis del fenómeno en Colombia, exponen que la degradación ambiental se relaciona con el deterioro de los recursos naturales, como el aire, el agua, los bosques (Corvalán, Kjellström & Smith, 1999 en Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2018) o la reducción o pérdida de atributos del ambiente que afecta su calidad y es ocasionada por las actividades económicas y el tipo de tecnología utilizada. Adicionalmente, se afirma que está relacionada con el crecimiento poblacional y por tanto con el riesgo de garantizar el bienestar actual y futuro (Banco Mundial, 2007 en Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2018).

En ese sentido la TGS como enfoque para el análisis de la degradación ambiental, resulta pertinente, pues en el marco de sus principios y características de acuerdo con Fjerbaek y colaboradores (2010) y Concha y colaboradores (2012), lo ambiental puede asumirse como la totalidad, en la que i) se reconoce el estrecho vínculo que existe entre los sub-sistemas físico natural, económico y social, en busca de soluciones integrales, y ii) se trata la naturaleza orgánica e impredecible de los sistemas para abordar la complejidad y multi-escalaridad espacial y temporal, propia de la problemática ambiental.

La degradación se convierte en una propiedad emergente de cada uno de los subsistemas de la problemática ambiental en Colombia y por lo tanto puede analizarse desde el enfoque de sistemas de la TGS, el cual enfatiza en la aparición de dichas propiedades que no son deducibles de los elementos del sistema por separado; sino, que son fruto de las interacciones entre los elementos del sistema (Lewin, 1992).

1.2 La perspectiva ambiental y su enfoque teórico para el análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia

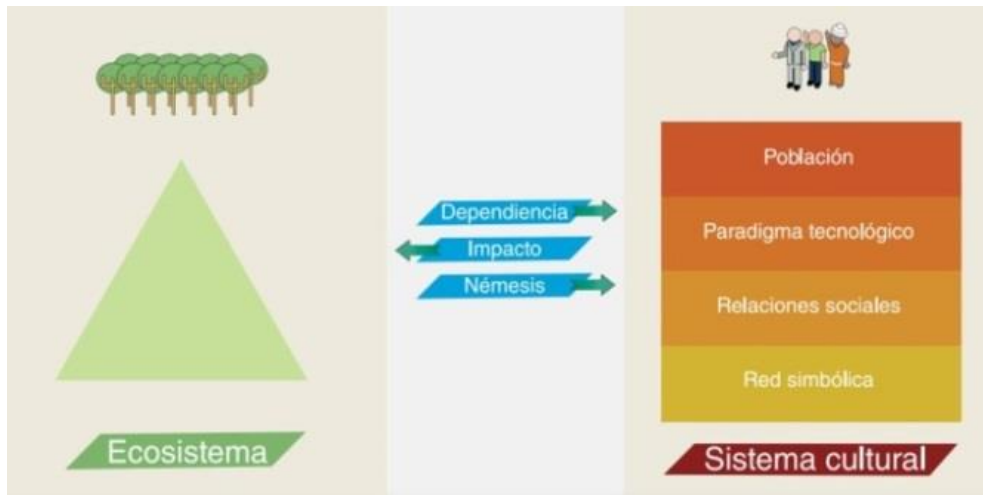
Para el análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia, es necesario trabajar en procesos de cambios profundos en los cuales debe comprenderse que la linealidad temporal, es insuficiente para pensar lo ambiental Ángel & Noguera (2012) y que resulta incoherente, continuar con una visión mecanicista bajo lineamientos de una época marcada por la fragmentación del mundo, el individualismo y la exclusión social (Galano et al., 2002).

La crítica a esta visión enlaza la TGS con la perspectiva ambiental. De acuerdo con la TGS el mundo se entiende como una red interconectada de sistemas y subsistemas, cuyas interacciones dan lugar a más sistemas de nivel superior (Glaser et al., 2008, en Estoque & Murayama, 2014). Y es en esta teoría en la que, en 1995, el filósofo Augusto Ángel, funda sus postulados y propone un modelo para entender lo ambiental. Allí expone que se debe comprender, el ecosistema y los modelos culturales construidos sobre la transformación de la naturaleza (Figura 1-2). Hace un llamado a que el modelo de interpretación ambiental tiene que ser, necesariamente interdisciplinario, siendo la interdisciplina el instrumento teórico que requiere la construcción de la comprensión de una sociedad ambiental (Ángel Maya, 2013).

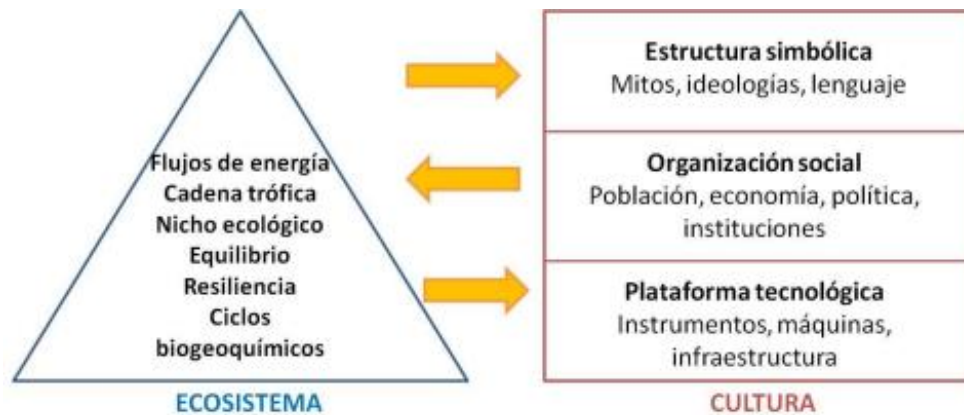
Este modelo puede relacionarse con el enfoque social y ecológico que otros autores Berkes & Folke (1998), Liu et al (2007), Partelow (2018) proponen a nivel internacional, donde aunque se resalta la importancia de los estudios disciplinarios para avanzar en la investigación de aspectos de los sistemas sociales y ecológicos Liu et al (2007), se promueve el estudio integral de lo ambiental a partir de tres relaciones principales que ayudan a comprender que las transformaciones de los ecosistemas son transformaciones de la cultura imposibles de analizar por separado (Ángel & Noguera, 2012).

Por lo tanto, el concepto de sistemas sociales y ecológicos es pertinente y se incluye en los fundamentos teóricos de la perspectiva ambiental claves para aportar en el conocimiento de la degradación ambiental. Este fenómeno, actualmente presenta vacíos de información y requiere profundizar en su estudio para asimilar que las dinámicas en los sistemas surgen por i) la heterogeneidad espaciotemporal del paisaje, ii) la interdependencia de variables y iii) la retroalimentación transversal y multi – escalar entre estas variables (Naia et al., 2008).

Figura 1-2: Modelo Ecosistema y Cultura



A. Modelo Ecosistema y Cultura. Fuente: Ángel-Maya (2013)



B. Modelo de Interpretación del ambiente. Fuente: Ángel, (1996) en: Hortúa R, (2014)

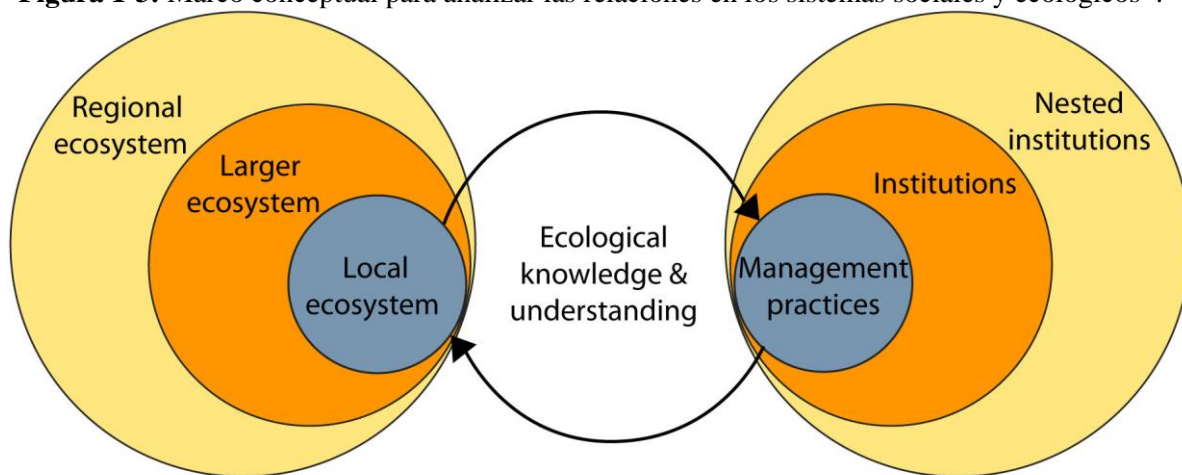
1.2.1 Enfoque de sistemas sociales y ecológicos (SES)

El concepto de SES por sus siglas en inglés, ha sido trabajado por el Centro de Resiliencia de Estocolmo desde hace aproximadamente 15 años para comprender el sistema social y el sistema ecológico como un solo sistema en el que se ve la dimensión humana como parte de la naturaleza (Cerón Hernández et al., 2020). Este enfoque viene trabajándose desde 1988, según Colding & Barthel (2019), en ese año se obtuvo su primera definición por el microbiólogo ruso B.L. Cherkasskii, como un sistema formado por dos subsistemas que interactuaban: el biológico (ecosistema epidemiológico) y el social (condiciones de vida sociales y económicas de la sociedad).

La definición de los SES se desarrolló 10 años después por Berkes y Folke (1998) donde los sistemas sociales y ecológicos constituyen un concepto holístico, sistémico e integrador del ser humano en la naturaleza. Específicamente, lo utilizaron para ampliar la comprensión y enfrentar el desafío de

encontrar maneras de hacer coincidir la dinámica de las instituciones con la de los ecosistemas para mejorar su funcionamiento (Figura 1-3). Estos autores enfatizan en que los dos subsistemas son igualmente importantes al estar inherentemente entrelazados (Cerón Hernández et al., 2020; de Jong & Kok, 2021). Por su parte, Anderis y colaboradores (2004), presentan un análisis más completo y definieron los SES como un sistema ecológico íntimamente ligado y afectado por uno o más sistemas sociales. Así, tanto sistemas sociales como sistemas ecológicos contienen unidades que interactúan interdependientes y cada uno puede contener subsistemas (Colding & Barthel, 2019).

Figura 1-3: Marco conceptual para analizar las relaciones en los sistemas sociales y ecológicos*.



*La comprensión y el conocimiento ecológico es un vínculo crítico entre la complejidad y las dinámicas de los ecosistemas, las prácticas adaptativas de manejo y las instituciones
Fuente: Colding & Barthel (2019)

En la ecología tradicional se denomina ecosistema al conjunto de factores biofísicos interactuantes, cuyo resultado, es un sistema organizado que se caracteriza por atributos de estructura, composición, y funcionamiento, donde lo humano aparece como una perturbación del funcionamiento normal de los mismos. Los teóricos de la ecología de ecosistemas proponen el concepto de sistemas sociales y ecológicos (Chapin et al., 2009; Gunderson et al., 1995; Walker & Salt, 2006).

En este concepto incluyen entidades físicas, bióticas y culturales interdependientes para definir los SES como un sistema, en el que se comparte e interviene una plataforma común de soporte de procesos y estructuras biofísicas y sociales, cuya dinámica se basa en la relación hombre-naturaleza y se manifiesta como un sistema nuevo con propiedades emergentes de auto-organización y en el cual las variables constitutivas no son ya solamente “biofísicas”, o solamente “sociales” sino el resultado de las interacciones entre estas dos (Franco-vidal et al., 2015).

De acuerdo con The Resilience Alliance (2010) los sistemas sociales y ecológicos, conforman un sistema complejo y adaptativo en el que interactúan diferentes componentes culturales, políticos, sociales, económicos y ecológicos y permiten concluir que el enfoque de la gestión de los ecosistemas no se centra en los componentes del sistema, por el contrario, lo hace basado en sus relaciones, interacciones y retroalimentaciones (Farhad, 2012).

En este enfoque los sistemas humanos incluyen elementos como valores, decisiones y percepciones y los sistemas naturales se relacionan con elementos biofísicos incluidos los ciclos ecológicos e hidrológicos. Las interacciones son el resultado de cualquier comportamiento dentro o entre estos dos sistemas que refuerzan o modifican las dinámicas del sistema social y ecológico (Berkes & Folke, 1998; de Jong & Kok, 2021). Es por esto que existen áreas en las cuales se logra mantener el uso sostenible de los ecosistemas y la conservación de la biodiversidad (Uehara et al., 2021).

Los SES combinan diferentes componentes para organizar consistentemente el análisis de la co-evolución de humanos y naturaleza (Bolognesi et al., 2018). Dentro de sus características se destacan la resiliencia, los servicios ecosistémicos, la adaptabilidad y la complejidad. Tanto la resiliencia como la adaptabilidad se relacionan de manera conjunta en las interacciones que se establecen entre el sistema social y ecológico. Los servicios ecosistémicos y la complejidad incluyen aspectos de no linealidad y no previsibilidad (Cerón Hernández et al., 2020; Partelow, 2018; Sterk et al., 2017). Los SES no tienen un único estado de equilibrio sino múltiples estados y no responden a cambios graduales, sino que existen umbrales de cambio, algunos muy pronunciados (Rathe, 2017).

2. Degradación Ambiental

El estudio de la degradación ambiental se ha relacionado en general con degradación de la tierra, suelo, bosque, o de determinadas variables (Bradshaw & Di Minin, 2019; IPBES, 2018; Webb et al., 2020). Sin embargo, de acuerdo con Olsson y colaboradores (2019) se continúa sin un modelo estándar para su análisis y sin un mapa global o nacional fiable del alcance y la severidad de este fenómeno, claramente porque falta una precisión teórica y metodológica del concepto. En esta sección, se revisan definiciones de la degradación ambiental teniendo en cuenta estudios nacionales e internacionales, y por último se reflexiona en torno a la posibilidad de asumir la degradación ambiental como un indicador complejo de cambios en los SES.

2.1 Revisión del concepto de degradación ambiental y su relación con los sistemas sociales y ecológicos

Para poder adoptar un concepto de degradación ambiental y visualizar la relación que puede existir con los SES, es preciso retornar a algunas definiciones y a la connotación que éste fenómeno tiene actualmente con la crisis civilizatoria. Lo ambiental, como se presentó en el primer capítulo se refiere a la “totalidad” y la degradación según la Real Academia Española (n.d.), se define como la acción y efecto de degradar o degradarse. Al ser este el punto de partida, de acuerdo con Lavell (1996), se resaltan dos aspectos, primero que la degradación se aleja claramente de operar exclusivamente sobre el ecosistema y sirve para ubicar al ser humano y sus acciones como componentes intrínsecos del ambiente. Segundo que la degradación, implica el examen: i) del impacto de lo social sobre lo social; ii) del acondicionamiento social del impacto del ser humano sobre lo natural; y iii) del impacto de la naturaleza transformada sobre la sociedad.

No obstante, por lo general el concepto se relaciona con lo natural y se encuentran definiciones donde la degradación ambiental es el deterioro del medio ambiente reflejado por el agotamiento de recursos naturales, el cual conlleva a la destrucción de ecosistemas y la extinción de la vida silvestre (Pérez et al., 2020). En esta misma línea Maurya et al (2020), afirman que es el deterioro del medio ambiente

a través del agotamiento de los recursos. Choudhary et al (2015) exponen que es un concepto general que cubre una variedad de temas que incluyen la contaminación, la extinción de animales y la deforestación entre otras. Para Zurruta et al (2015) la degradación ambiental puede definirse como el conjunto de procesos que impiden la utilización de un determinado recurso, por la humanidad.

En la mayoría de las definiciones, se observa la prelación a la especie humana y a “satisfacer” sus necesidades donde la dimensión natural es el proveedor de servicios. Por esto es preciso resaltar que cuando el ser humano se coloca a sí mismo en el centro, termina dando prioridad absoluta a sus conveniencias circunstanciales, al paradigma tecnocrático y la adoración del poder humano sin límites de manera equivocada, sin prestar atención a que no se puede afrontar adecuadamente la degradación ambiental si no se consideran las causas que tienen que ver con la degradación de lo ecosistémico y lo cultural (Papa Francisco, 2015).

La visión actual predominante del desarrollo, enfatiza el crecimiento económico ilimitado Fonseca (2016) y promueve principios de disyuntiva, reducción y abstracción (Morin en Carrizosa, 2014). Este paradigma es el que ha direccionado el estudio de lo ambiental y el desconocimiento del vínculo que debe establecerse entre el ser, el pensamiento y el actuar para analizar lo ambiental (Torres C, 2016). La degradación ambiental actualmente, no solo se refiere a los procesos geofísicos de los elementos que conforman los sistemas naturales en su integridad biológica, sino, que adquiere una dimensión planetaria resultado del crecimiento económico y del desarrollo de actividades humanas (Rees, 1996; Rockström et al., 2009). Los abordajes de los problemas ambientales que causan la degradación son de naturaleza multidisciplinaria y la escala varía (Sankar, 2009; Thakur et al., 2014). En ese sentido, es preciso tener en cuenta que la especie humana no ocupa ningún nicho específico dentro del ecosistema.

En épocas remotas, los sistemas ecológicos y las sociedades humanas eran objeto de análisis independiente, sin embargo, como lo reitera Redman y colaboradores (2004), “El estudio aislado de los sistemas ecológicos y sociales ya no es defendible”, principalmente porque las sociedades y su desarrollo influye en la mayoría de los sistemas ecológicos del planeta y a su vez retorna afectando los patrones de desarrollo social (Delgado & Marin, 2005). Desde mediados del siglo XX se intensifica y amplía un nuevo enfoque que persigue la integración de las ciencias de la naturaleza con las sociales y humanas, pues no puede abordarse sin las conexiones que tiene la sociedad con la naturaleza (Toledo et al., 2002).

La degradación ambiental, es una respuesta de las dinámicas generadas por las conexiones entre los sistemas sociales y ecológicos y no debe tratarse como si fuese un fenómeno exclusivamente biofísico, pues ha sido catalogada como una de las diez amenazas oficialmente advertidas por La Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (Tyagi et al., 2014). No obstante en instancias internacionales como el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su reporte especial sobre cambio climático y tierra, se habla de degradación de la tierra, como una tendencia negativa en la condición de la tierra, causada por procesos directos o indirectos inducidos por el hombre y expresada como una reducción o pérdida a largo plazo de: la productividad biológica, la integridad ecológica o el valor para los seres humanos (Olsson; et al., 2019). Para autores que se refieren específicamente a degradación ambiental, ésta es definida como "La reducción de la capacidad del medio ambiente para satisfacer los objetivos y necesidades sociales y ecológicos" (UNISDR, 2004).

En el desarrollo de este trabajo se adopta la precisión conceptual de Lavell (1996), la cual da soporte primero, al estudio del ambiente como una totalidad que va más allá de los elementos de la naturaleza y segundo a la especificación de la degradación como parte del funcionamiento de los sistemas sociales y ecológicos, que hace referencia a "una reducción de grado o la transición a un rango menor" o a "cambios en la homeóstasis de un sistema", y que per se no puede calificarse como un proceso positivo o negativo, sino que, debido a los intereses de la especie humana, ahora responde más a un fenómeno antropogénico. También se adopta como base teórica el enfoque de los SES y el modelo de interpretación ambiental propuesto por Ángel Maya (2013) en que el problema ambiental no consiste en "conservar" la naturaleza, sino en modificarla bien.

Con esta base y mediante el diseño de un índice espacial que integra no solo variables ecosistémicas si no también, culturales, se expone que la degradación ambiental en Colombia se ha construido sobre transformaciones de la naturaleza que transgreden las propias leyes de funcionamiento en los sistemas sociales y ecológicos y donde las interacciones en estos sistemas se van volviendo explosivas, al punto que los desafíos son cada vez más complejos y urgen cambios profundos hacia una sociedad ambiental (Gligo et al., 2020).

2.2 Tipos de degradación ambiental a representar espacialmente en Colombia

Espacializar y medir la degradación ambiental como fenómeno emergente, requiere investigación constante para comprender su comportamiento espacial y conocer los factores que inciden en esta (Armenteras et al., 2018). La tarea se dificulta cuando existen vacíos y limitaciones en la información Departamento Nacional de Planeación de Colombia (2018b) geográfica de variables claves en el país y por lo tanto es necesario unir esfuerzos a diferentes niveles para continuar en la identificación e inclusión de los recursos espaciales que se requieran para poder representar de la mejor forma este fenómeno, pues su avance de acuerdo con Armenteras et al (2018) se convierte en un factor decisivo para orientar y apoyar acciones en torno a la reducción de las pérdidas de los bienes de la naturaleza y de cómo esta pérdida amenaza el desarrollo futuro de la sociedad colombiana.

En Colombia los tipos de degradación ambiental a representar pueden conformar una larga lista, pues se pueden relacionar diferentes factores de degradación como por ejemplo la deforestación, la disminución de los recursos hídricos, la aridez, la erosión de los suelos, la violencia, la pobreza y la capacidad de agencia en el país. La espacialización de la degradación ambiental es tan complejo que, es preciso identificar qué información generada a nivel nacional, puede relacionarse con el fenómeno y cumple las características de datos geográficos, pues debido a las dinámicas de los sistemas sociales y ecológicos, no todo puede integrarse espacialmente. En este sentido se plantea explorar un conjunto de datos geográficos que de alguna manera indique el estado de determinado elemento ambiental y contribuya a la definición de una línea base de degradación ambiental para aportar en la comprensión de procesos de pérdida de ecosistemas, desplazamiento o migración de especies.

2.3 La degradación ambiental como indicador espacial de cambios en los sistemas sociales y ecológicos

En el informe elaborado en 2019, por la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) advierte que se detecta una declinación sin precedentes de la naturaleza y de los servicios ecosistémicos (Gligo et al., 2020). Esta situación implica que la degradación ambiental se convierte en el “producto más costoso” del modelo de desarrollo adoptado y resalta los cuestionamientos hacia los fundamentos ideológicos y teóricos que han impulsado y legitimado el crecimiento económico, negando a la naturaleza y a la cultura (Leff, 2004). Esta negación, implicó la persistencia de la pobreza extrema y el deterioro acelerado de las diferentes dimensiones del ambiente (Gligo et al., 2020).

Colombia no es ajena a este fracaso y a la “Era de la gran aceleración”, su desarrollo ha priorizado el extractivismo y aunque el “desarrollo” es un concepto cualitativo que incorpora ideas de mejora y progreso, incluidas las dimensiones culturales y económicas (Blowers et al., 2012); en el país, éste, se ha basado en la transformación total del ambiente bajo el discurso de “desarrollo sostenible”. Sin embargo Andrade & Castro (2012), exponen que existen modificaciones lentas y menos perceptibles que implican cambios en estructura, función y régimen de funcionamiento, con tendencias negativas frente a los sistemas sociales y ecológicos. En este sentido, cobra importancia investigar y analizar la información espacial relacionada con degradación ambiental, pues ésta presenta procesos paulatinos y puede entenderse como indicador complejo de cambios abruptos e inesperados en el estado de los sistemas sociales y ecológicos que no pueden fácilmente revertirse (Wu et al., 2019).

Esto implica un reto de constante trabajo que requiere integrar diversas variables y generar indicadores que permitan conocer su estado, analizar las interacciones y los tipos de cambios que se dan en dichos sistemas, como un camino clave para fomentar su comprensión (Liu et al., 2007) y tomar acciones pertinentes en la gestión del ambiente. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OECD (2001) un indicador ambiental se define como un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo. Según Schuschny & Soto (2009) un indicador se define como una función de una o más variables, que conjuntamente “miden” una característica o atributo de los individuos en estudio.

Es decir que si se caracteriza o mapea la degradación ambiental, ésta podría asumirse como el resultado de las profundas transformaciones causadas por el “progreso” del país y como un indicador ambiental espacial para: i) establecer una línea base que relacione el estado de algunas interacciones que emergen en los sistemas sociales y ecológicos; ii) identificar si existen patrones por afectación de determinadas actividades de desarrollo económico; y iii) si existen signos de cambios que exceden los regímenes normales que pueden estar generando áreas inhabitables. Además, al plantear dicha asunción, lejos de señalar la necesidad de renunciar al antropocentrismo, busca ayudar a comprender que las decisiones tomadas en materia de gobierno, desarrollo y crecimiento económico en Colombia tienen implicaciones en cada una de las regiones algunas veces nefastas en términos de condiciones favorables para vivir, migración o desplazamiento forzado.

3. Índice espacial de degradación ambiental normalizado – IEDAN. Propuesta metodológica

De acuerdo Jha & Murthy (2011) existe un consenso en el que los siguientes factores: a) Polución – de varios tipos; b) Ausencia de biodiversidad; c) Basura – tóxica y no tóxica; y d) Erosión de la base de recursos naturales debido a fenómenos como la deforestación y el agotamiento de los recursos de agua dulce entre otros, son los principales responsables de la degradación ambiental. Para Colombia, conocer y generar información específica de este fenómeno, continúa siendo un reto y es por esta razón que en el marco de este trabajo se plantea una herramienta espacial de tipo índice. En este capítulo se detalla la propuesta como aporte al establecimiento de una línea base y posterior monitoreo de la degradación ambiental, que facilite la identificación de áreas en las cuales se presenta convergencia de tipos de degradación que propician pérdida de ecosistemas o falencias en el sistema cultural.

3.1 Antecedentes metodológicos para el análisis espacial de la degradación ambiental

Conforme se presentó en capítulos anteriores, para el análisis espacial de la degradación ambiental existen diferentes propuestas para evidenciar la afectación antropogénica, algunos de estos métodos están orientados desde el ámbito de la teoría económica, otros desde lo biofísico y otros desde el estudio de las presiones antrópicas como indicadores de sostenibilidad. En esta sección se presentan algunos estudios relevantes relacionados con degradación ambiental a nivel nacional e internacional.

A nivel global UNOOSA/UN-SPIDER (2010) presentan el Índice de Impacto de Degradación del suelo (GLADIS) que basado en seis indicadores biofísicos y socioeconómicos, es utilizado para monitorear el estado, las tendencias de degradación de la tierra y las presiones ejercidas a las funciones de los ecosistemas. Este enfoque, sin embargo, está restringido por la falta de datos

detallados a nivel global y, por lo tanto, utiliza muchas generalizaciones en su análisis, lo que hace que su aplicabilidad y uso de productos a escalas locales sea limitada.

Uno de los estudios principales a nivel mundial, con el enfoque de indicadores de sostenibilidad, es el cálculo de la huella ecológica global, que según WCS, Wildlife Conservation Society & CIESIN (2005), fue desarrollada a una escala de 1 kilómetro, para mostrar los impactos antropogénicos sobre el ambiente, a partir de nueve variables relacionadas con las presiones de la población humana. A nivel nacional se han realizado estudios desde el enfoque de la evaluación del riesgo y análisis individuales para variables biofísicas, hasta la espacialización de indicadores de sostenibilidad.

A nivel internacional, con enfoque socioeconómico Bradshaw y Di Minin (2019), presentan modelos de ecuaciones estructurales que indican que el aumento de la densidad de población y la actividad económica general (producto interno bruto per cápita corregido por la paridad del poder adquisitivo), son los que se correlacionan más fuertemente con una mayor degradación ambiental, mientras que una mayor desigualdad de riqueza (índice de Gini) se correlaciona con un mejor desempeño ambiental.

En esta misma línea y con el fin de investigar los determinantes de la degradación ambiental y explorar el papel del consumo de energía renovable para 14 países de África subsahariana, Wang & Dong (2019), calcularon la huella ecológica a partir de cuatro variables: i) Producto Interno Bruto per cápita, ii) Consumo per cápita de energía no renovable y energía renovable, iii) Población urbana, utilizando diferentes técnicas econométricas y concluyen entre otras cosas, que el nivel de degradación ambiental se determina por la característica demográfica de cada región. Jha y Murthy (2011) en su Índice de desarrollo humano basado en el consumo y la curva ambiental global de Kuznets, exponen que la degradación ambiental global no tiene una base geofísica sino antropogénica y toman como variables: i) PCFww: extracciones anuales de agua dulce per cápita, ii) PAPCPM: papel de impresión y escritura consumido per cápita, iii) PCCO₂ - Emisión de CO₂ per cápita y iv) CO₂SH: proporción del CO₂ total mundial.

En cuanto al enfoque integrador, Prakash y colaboradores (2016) calcularon el índice de vulnerabilidad a la degradación en la región del Himalaya, a partir de la media geométrica de parámetros climáticos, socioeconómicos y fisiográficos. Encontraron que las tasas de degradación se desencadenan más por factores físicos, dado que la población es escasa en la parte superior noreste

y suroeste del distrito de estudio. Por su parte, Vu y colaboradores (2014) identificaron los factores biofísicos y socioeconómicos que afectan significativamente la degradación de la tierra en Vietnam e interpretaron las causalidades subyacentes a sus efectos. Encontraron que la degradación de la tierra es causada por la interacción entre componentes biofísicos y socioecológicos, pero se debe principalmente a variables demográficas y económicas.

A nivel nacional, recientemente Correa y colaboradores (2020) realizaron la evaluación espaciotemporal de la huella ecológica en Colombia, la cual evidencia cuatro décadas de impactos antropogénicos en ecosistemas altamente biodiversos. Utilizaron variables de intensidad de uso del suelo, densidad de población rural y urbana, un índice general de fragmentación, índice de biomasa relativa, tiempo de intervención humana sobre los ecosistemas y vulnerabilidad biofísica. El estudio proporciona una evaluación de los impactos humanos en un país megadiverso y permite saber dónde han aumentado, disminuido o mantenido los impactos en los últimos 45 años.

En el país, desde el 2010 se trabaja en la estimación de la degradación de variables como el suelo, los bosques y los recursos hídricos; por ejemplo, Ramírez y colaboradores (2018), estimaron la degradación de los bosques de Colombia a través de un análisis de fragmentación. Por su parte, a nivel de ecosistemas, Etter y colaboradores (2017) analizaron el estado de los ecosistemas colombianos aplicando la metodología de lista roja; donde se integró, el mapa de ecosistemas potenciales, mapas multitemporales de transformación de los ecosistemas, mapas de variabilidad climática y cambios en la distribución de especies.

Estos análisis, son valiosos y se convierten en herramientas de consulta obligatoria. No obstante, se observa que el enfoque teórico y metodológico que manejan busca aportar en el estudio de una dimensión específica y por ende persisten falencias en el abordaje de la degradación como un problema ambiental donde confluyen aspectos biofísicos, sociales, económicos y culturales. Por tanto, urge desmitificar el ideal del progreso y considerar que, para analizar la degradación ambiental, hay que entender no solamente al hombre biológico sino igualmente al hombre social (Ángel, 2001). La Tabla 3-1, sintetiza algunos estudios espaciales realizados a nivel nacional e internacional.

Tabla 3-1: Estudios relevantes de mapeo de degradación ambiental a nivel nacional e internacional.

| Escala | Nombre del estudio y autor | VARIABLES | Principal resultado |
|---------------|---|---|---|
| | Global Land Degradation Information System – (GLADIS) (UNOOSA/UN-SPIDER., 2010) | Biomasa Suelo Agua Biodiversidad Producción Económica Condiciones Socioculturales | Herramienta para monitorear el estado, las tendencias de degradación de la tierra y las presiones ejercidas a las funciones de los ecosistemas. |
| | Global Human Footprint. (WCS, Wildlife Conservation Society & CIESIN, 2005) | Densidad de Población, Áreas urbanizadas, Iluminación nocturna Cobertura y uso del suelo Costas Carreteras y ferrocarriles Ríos navegables. | Impactos antropogénicos sobre el ambiente. |
| | Socio-economic predictors of environmental performance among African nations. (Bradshaw & Di Minin, 2019) | Huella Ecológica Especies amenazadas Deforestación Remoción de agua dulce Densidad de ganado Cobertura de tierras de cultivo Emisiones per cápita. | Primera evaluación a escala africana de la correlación entre variables socioeconómicas y la degradación ambiental. |
| Internacional | Mapping and assessing land degradation vulnerability in Kangra district using physical and socio-economic indicators. (Prakash et al., 2016) | Cobertura y uso del suelo Tipo de suelo Pendientes Geología Aspecto Precipitaciones Índice de aridez de Bagnouls-Gausson (BGI) Densidad de Población Población no trabajadora Analfabetismo | Índice de vulnerabilidad a la degradación en la región del Himalaya. |
| | Socio-economic and biophysical determinants of land degradation in Vietnam: An integrated causal analysis at the national level (Vu et al., 2014) | Superficies pendientes Restricciones de la calidad combinada de suelo Distancia a vías principales Distancia a ciudades Abundancia forestal dentro del vecindario respecto a la ubicación considerada Abundancia agrícola Densidad de población Cambio en la densidad de población Tasa anual de crecimiento de la población urbana Tasa anual de crecimiento de la población rural Índice de pobreza Producto agrícola bruto anual medio per cápita Tasa de crecimiento anual del producto agrícola bruto per cápita Tasa de crecimiento anual del área de cultivos principales Tasa de crecimiento anual del rendimiento de cereales. | Este estudio tiene como objetivo identificar los factores biofísicos y socioeconómicos que afectan significativamente la degradación del suelo en Vietnam e interpretar las causalidades subyacentes a los efectos. |
| | A Consumption Based Human Development Index and the Global Environmental Kuznets Curve. (Jha & Murthy, 2011) | Extracciones anuales de agua dulce per cápita. Papel de impresión y escritura consumido per cápita Emisión de CO2 per cápita Proporción del CO2 total mundial | Índice de desarrollo humano basado en el consumo alternativo. |

| Escala | Nombre del estudio y autor | VARIABLES | Principal resultado |
|----------|--|--|--|
| | Climate change, environmental degradation and migration. (Warner K, et al 2009) | Literatura multidisciplinaria que incluye: ecología, ambiente, cambio climático, sociología de migraciones, antropología de desplazamientos y economía | Este estudio señala que se sabe poco acerca de la interacción entre cambios y tensiones en los sistemas ecológicos, lo que genera vulnerabilidad socioeconómica y resultados potenciales en términos de desplazamiento de población o migración inducida. El análisis de los casos revela que la degradación puede tener en el futuro una influencia cada vez mayor en el desplazamiento y la migración interna e internacional. |
| | Spatiotemporal Evaluation of the Human Footprint in Colombia: Four Decades of Anthropogenic Impact in Highly Biodiverse Ecosystems (Correa A et al., 2020) | Intensidad de uso del suelo. Densidad de población rural y urbana. Índice general de fragmentación Índice de biomasa relativa Tiempo de intervención humana sobre los ecosistemas. Vulnerabilidad biofísica. | Evaluación de los impactos humanos en un país megadiverso y permite saber dónde han aumentado, disminuido o mantenido los impactos en los últimos 45 años. |
| | Estimación de la degradación de bosques de Colombia a través de un análisis de fragmentación. (Ramírez D et al., 2018) | Análisis de fragmentación de bosques | Estimación de la degradación de bosques para Colombia. |
| Nacional | Estado De Los Ecosistemas Colombianos. (Etter et al., 2017) | Clima, Suelos, Ecosistemas, Coberturas, Altitud, Relieve Distribución de especies Mapas multitemporales de transformación de los ecosistemas Series de precipitación histórica Mapa de regiones de Colombia Mapas de cambios en la presencia de procesos de dispersión y polinización | Implementación de nuevos enfoques y ajustes metodológicos sobre la propuesta de la implementación de la Lista Roja de Ecosistemas de la UICN para Colombia en su primera versión. |
| | Estudio Nacional de Suelos por Erosión en Colombia. 2015 | Procesos de erosión por medio de delimitación espacial de las áreas afectadas con la respectiva calificación de acuerdo con la clasificación por tipo (factor), grado (intensidad y severidad) y clase (rasgos en el terreno) del proceso. | Zonificación de la degradación de suelos por erosión. |

3.2 Metodología propuesta

Como se presentó en la sección anterior diferentes estudios analizan el deterioro ambiental en el país, sin embargo, la literatura muestra que la espacialización de la degradación ambiental, abordando lo ambiental desde los SES, es explorado en menor medida. Es por esto que, los aportes claves de esta propuesta están relacionados primero con el enfoque teórico a partir de la adopción de la perspectiva ambiental, la TGS y los conceptos básicos de degradación y convergencia espacial para continuar con la línea de los trabajos realizados por Carrizosa (2005) y Márquez (2003) donde es pertinente asumir el país como un macrosistema, con sistemas regionales y subsistemas municipales que tienen relaciones y procesos específicos que dependen del comportamiento de variables ecosistémicas y culturales.

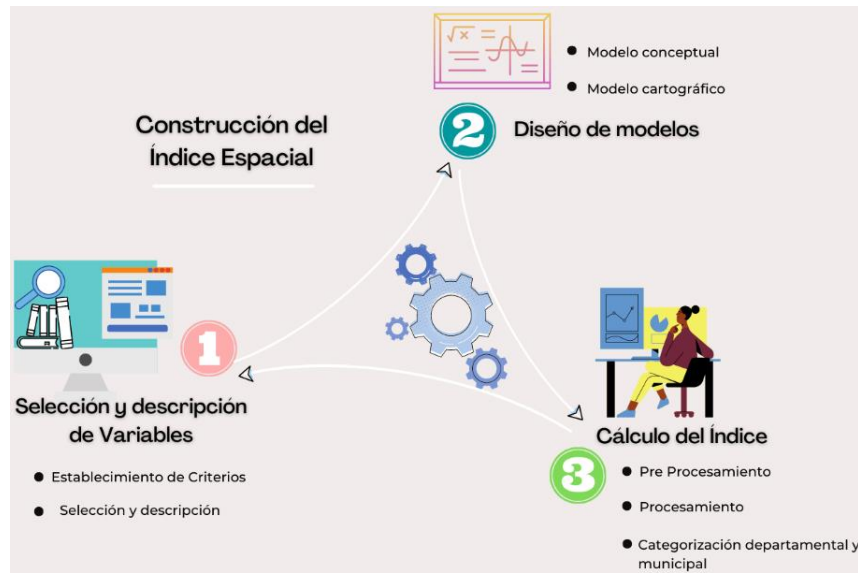
Segundo el método, pues basados en la información espacial actual, el país no se cuenta con un mapa base del estado de degradación ambiental y por lo tanto se propone el desarrollo de éste donde se integren variables de los sistemas sociales y ecológicos bajo técnicas de sistemas de información geográfica (SIG) como lo sugieren (Dressel et al., 2018; Noble et al., 2021). Se propone iniciar con la técnica de superposición espacial de datos para diseñar un índice que, ayude a conocer el comportamiento de la degradación ambiental y permita identificar geográficamente áreas en las que convergen valores de degradación para diferentes elementos ambientales.

En el planteamiento del índice a diferencia de los estudios mencionados, la degradación se propone abordar espacialmente con variables específicas que den cuenta del estado de degradación en el que se encuentra determinado elemento ambiental e incluye variables culturales que no se contemplan como aporte al conjunto de datos que explican dicho fenómeno. El desafío entonces de pasar del nivel teórico a un valor específico se propone enfrentar con la comprensión de la posibilidad de identificar datos espaciales que permitirían la comprensión de la degradación ambiental de manera integral.

La propuesta busca la selección de recursos geográficos oficiales para Colombia que contribuyan por sí mismos a conocer el estado de la degradación de determinado elemento ambiental. A partir de las propuestas realizadas por Jha & Murthy (2011), Warner et al (2010), en las cuales se calculó la degradación ambiental global a partir de la integración de factores sociales, económicos, culturales y geofísicos; el diseño y construcción del IEDAN se plantea en tres fases: i) Selección y descripción de variables; ii) Diseño de modelos; y iii) Cálculo del índice (Figura 3-1).

3.2.1 Fase 1: Selección y descripción de variables

Para analizar el comportamiento y los patrones de distribución del fenómeno de la degradación ambiental, es esencial comprender las dinámicas entre variables ecosistémicas y culturales, por ello esta fase de selección de variables es clave y busca a partir de una revisión general de los recursos geográficos oficiales existentes a nivel nacional, encontrar aquellos que contengan información específica sobre determinado factor y que ésta pueda relacionarse con el fenómeno de degradación ambiental. Esta fase se compone de 2 etapas a su vez: i) Establecimiento de criterios; y ii) Selección y descripción de variables.

Figura 3-1: Metodología general del índice propuesto.

Fuente: elaboración propia

- ***Establecimiento de Criterios para la selección de variables***

Teniendo en cuenta que pese a los esfuerzos de generación de información espacial en el país, persisten vacíos al momento de requerir datos específicos de determinados fenómenos, para este ejercicio se establecieron tres criterios el primero, la ***especificidad***, pues existen diversas capas con potencial para incluirse en el análisis espacial de la degradación pero, se requiere que la capa contenga información específica que por sí sola aporte a la identificación del estado de degradación de determinado elemento. Para la decisión se revisó el concepto de degradación mencionado y adoptado previamente en el capítulo 2 y analizarlo respecto a lo que está indicando cada variable y a su definición teórica. El segundo, la ***accesibilidad***, este criterio restringe a que la información sea oficial y de libre acceso y el tercero, la ***topología***, éste último criterio se estableció para garantizar información sin errores de digitalización, polígonos abiertos, huecos en los polígonos o polígonos superpuestos que implicarían sobre o sub estimación de áreas en el reporte de resultados.

- ***Selección y descripción de variables***

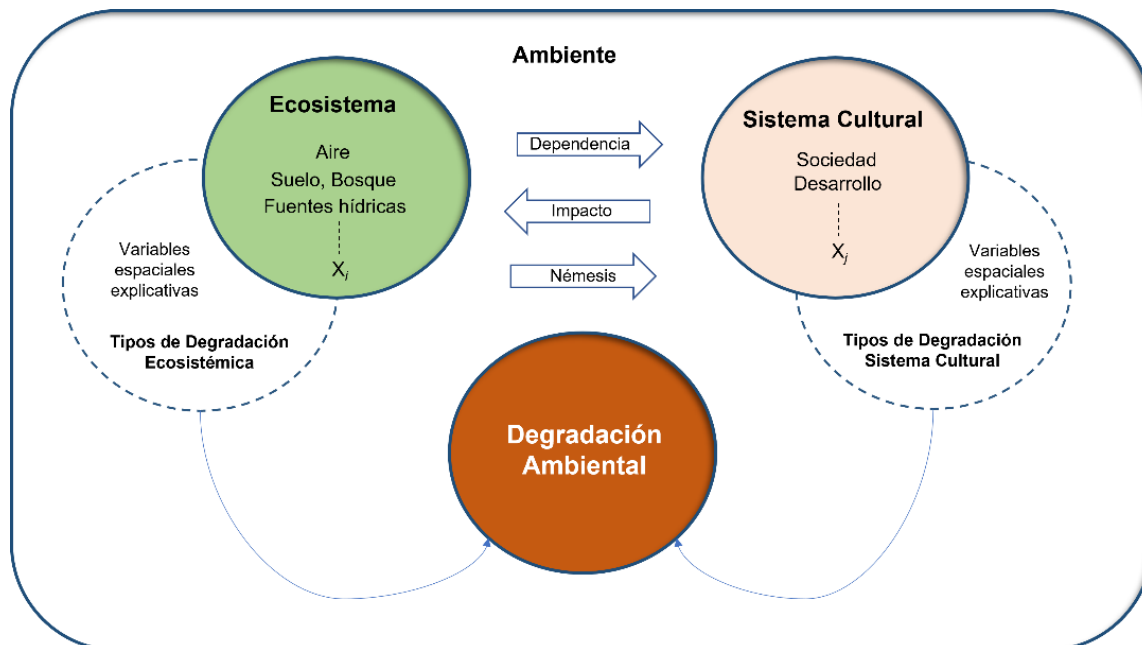
En esta etapa, se siguen las recomendaciones de la incorporación de variables ecológicas y del sistema cultural dadas por los autores Carrizosa (2005); Márquez (2003) para lograr de manera más profunda el estudio y seguimiento ambiental del país. La selección incluyó tres actividades: i) Búsqueda en las plataformas de las diferentes entidades responsables de generar información espacial oficial y generación de tabla de registro con fuente, escala de la capa y tipo de formato (raster, vector o reporte estadístico a nivel nacional); ii) Descarga de los datos que cumplan con el primer y segundo criterio establecido; y iii) Revisión topológica.

Se identificaron 31 recursos geográficos para 1122 municipios en el periodo (2000 – 2017); 16 estaban en formato vector, 12 en ráster y 3 como reporte estadístico. Se generó la Tabla 3-2, con la información recopilada para registrar nombre de la capa, fuente y formato. Este conjunto de datos de acuerdo con Carrizosa (2005); Márquez (2003), puede agruparse en tres grupos de indicadores: i) biofísicos en verde claro; ii) sociales en marrón; y iii) económicos en amarillo.

3.2.2 Fase 2: Diseño del modelo conceptual y espacial

De acuerdo con Tecnologías de la Información (2018), un modelo conceptual de datos identifica las relaciones de más alto nivel entre las diferentes entidades, dentro de sus características se incluyen entidades importantes y las relaciones entre ellas sin especificar ningún atributo o clave principal. En este caso el modelo conceptual se plantea con dos entidades principales, la dimensión ecosistémica (DE) y la dimensión del sistema cultural (DC); en estas entidades se presentan diferentes dinámicas y se incluyen las relaciones de dependencia, impacto y némesis. Cada entidad consta de determinados elementos ambientales y variables explicativas que deben tener la propiedad de ser espacialmente explícitas (Figura 3-2).

Figura 3-2: Modelo conceptual.



Elaboración propia, fuente: (Ángel Maya, 2013)

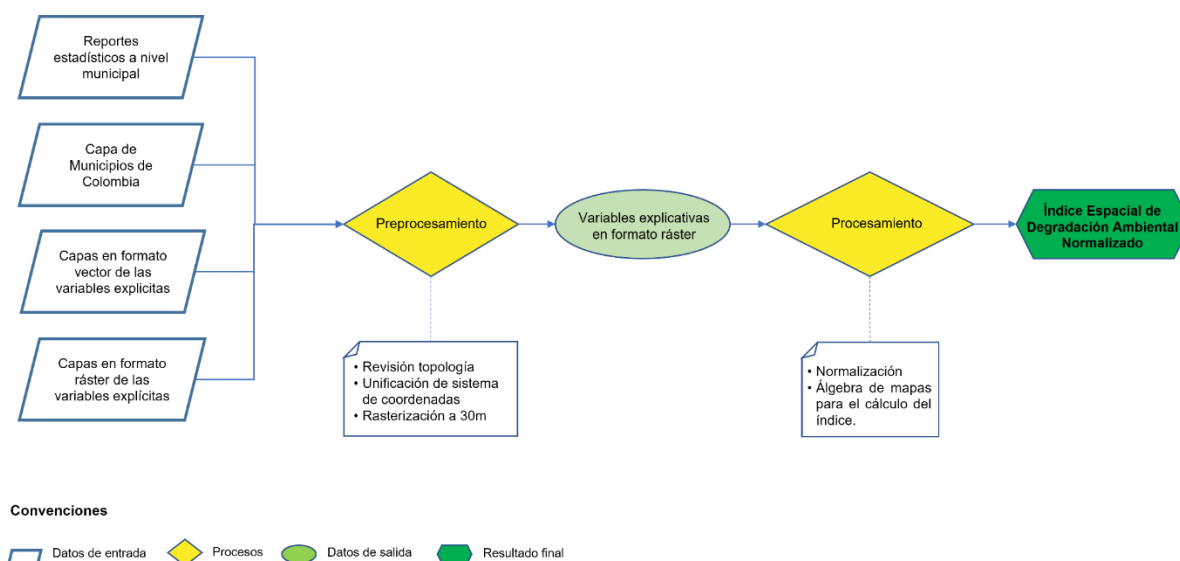
Tabla 3-2: Recursos geográficos identificados para estudiar la degradación ambiental en Colombia.

| | Nombre | Fuente | Formato |
|----|---|--------|----------|
| 1 | Cambio de Bosque 1990 - 2000 | IDEAM | Raster |
| 2 | Cambio de Bosque 2000 - 2005 | IDEAM | Raster |
| 3 | Cambio de Bosque 2005 - 2010 | IDEAM | Raster |
| 4 | Cambio de Bosque 2010 - 2012 | IDEAM | Raster |
| 5 | Cambio de Bosque 2012 - 2013 | IDEAM | Raster |
| 6 | Cambio de Bosque 2013 - 2014 | IDEAM | Raster |
| 7 | Cambio de Bosque 2014 - 2015 | IDEAM | Raster |
| 8 | Cambio de Bosque 2015 - 2016 | IDEAM | Raster |
| 9 | Cambio de Bosque 2016 - 2017 | IDEAM | Raster |
| 10 | Conjunto Inicial de Mpios. Primeros Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial - Municipios 170 PDET | DNP | Vector |
| 11 | Degradación de suelos por salinización de Colombia. Escala 100.000. Año 2016 - 2017 | IDEAM | Vector |
| 12 | Demanda hídrica ENA2014 | IDEAM | Vector |
| 13 | Densidad de biomasa aérea (Mg / ha). | MapX | Raster |
| 14 | Densidad poblacional | DANE | RepEst** |
| 15 | Estudio de los conflictos de uso del territorio Colombiano | IGAC | Vector |
| 16 | Grado de transformación de humedales de Colombia. Año 2015. Escala 1: 100.000. | IAVH | Vector |
| 17 | Huella hídrica azul anual multisectorial Ena 2014 | IDEAM | Vector |
| 18 | Huella hídrica verde sector agrícola Ena 2014 | IDEAM | Vector |
| 19 | Huella Humana | MapX | Raster |
| 20 | Índice de alteración Potencial de calidad de agua en condiciones hidrológicas de año medio. Sub - Zonas Hidrográficas - IACAL | IDEAM | Vector |
| 21 | Índice de Aridez. ENA 2014 | IDEAM | Raster |
| 22 | Índice de desempeño municipal | DANE | RepEst** |
| 23 | Índice de importancia económica | DNP | RepEst** |
| 24 | Índice de incidencia del conflicto armado | DANE | Vector |
| 25 | Índice de Pobreza Multidimensional | DANE | Vector |
| 26 | Lista Roja de Ecosistemas de Colombia - Evaluación Final del estado de los ecosistemas de Colombia: Aplicación de la metodología Lista Roja de Ecosistemas (UICN), año 2017, Escala 1:100.000 | IAVH | Vector |
| 27 | Número de especies amenazadas en las zonas hidrográficas de Colombia | IAVH | Vector |
| 28 | Subíndice de Amenaza por cambio climático TCNCC | IDEAM | Vector |
| 29 | Vertimiento de mercurio al suelo y al agua, por beneficio de oro y plata en 2016 | IDEAM | Vector |
| 30 | Zonas más Afectadas por el Conflicto Armado - ZOMAC | DAGov* | Vector |
| 31 | Zonificación de Degradación de suelos por erosión | IDEAM | Vector |

DaGov*: Datos abiertos gobierno nacional, RepEst**: Reporte Estadístico

El modelo cartográfico se plantea para tener una visión integral del pre y procesamiento necesario para obtener el índice. En este caso consta de tres fases: i) Recopilación y visualización de las capas de entrada que pueden estar en formato raster, vector o reporte estadístico a nivel municipal; ii) Preprocesamiento, donde se realizan las actividades de revisión topológica, unificación del sistema de coordenadas y unificación de formato raster con remuestreo a 30 metros; y iii) Procesamiento y la tercera de generación de resultados, en esta etapa se normalizan las variables y se calcula el índice mediante algebra de mapas (Figura 3-3).

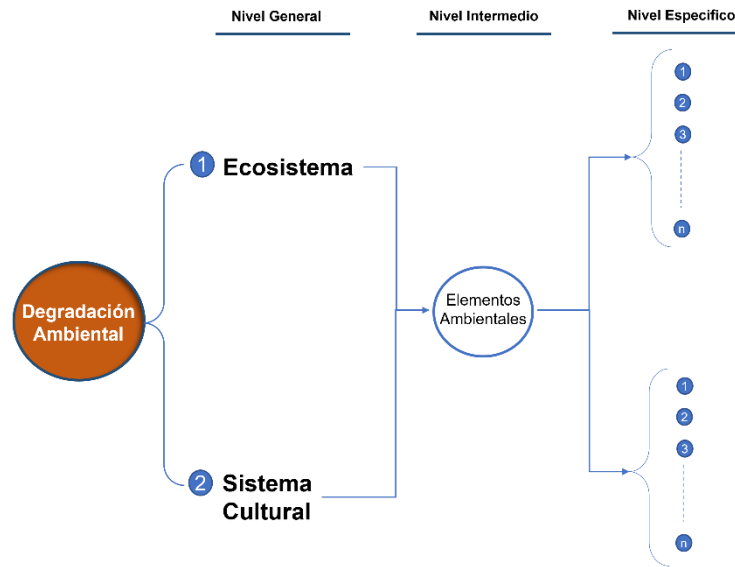
Figura 3-3: Modelo cartográfico.



Fuente: elaboración propia

Con base en estos modelos y siguiendo las recomendaciones para la diseño y presentación de índices de los autores Córdoba et al., (2020); Martínez et al., (2019) y Schuschny & Soto (2009), el IEDAN se plantea con una estructura de tres niveles (Figura 3-4): i) **nivel general** que representa DE y DC. En DE, se relaciona la degradación ambiental dada por transformaciones en los elementos ambientales como por ejemplo la degradación de suelos por erosión, mientras que en DC aquellas como la violencia entre otras; ii) **nivel intermedio** que representa los elementos del ambiente que pueden relacionarse con el fenómeno de la degradación y que podrían expresarse de alguna forma en variables espaciales, como el suelo, el bosque, la sociedad, el desarrollo tecnológico; y iii) **nivel específico** que relaciona las variables seleccionadas.

Figura 3-4: Estructura general del índice propuesto.



Fuente: elaboración propia

3.2.3 Fase 3: Cálculo del índice

El procedimiento para evaluar la degradación ambiental consiste en tres etapas: i) Pre – procesamiento de las variables seleccionadas; ii) Procesamiento y iii) Categorización departamental y municipal; utilizando según se requiera las herramientas del software ArcGIS10.8. En la etapa de **pre – procesamiento**, primero debido a que la información se encontraba en diferentes sistemas de coordenadas, todas las capas se transformaron al sistema de coordenadas WGS84 UTM Zona 18 Norte, como lo sugieren Galindo et al., (2014) con el fin de evitar problemas de co-registro. Segundo la información recopilada en reporte estadístico y en formato vector se convirtió a formato ráster y por último se remuestrearon todos los datos a 30 metros de tamaño de píxel, para lograr una escala de trabajo de 1:100.000.

En la etapa de **procesamiento** se realizaron cuatro actividades, primero *normalizaron* los datos para evitar problemas de escala y las unidades de medida distintas. La normalización se planteó aplicando el método de re – escalamiento, el cual de acuerdo con Schuschny & Soto (2009) considera el rango de valores que cada variable adquiere para transformar sus niveles de categorización a una escala estándar que en este caso se propuso de 0 a 100, donde 0 representa el menor valor de degradación ambiental y 100 el valor crítico. Segundo *se generó el ráster de degradación ambiental (RDA)* mediante la integración espacial de las variables normalizadas con el fin de conocer los valores máximo y mínimo que puede adquirir el fenómeno de acuerdo con el conjunto de datos seleccionado (Ver Ecuación (3.2).

$$RDA = \frac{\frac{\sum_{i=0}^n X_{ij}}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n Y_{ij}}{n}}{2} \quad (3.1)$$

Donde: X_{ij} : Variables ecosistémicas normalizadas; Y_{ij} : Variables del sistema cultural normalizadas; n : Cantidad de variables; 2 : Constante que representa las dimensiones relacionadas ecosistema DE y cultura DC.

Tercero se *calculó el índice* de modo que la degradación ambiental en un punto determinado es igual a la diferencia entre el valor resultante del RDA en ese punto y el valor mínimo del RDA, dividido por la diferencia entre el valor máximo y mínimo del RDA (Ver Ecuación (3.2))

$$IEDAN = \frac{\left(\frac{\sum_{i=0}^n X_{ij}}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n Y_{ij}}{n} \right) - \left(\frac{\sum_{i=0}^n X_{ij}}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n Y_{ij}}{n} \right)_{min}}{\left(\frac{\sum_{i=0}^n X_{ij}}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n Y_{ij}}{n} \right)_{max} - \left(\frac{\sum_{i=0}^n X_{ij}}{n} + \frac{\sum_{i=0}^n Y_{ij}}{n} \right)_{min}} \quad (3.2)$$

Donde: X_{ij} : Variables ecosistémicas normalizadas; Y_{ij} : Variables del sistema cultural normalizadas; min : Valor mínimo del RDA; max : Valor máximo del RDA; n : Cantidad de variables; 2 : Constante que representa las dimensiones relacionadas ecosistema DE y cultura DC.

Por último, se *categorizó el índice*, para ello se observaron las estadísticas y el comportamiento del histograma por los algoritmos de rupturas naturales, cuantiles y desviación estándar. Se propuso aplicar el algoritmo de “rupturas naturales” para establecer los rangos y generar un nuevo ráster reclasificado en cinco (5) clases propuestas: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Este algoritmo, según la distribución de los datos genera agrupaciones naturales inherentes éstos, establece las rupturas de clase donde los valores similares se agrupan mejor y define sus límites por la existencia de diferencias considerables entre los valores de los datos (ArcGIS-Pro2.9, 2022).

Finalmente, se planteó la etapa de **categorización departamental y municipal**, para poder generar reportes en hojas de cálculo a estos niveles. Este proceso consistió en ejecutar un análisis espacial para relacionar la capa de división político-administrativa del país con el índice categorizado, mediante la herramienta “histograma zonal” que realiza el recuento de cada valor único del índice contenido dentro de las entidades especificadas.

4. Aplicación del Índice espacial de degradación ambiental normalizado – IEDAN.

Al aplicar la perspectiva ambiental y la TGS para el planteamiento del IEDA fue posible visualizar la congruencia espacial de la degradación de elementos sociales y ecológicos que se presenta no solo en las regiones en las que se concentra la población colombiana y por otro lado considerar dimensiones de lo ambiental que actualmente quedan relegadas. Un factor importante para desarrollo del índice es conocer que tan sensible resulta para explicar la realidad del fenómeno en Colombia y observar su comportamiento con la base teórica planteada y los recursos geográficos oficiales existentes. Este capítulo se compone de dos secciones, la primera, presenta de manera estricta y secuencial los resultados de la aplicación del protocolo del IEDAN y la segunda la discusión de los resultados.

4.1 Aplicación del protocolo del IEDAN

Se utilizó el área continental de Colombia para aplicar la metodología propuesta. Colombia está localizada en la zona ecuatorial desde los 12°N a los 4°S y tiene un área aproximada de 1.150.000 km² (Hermelin, 2015) **Figura 4-1:** Ubicación general de Colombia. Figura 4-1. Se caracteriza por una alta variabilidad ambiental en relación con su tamaño geográfico, con ecosistemas que van desde desiertos y sabanas tropicales hasta selvas muy húmedas y montañas nevadas tropicales (A. Etter et al., 2011); es por esto que es uno de los dos países con mayor expresión de biodiversidad (Rangel, 2015). En general Colombia por muchos aspectos del territorio y de la gente, puede resumirse en una palabra, diversidad, expresada no sólo en su topografía, clima, vegetación y animales sino también desde el punto de vista económico y cultural.

Figura 4-1: Ubicación general de Colombia.

4.1.1 Fase 1: Selección y descripción de variables

Se aplicaron los tres criterios de selección establecidos, todas eran elegibles por accesibilidad, sin embargo, ocho capas se descartaron por el criterio de especificidad y tres por topología. De las 20 capas restantes, nueve se utilizaron para crear la capa de deforestación acumulada (2000 – 2017) por lo cual se trabajó en total con 12 variables (Tabla 4-1) siete relacionadas con DE y cinco con DC; todas se visualizaron con sus respectivos rangos en la Figura 4-2 . Su descripción general y evaluación del criterio de especificidad aplicado se presentan en la Tabla 4-2.

4.1.2 Fase 2: Diseño del modelo conceptual y cartográfico

Con las variables seleccionadas (Tabla 4-1) se encontraron seis elementos ambientales de los cuales se podría conocer su estado de degradación, cuatro relacionados con la dimensión ecosistémica: i) Bosque, ii) Clima, iii) Fuentes hídricas y iv) Suelo; y dos con la dimensión del sistema cultural: i) Sociedad y ii) Desarrollo. Con este conjunto de datos se diseñaron el modelo conceptual (Figura 4-3) y el modelo cartográfico (Figura 4-4) y se estableció la estructura del índice (Figura 4-5).

Tabla 4-1: Variables seleccionadas para el mapeo de la degradación ambiental en Colombia.

| Variable | Nombre de la capa | Escala | Fuente |
|-----------------|---|---------------|---------------|
| 1 | Deforestación acumulada (2000 - 2017) | 100.000 | IDEAM |
| 2 | Densidad de población 2018 | Municipal | DANE |
| 3 | Desempeño municipal | Municipal | DANE |
| 4 | Grado de transformación de humedales. 2015 | 100.000 | IAVH |
| 5 | Huella hídrica azul multisectorial | 100.000 | IDEAM |
| 6 | Índice de alteración Potencial de calidad de agua en condiciones hidrológicas de año medio. Sub - Zonas Hidrográficas – IACAL | 100.000 | IDEAM |
| 7 | Índice de Aridez, Estudio Nacional del Agua 2014, Colombia. IDEAM 2015. | 100.000 | IDEAM |
| 8 | Índice de importancia económica | Municipal | DNP |
| 9 | Índice de incidencia del conflicto armado | Municipal | DANE |
| 10 | Índice de pobreza multidimensional | Municipal | DANE |
| 11 | Zonificación de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Línea base 2010 - 2011 | 100.000 | IDEAM |
| 12 | Zonificación de la degradación de suelos por salinización en Colombia. Año 2016 - 2017. | 100.000 | IDEAM |

Tabla 4-2: Descripción general de las variables seleccionadas y criterio de especificidad aplicado.

| Variable | Descripción general | Evaluación del criterio de especificidad |
|---|--|---|
| 1 Deforestación acumulada (2000 - 2017) | Representa el área de deforestación acumulada para todo el país en el periodo 2000 - 2017 | Se asume como variable explicativa del proceso de degradación del bosque al relacionarse con la reducción del tamaño de áreas boscosas del país. |
| 2 Densidad de población 2018 | Cantidad de habitantes por kilómetro cuadrado | Se asume como variable explicativa del proceso de degradación en general porque da cuenta de los lugares en los que existe mayor demanda de capital natural y por ende mayor transformaciones en los SES según la densidad poblacional que se presente. |
| 3 Desempeño municipal | Tiene como objetivo medir el desempeño de las entidades territoriales entendido como: la capacidad de gestión y de generación de resultados de desarrollo, teniendo en cuenta las condiciones iniciales de los municipios, como instrumento para el fortalecimiento de las capacidades territoriales, y la inversión orientada a resultados. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento desarrollo, en tanto que se priva a determinados municipios para acceder a recursos que mejoren su capacidad de gestión. |
| 4 Grado de transformación de humedales. 2015 | Estudio que busca comprender la transformación de los humedales del país y los factores relacionados. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento humedales y puede relacionarse con la disminución progresiva de este ecosistema. |
| 5 Huella hídrica azul multisectorial | Representa el agua extraída de cuerpos de agua superficial y subterráneos, que es empleada en las actividades productivas y que no regresa a la cuenca. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento agua y puede relacionarse con la disminución progresiva del agua en determinada cuenca. |
| 6 Índice de alteración Potencial de calidad de agua en condiciones hidrológicas de año medio. Sub - Zonas Hidrográficas – IACAL | Representa la presión por contaminación sobre los sistemas hídricos y cuerpos de agua del país, en las 316 subzonas hidrográficas; se analiza a partir de la estimación de cargas contaminantes puntuales vertidas por los sectores industrial, doméstico, sacrificio de ganado y beneficio del café. | Se asume como variable explicativa de la degradación del agua. |
| 7 Índice de Aridez, Estudio Nacional del Agua 2014, Colombia. IDEAM 2015. | Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial. | Se asume como variable explicativa de la degradación del clima, dado que la aridez implica un déficit pluviométrico ligado a otras condiciones climáticas específicas, como temperaturas elevadas, baja humedad de aire y fuerte evaporación. |
| 8 Índice de importancia económica | Es una herramienta que permite identificar la jerarquía de cada uno de los municipios dentro de su departamento. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento desarrollo, en tanto que se priva a determinados municipios de un crecimiento económico digno. |
| 9 Índice de incidencia del conflicto armado | Permite caracterizar a los municipios de Colombia según su afectación por conflicto. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento sociedad, en tanto que se priva a ésta de una vida digna. |
| 10 Índice de pobreza multidimensional | Presenta información sobre diferentes dimensiones y variables del bienestar de los hogares colombiano. | Se asume como variable explicativa de la degradación del elemento sociedad, en tanto que se priva a ésta de una vida digna. |
| 11 Zonificación de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Línea base 2010 - 2011 | Comprende la información espacial referente al estado de la degradación de los suelos por erosión en el área continental e insular de Colombia. | Se asume como variable explicativa de la degradación del suelo por erosión. |
| 12 Zonificación de la degradación de suelos por salinización en Colombia. Año 2016 - 2017. | Comprende la información espacial referente al estado de la degradación de los suelos por salinización en el área continental e insular de Colombia. | Se asume como variable explicativa de la degradación del suelo por salinización. |

Figura 4-2: Visualización de las variables seleccionadas con sus rangos de medida.

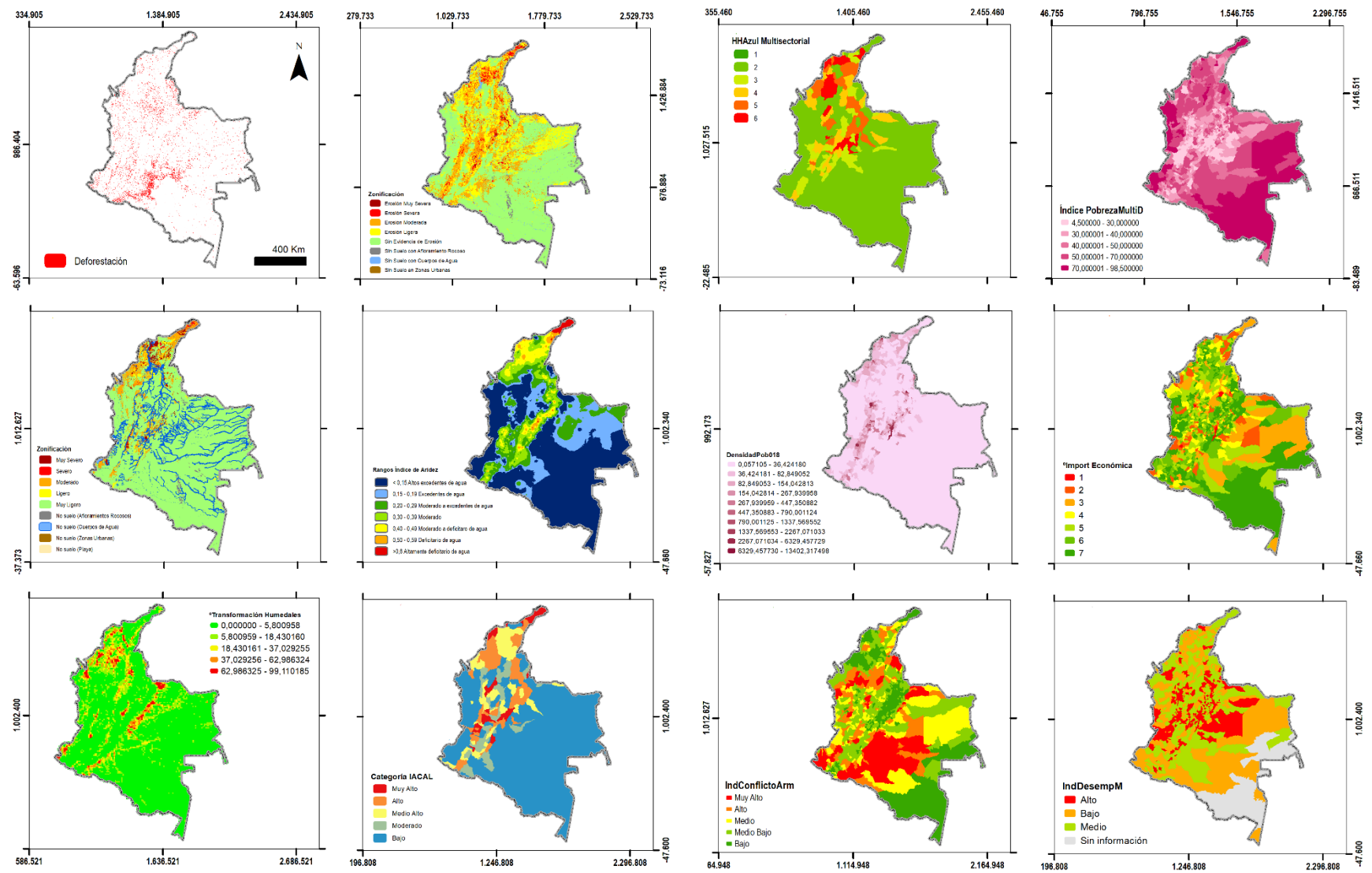
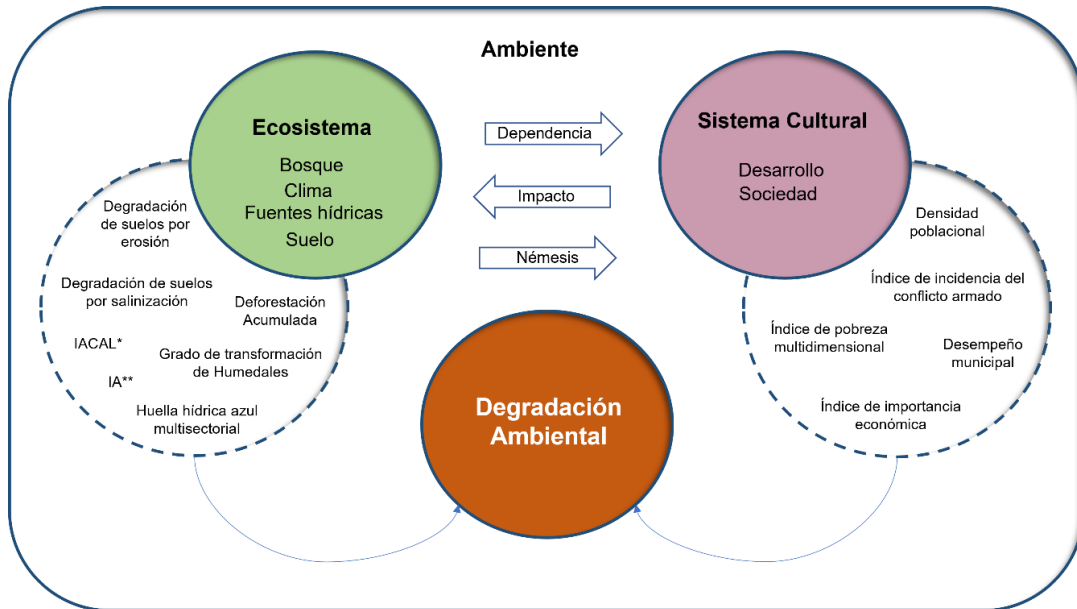


Figura 4-3: Modelo conceptual.



IACAL*: Índice de alteración potencial del agua. / IA**: Índice de aridez.

Elaboración propia, fuente: (Ángel Maya, 2013)

Figura 4-4: Modelo cartográfico.

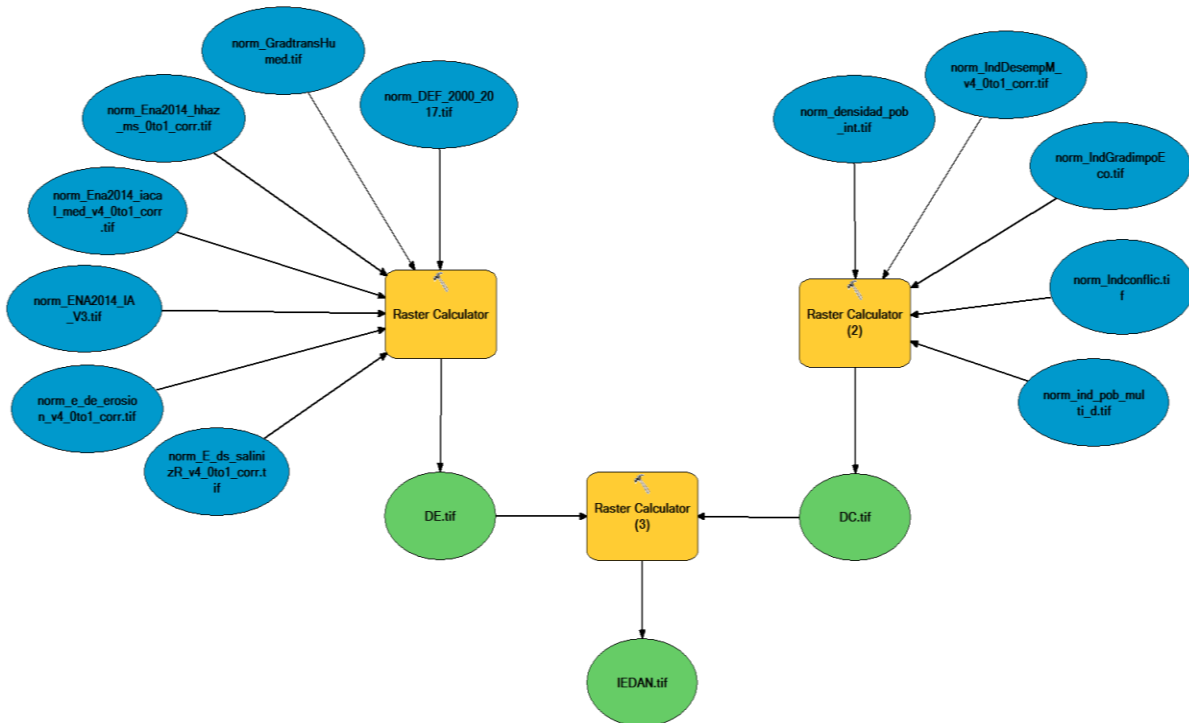
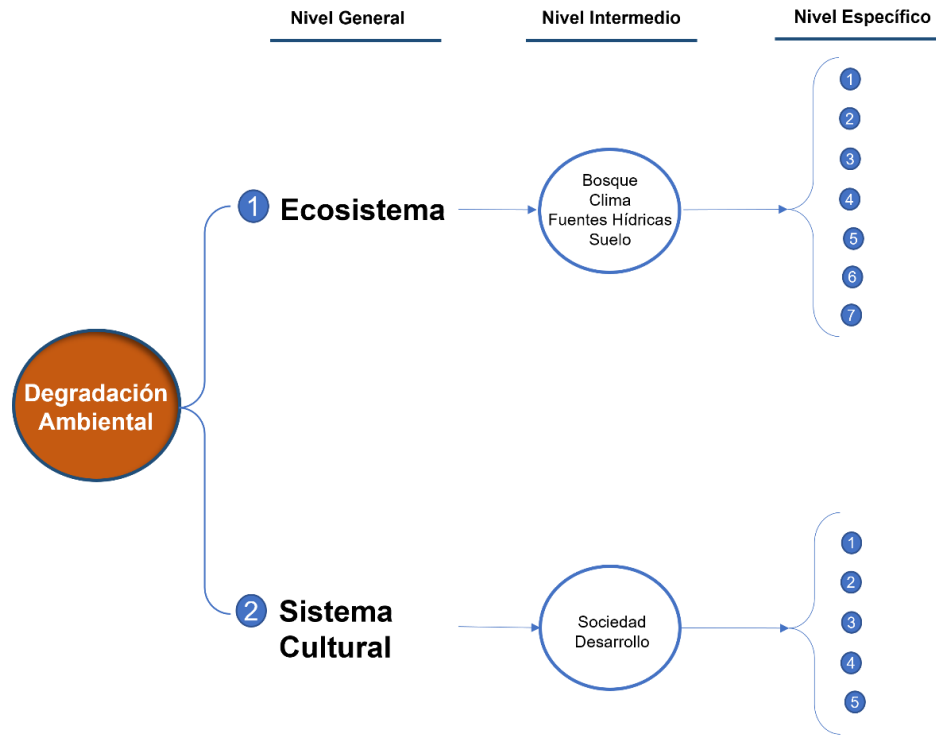


Figura 4-5: Estructura del IEDAN.



4.1.3 Fase 3: Cálculo del Índice

Se aplicaron las tres etapas propuestas, en la primera el **pre – procesamiento**, primero, la información que se encontró en reporte estadístico (densidad de población, desempeño municipal e índice de importancia económica) se convirtió a formato vector, segundo a todas las capas se les asignó el sistema de coordenadas WGS84 UTM Zona 18 Norte, tercero las capas en formato vector (Grado de transformación de humedales, Huella hídrica azul multisectorial, IACAL, Índice de incidencia del conflicto armado, Índice de pobreza multidimensional, Zonificación de la degradación de suelos por erosión en Colombia y Zonificación de la degradación de suelos por salinización en Colombia) se convirtieron a formato ráster y por último todas las variables se remuestrearon a 30 metros de tamaño de píxel.

En la segunda etapa, el **procesamiento** se realizaron cuatro actividades, primero la normalización de cada capa de 0 a 100 según la información de cada capa siendo 100 el valor crítico para degradación ambiental como se muestra en la Figura 4-6. Segundo se generó el RDA (Figura 4-7), sus estadísticas muestran que 107, 833 y 86.37 son los valores de mínimo, máximo y desviación estándar respectivamente.

Figura 4-6: Visualización variables seleccionadas normalizadas.

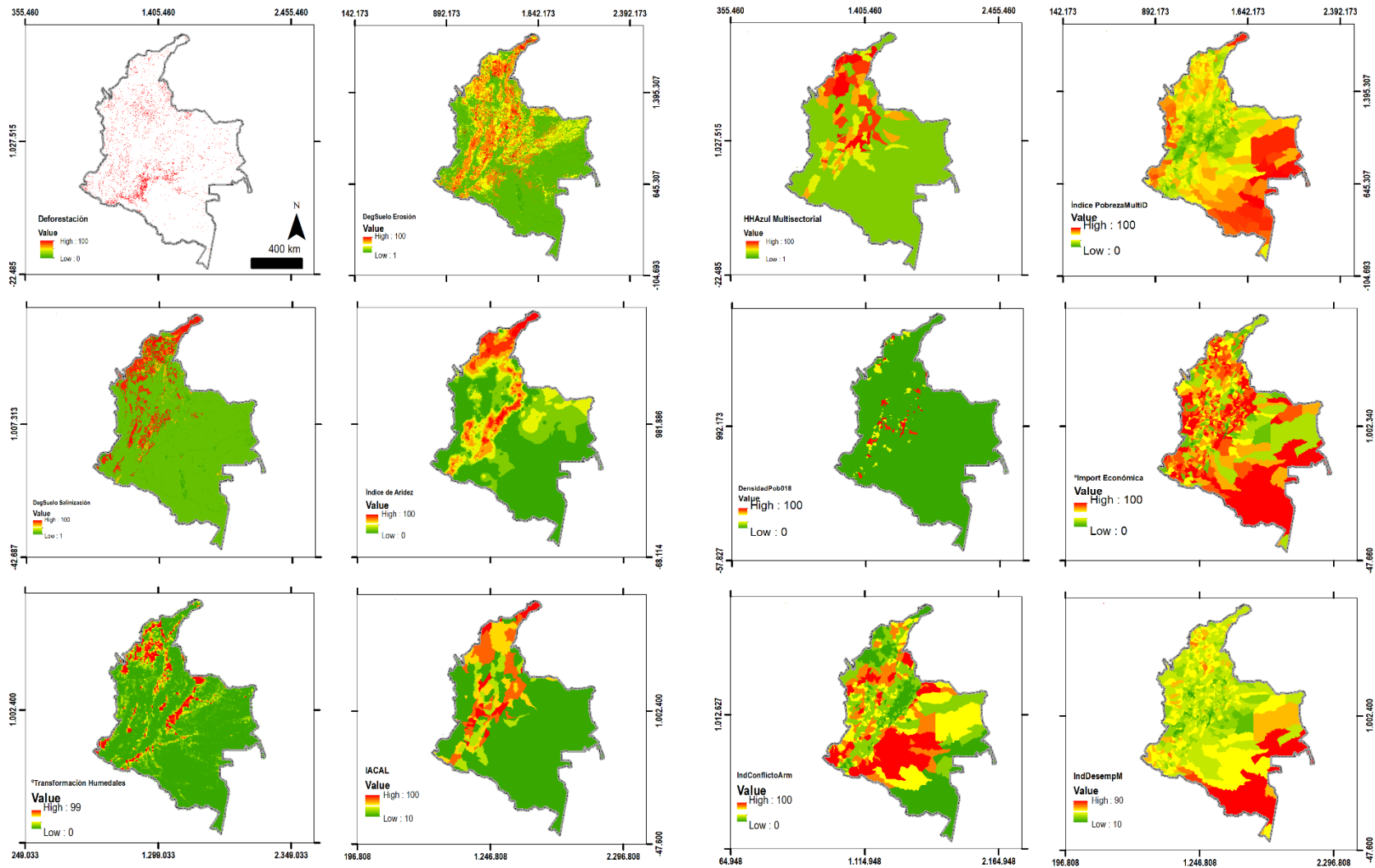


Figura 4-7: Ráster de degradación ambiental – RDA.

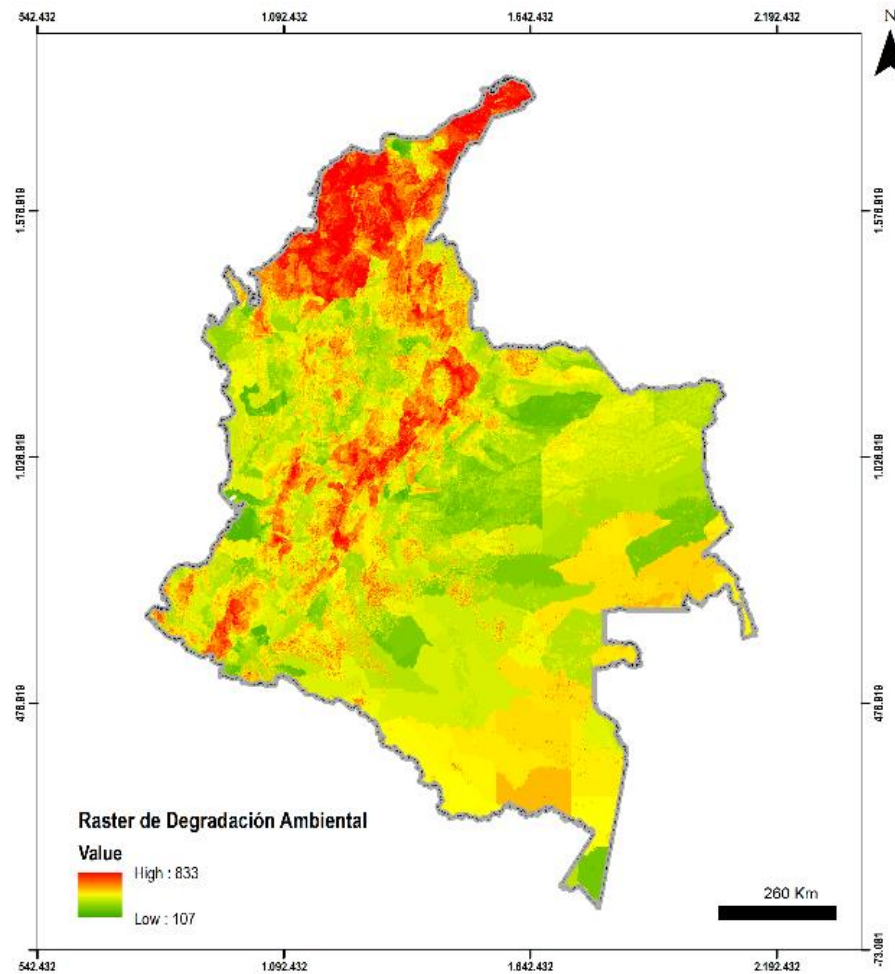
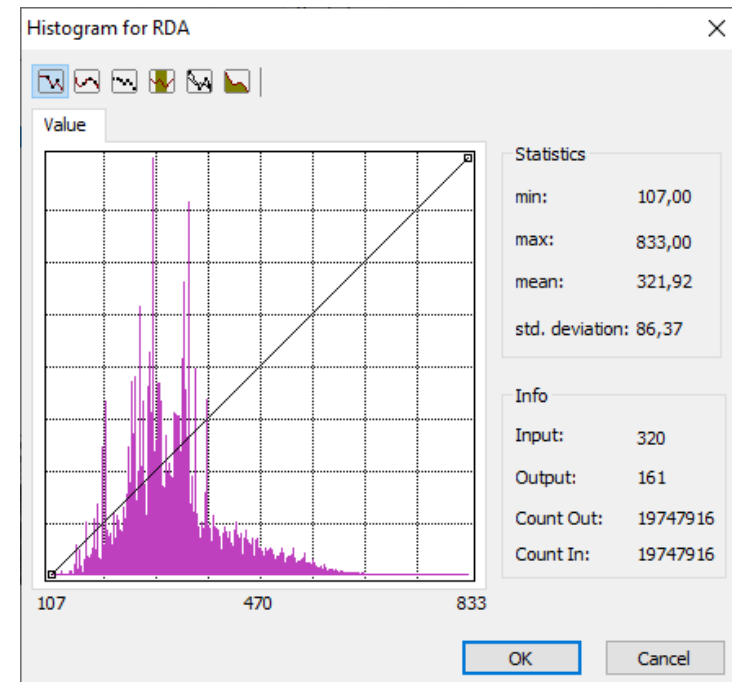


Figura 4-8: Histograma del RDA.



Adicionalmente de acuerdo con el histograma (Figura 4-8) el conjunto de datos tiene comportamiento unimodal cercano a una distribución leptocúrtica, con una concentración hacia los valores bajos de degradación ambiental por lo cual presentaron una asimetría positiva. Este comportamiento puede darse porque de las 12 variables le seccionadas, las siete ecosistémicas se caracterizaron porque en la mayor área del territorio colombiano tiene valores de degradación ambiental que van de bajo a muy bajo.

En cuanto a la tercera actividad, se aplicó la (3.2) y se calculó el IEDAN (Figura 4-9), el cual puede tener valores entre 0.10 y 0.795 y mantiene el comportamiento de los datos explicado para el RDA. Por último, se procede a la cuarta actividad la categorización del índice (Figura 4-10), aplicando el algoritmo sugerido en el capítulo 3 “rupturas naturales” en 5 rangos de clasificación.

Figura 4-9: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN.

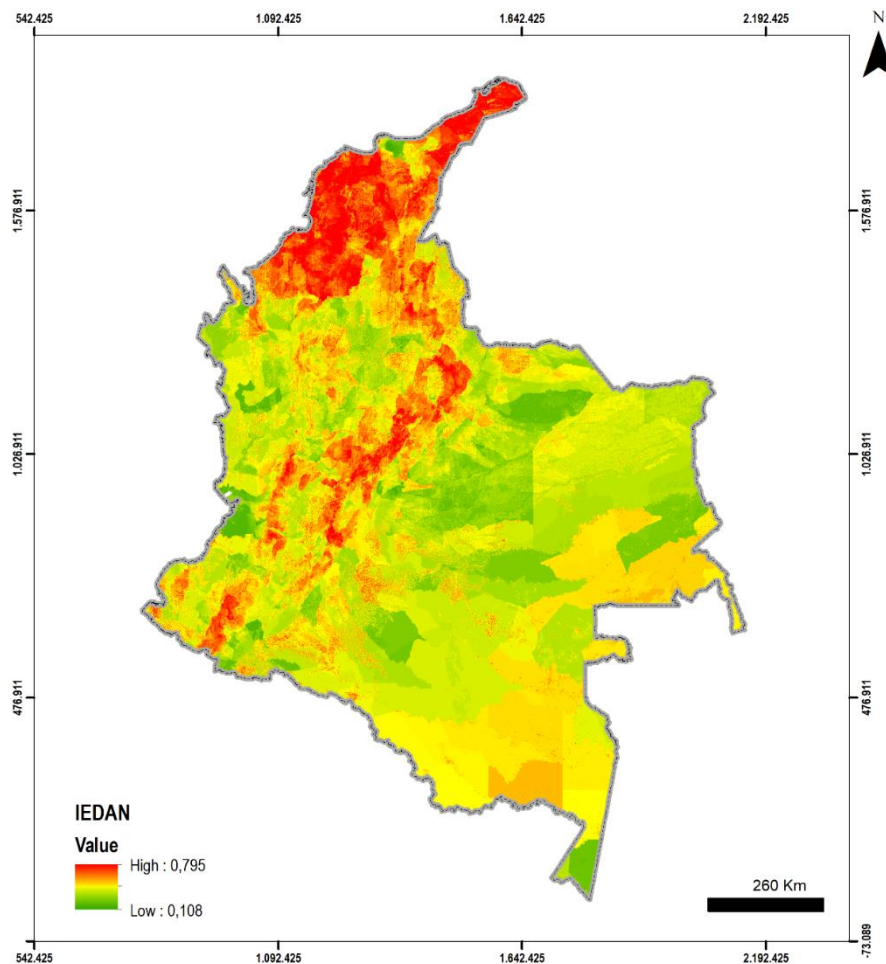
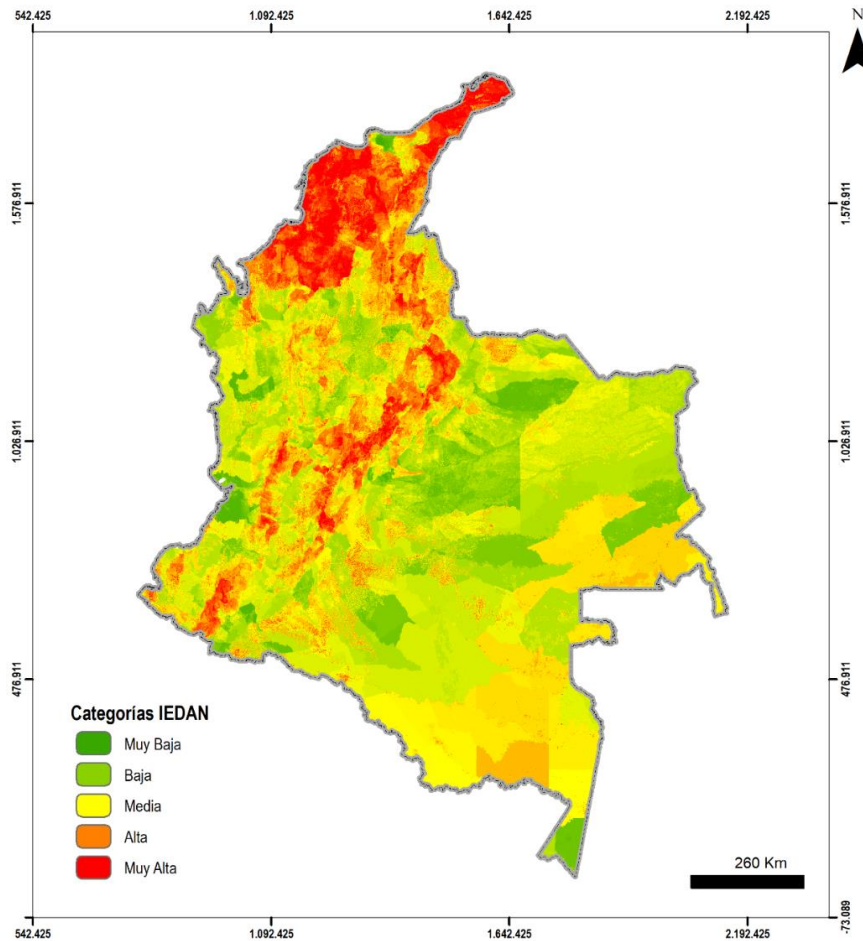


Figura 4-10: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN categorizado.

Finalmente, en la tercera etapa, **categorización departamental y municipal**, se realizó un análisis espacial por medio de la herramienta “histograma zonal” para generar los reportes a nivel departamental (Figura 4-11) y municipal Figura 4-12. Estos resultados permitieron visualizar una primera prueba del comportamiento del IEDAN en todo el territorio nacional y queda pendiente para futuros procesos de investigación el cálculo de la confiabilidad del modelo para identificar que tan ajustado resulta el IEDAN en escalas departamental y municipal.

Sin embargo, en este ejercicio de aplicación del IEDAN, se identificaron tres núcleos en los que se concentran valores altos y muy altos de degradación ambiental en el país: i) el primero asociado a la región caribe; ii) el segundo presente en algunos sectores de los departamentos de Cundinamarca, Tolima, Quindío, Huila, Boyacá, Santander y Norte de Santander; y iii) el tercero asociado a los departamentos de Valle del Cauca, Cauca y Nariño. Los tres núcleos se caracterizaron por presentar

valores que van de medios a muy altos en seis variables: degradación de los suelos por erosión, degradación de los suelos por salinización, índice de aridez, índice de calidad de agua, huella hídrica multisectorial, deforestación acumulada e índice de grado de importancia económica. Adicionalmente en el primer y tercer núcleo aparecen valores críticos de las variables índice de pobreza multidimensional e índice de incidencia del conflicto armado respectivamente.

Por otra parte, un resultado interesante del IEDAN fueron valores medios en las regiones del Pacífico, Orinoquía y Amazonía, en donde la dimensión del sistema cultural presenta valores críticos. En este sentido, está claro que cada recurso geográfico contiene información de variables específicas del elemento que estudia, pero si se tienen capas individuales el análisis se restringe a lo que determinada capa espacial proporciona, más no a un abordaje más amplio en la comprensión de los fenómenos emergentes de las dinámicas propias de los sistemas sociales y ecológicos asociadas en este caso a la degradación ambiental. Por lo tanto, el aporte del índice se orientó a identificar aquellas áreas del país en las que confluyen o existe congruencia espacial de diferentes tipos de degradación ambiental que al abordarlas integralmente evidencian la superación de límites en más de un elemento ambiental.

4.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos al aplicar el IEDAN evidencian dos aspectos clave a considerar: el primero que, es posible adaptar el enfoque teórico y metodológico de la TGS y la perspectiva ambiental en procesos de análisis espacial para mostrar cómo la dimensión cultural es pertinente en el cambio de visión respecto a la degradación ambiental del país. El segundo que, integrar espacialmente variables de los sistemas sociales y ecológicos relacionadas con la degradación ambiental, permite identificar regiones en las cuales urge gestionar tanto la dimensión ecosistémica como la cultural para fortalecer la sustentabilidad territorial.

4.2.1 Enfoque teórico y metodológico en el desarrollo del IEDAN.

El planteamiento teórico y metodológico partió de reconocer que el análisis de la degradación ambiental debe hacerse en un sentido menos reduccionista y pudo adaptarse en el desarrollo del IEDAN. El ejercicio de aplicación señala la necesidad que tiene el país de reconocer a la sociedad como parte de la naturaleza y por ende la importancia de estudiar lo ambiental integrando la dimensión ecosistémica y la dimensión cultural, no solo para generar estadísticas municipales sino para tener herramientas de planificación espacial y gestión del territorio.

Figura 4-11: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN por departamentos

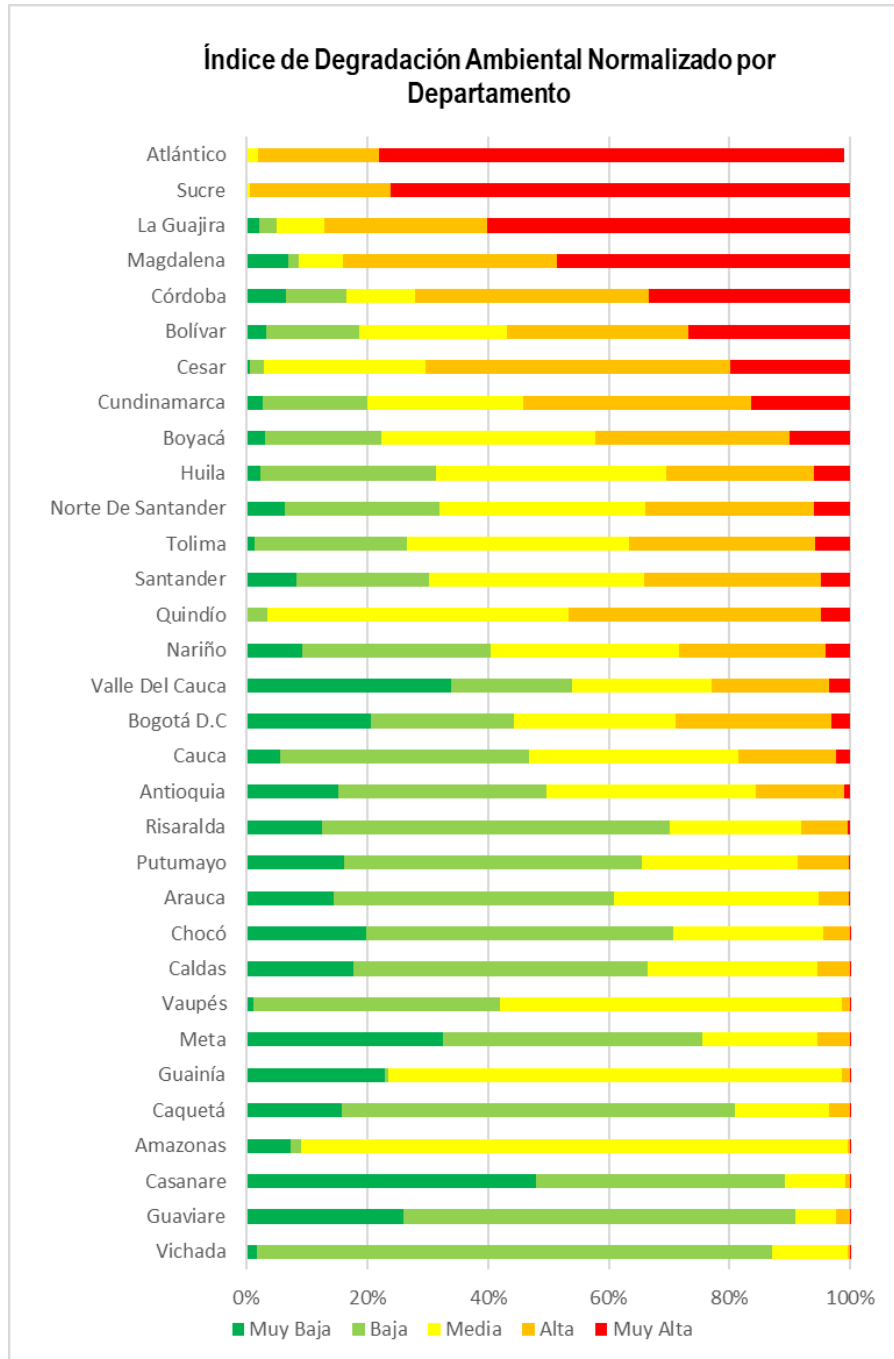
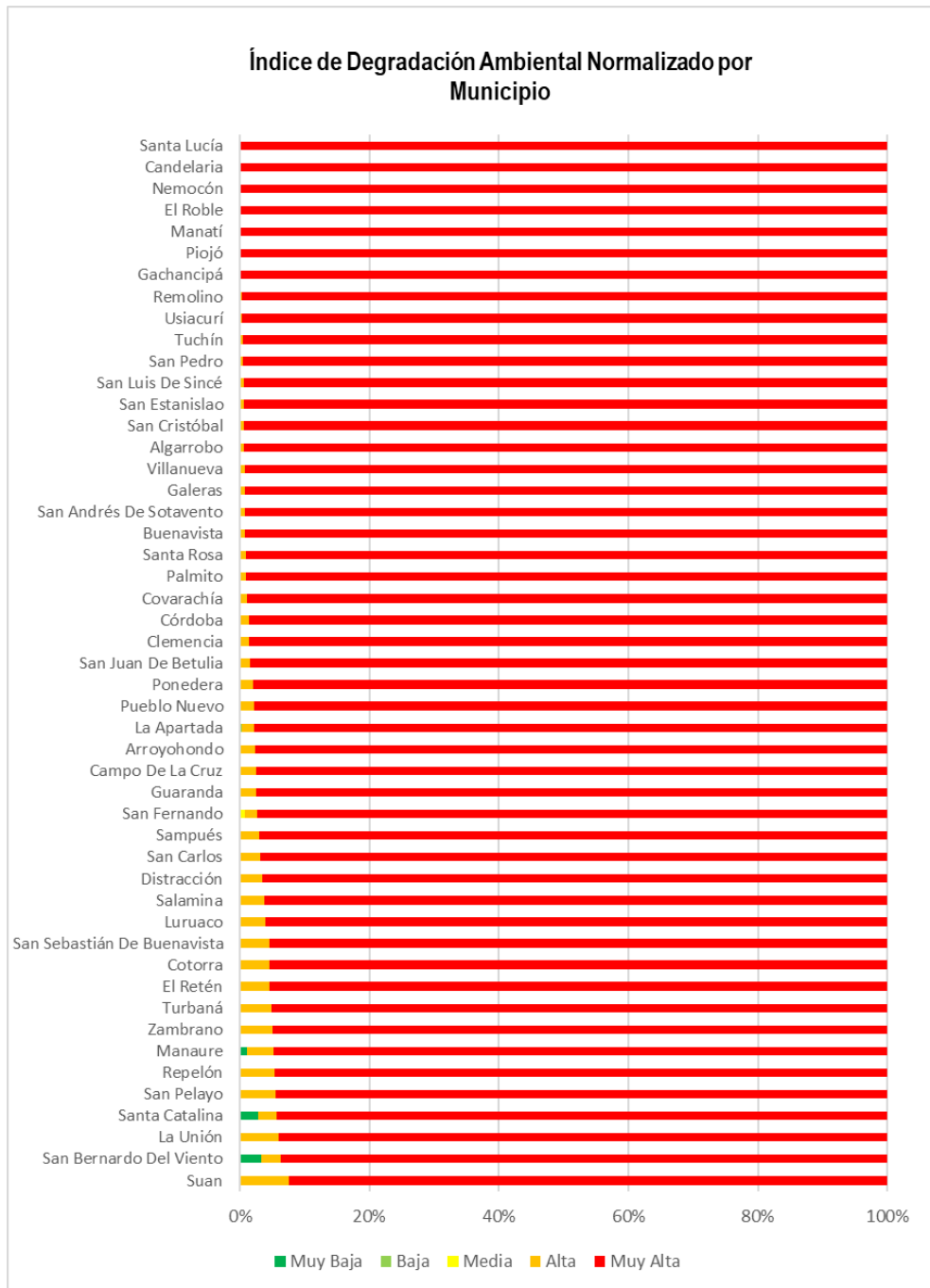


Figura 4-12: Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado – IEDAN para los 50 municipios con mayor degradación.



Al diseñar una herramienta espacial de tipo índice bajo los fundamentos teóricos propuestos para el estudio de la degradación ambiental, se buscó confirmar y aplicar de acuerdo con Schoon & Van Der Leeuw (2015) tres características diferenciadoras, i) integrar completamente los sistemas sociales y ecológicos, ii) tener una visión holística y un abordaje transdisciplinario del fenómeno; y iii) debatir que la comprensión de los sistemas sociales y ecológicos no debe basarse puramente en el equilibrio. Esto para mostrar como lo señala Carrizosa (2005) que Colombia tiene diferencias espaciales específicas que determinan desequilibrios territoriales.

Actualmente, pese a que en el país para 1982 ya se vislumbraban las preocupaciones por la degradación ambiental haciendo énfasis en que no se podía tratar al ser humano por separado del entorno en el que se movía su existencia Marino et al (1983), el gobierno nacional no ha logrado integrar de manera eficiente el componente de sustentabilidad a las políticas sectoriales y a las estrategias de crecimiento económico (Departamento Nacional de Planeación - DNP.b, 2018). De hecho, desde su plan nacional de desarrollo y fundamentos teóricos habla de la “sostenibilidad” y de consolidar acciones que permitan un “equilibrio” entre la conservación y la producción, pero promueve programas desarticulados donde las dimensiones ecosistema y cultura no se tratan integralmente y busca que la riqueza natural del país sea apropiada como un activo estratégico de la Nación y por tanto se agudizan los diferentes tipos de degradación ambiental en el territorio.

El resultado obtenido muestra que al ser un país en el que conviven diferentes culturas con valores específicos en términos de condiciones de vida, conservación y crecimiento económico existe la necesidad de mapear una dimensión de lo ambiental que actualmente es compleja de integrar y por lo general no se considera o gestiona espacialmente y en términos de degradación incidiría en el estado de la dimensión ecosistémica pues de alguna manera la hace vulnerable el tener áreas del país en donde prima el “hambre”, la violencia y el extractivismo.

Por otra parte, se identificó que en el país debido al abordaje que se le ha dado a lo ambiental, encontrar información de degradación de elementos ambientales en la dimensión ecosistémica resulta más sencillo que en la dimensión cultural. Pues la complejidad de mapear el paradigma tecnológico, las relaciones sociales y la red simbólica, dificulta la consecución de variables explicativas de su degradación.

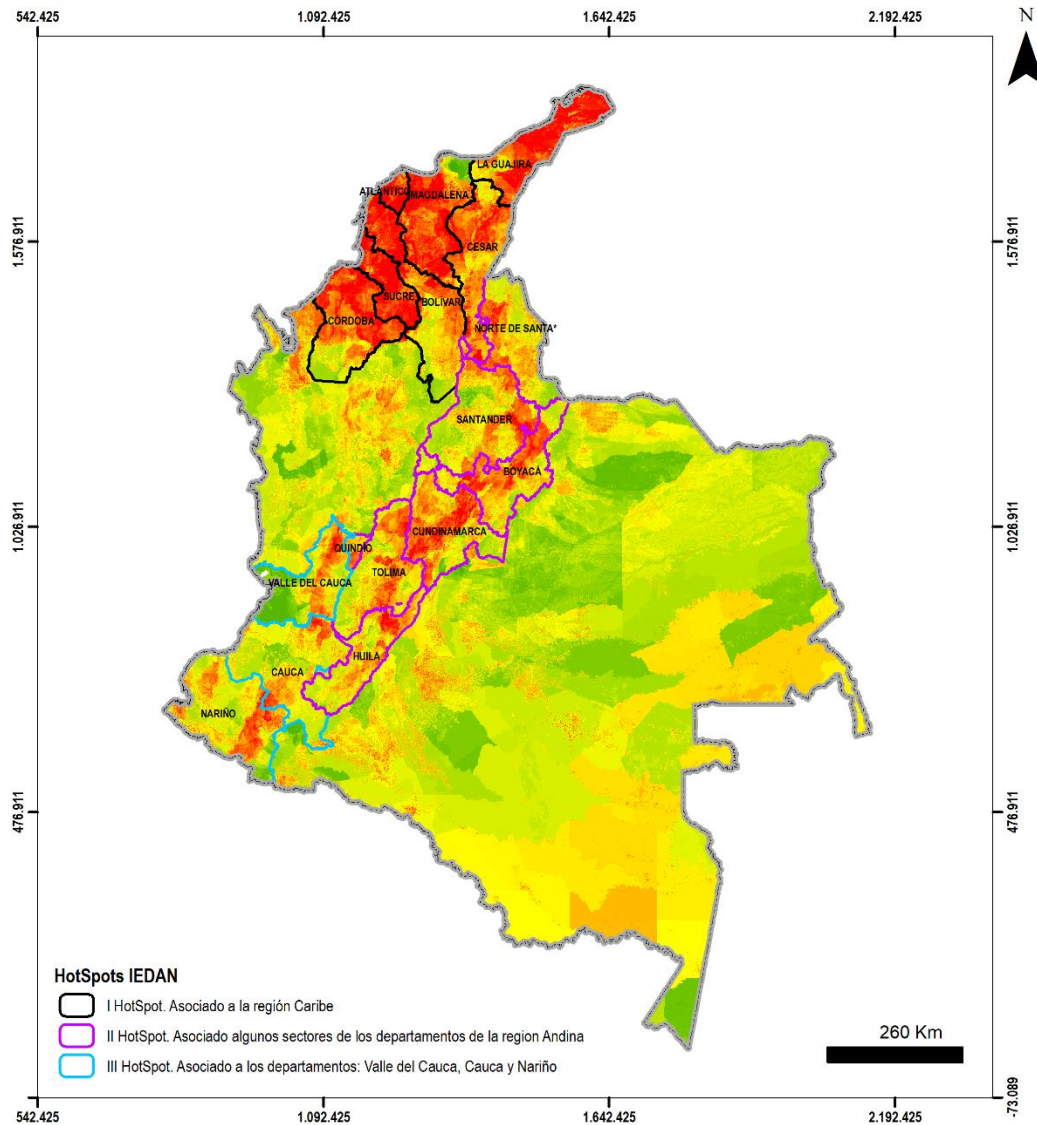
4.2.2 Comportamiento del IEDAN y sus implicaciones

El índice resultado con las variables seleccionadas en general tuvo un comportamiento esperado con tendencia hacia los valores bajos pues aproximadamente el 50% del área continental está cubierto por bosques y este elemento, a la fecha no cuenta con un estudio de degradación específico. Cabe resaltar que pese a que se identificaron 31 recursos geográficos en algunos casos las capas no contenían el muestreo para todo el país, o se encontraba a nivel departamental o municipal parcial. Esto confirma la existencia de vacíos de información espacial y el desafío de encontrar variables o iniciar el levantamiento de información espacial a nivel nacional para lograr que el estudio de la degradación ambiental se ajuste en lo posible a la realidad del país.

A pesar de que no se buscaba significancia estadística, con la aplicación del IEDAN se identificaron tres zonas en las que se concentran valores altos y muy altos de degradación ambiental en los cuales se presentó congruencia espacial de diferentes tipos de degradación y se generaron puntos calientes “Hotspots” (Figura 4-13) que podrían estar relacionados con procesos de pérdida de ecosistemas, o desplazamiento y migración de especies.

Con los resultados obtenidos se infiere que Colombia ha centrado su desarrollo en las regiones Andinas y Caribe y por tanto son las áreas con mayor afectación, lo cual coincide con estudios realizados anteriormente (Moreno et al., 2019; Andrade et al., 2018; Andrade & Castro, 2012). Sin embargo, con las variables existentes se visualizan áreas en estados de afectación no tan crítico como revelan otros estudios Correa A et al (2020) como por ejemplo en los departamentos de Antioquia, Caldas y Risaralda. Esto se da por la incidencia que tiene la dimensión cultural en estas regiones donde la plataforma tecnológica, las relaciones sociales y económicas y el mundo simbólico visto desde el desarrollo de la ciencia, se han trabajado de manera prioritaria para lograr mayores avances que en regiones de la periferia del país.

Figura 4-13: Visualización Hotspots del IEDAN.



Con el IEDAN se busca hacer énfasis en que se requiere representar diferentes tipos de degradación ambiental; por ejemplo, se evidencian los aportes de variables como la deforestación y el IACAL, para promover un cambio de mirada. Esto debido a que aquí, resultan regiones con menor densidad de deforestación y valores de (IEDAN) de medios a muy altos, en donde seguramente las acciones de deforestación tendrían un mayor impacto negativo y se hace necesario plantear alternativas de soluciones a corto plazo. Algunas de estas regiones se localizan en las estribaciones de la Serranía del Perijá y la SNSM (Región Caribe), el Bajo Cauca, el suroccidente y el oriente antioqueño, y las estribaciones de la Serranía de San Lucas (Bolívar) y el Magdalena Medio (Santander).

El IEDAN, como herramienta de soporte en la toma de decisiones, ayudaría a direccionar acciones contra la deforestación que no solo atiendan a este fenómeno si no que aborden el conjunto de variables explicativas de la degradación ambiental tanto donde se concentra la mayor cantidad de área deforestada (núcleos de deforestación) como en aquellos tipos de bosques que se localizan en territorios con un IEDAN medio a alto como son los bosques secos del Caribe, los bosques húmedos y subhúmedos del Magdalena Medio y los bosques húmedos tropicales y montanos del departamento de Antioquia.

Para Colombia se han realizado cuatro estudios específicos de degradación ambiental: i) Zonificación de la degradación de suelos por erosión (Manuel et al., 2015), ii) Zonificación de la degradación de suelos por salinización (IDEAM, 2019), iii) Valoración económica de la degradación ambiental (Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2018b) y iv) Estimación de la degradación de bosques de Colombia a través de un análisis de fragmentación (Ramírez D et al., 2018). Los dos primeros fueron capas incluidas en el desarrollo del IEDAN por parte del elemento “suelo”. El tercero es un estudio que centró su investigación en los efectos sobre la salud humana de tres componentes ambientales, al comparar sus resultados con el IEDAN se evidencian similitudes en las áreas de valores críticos de degradación (Figura 4 – 9). Finalmente, el cuarto estudio relacionado con la degradación del elemento bosque, aunque importante no se pudo incluir porque aún los datos están a una escala muy gruesa (por regiones naturales).

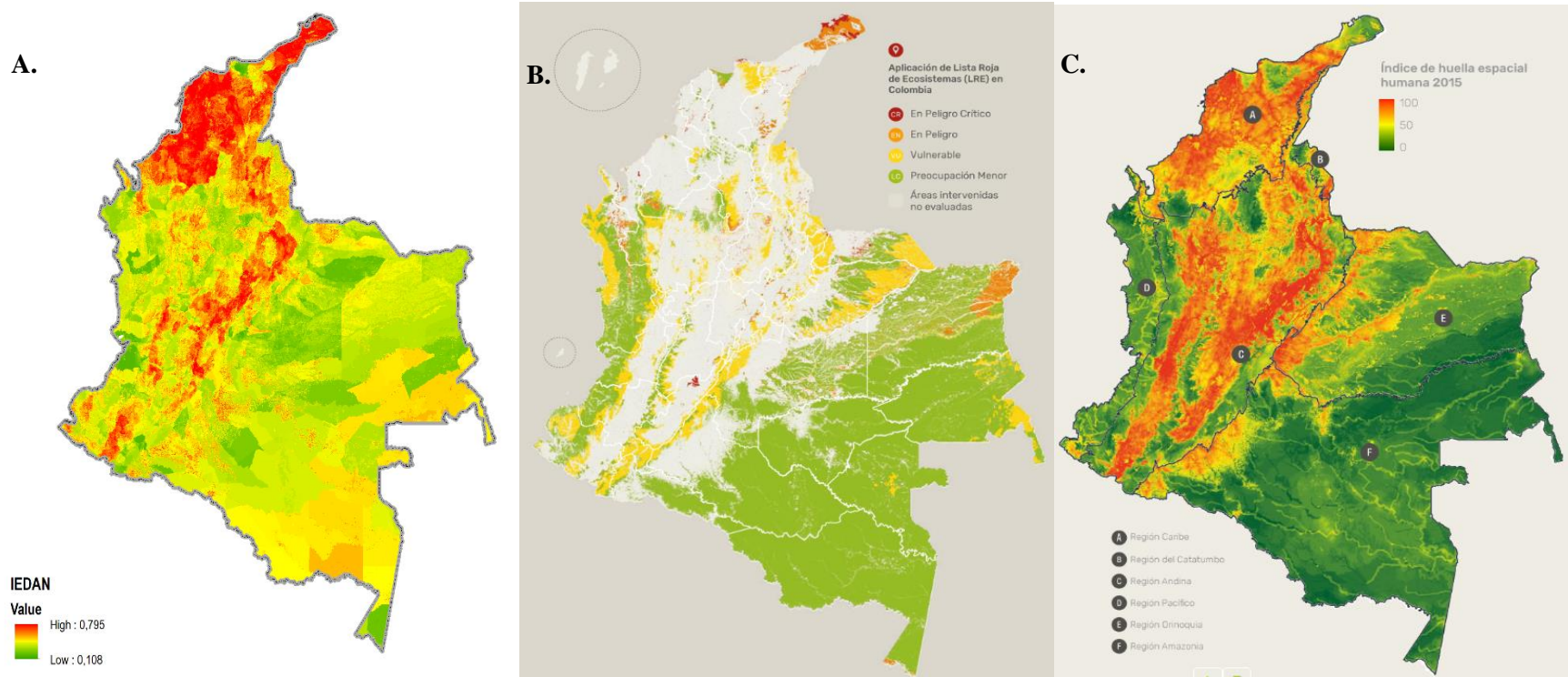
En cuanto a la comparación con capas espaciales como índices de huella humana Correa A et al (2020) y lista roja de ecosistema Etter et al (2017) (Figura 4-14) se observan aspectos similares en la región andina y caribe, pero en las regiones restantes, Amazonas, Orinoquía y pacífica, el IEDAN empieza a señalar áreas con niveles de degradación que van de baja a media, debido principalmente a la integración de variables espaciales que representan algunas dimensiones del sistema cultural. Para el IEDAN son áreas en las que el sistema cultural tiene valores críticos por tener mayor incidencia del conflicto armado, municipios con valores bajos de importancia económica, con menor o sin desempeño municipal y altos valores de incidencia de pobreza multidimensional.

El IEDAN resalta la necesidad de: primero asumir el compromiso de reducir la degradación ambiental Naciones Unidas (n.d.) como resultado de la COP26 pues no se debe esperar a que el país enfrente situaciones de cambios irreversibles que profundicen la crisis ambiental y segundo, como lo expone el Papa Francisco (2015), generar estrategias que detengan eficazmente la degradación ambiental y se aliente a una cultura del cuidado que impregne a toda la sociedad en este caso

colombiana; pues como se observó en los mapas expuestos previamente, la degradación ambiental del país actualmente pone en peligro zonas con mayor asentamientos de población y la estabilidad de la dimensión ecosistémica en áreas periféricas del país.

En este sentido es importante continuar con el desarrollo metodológico pues es una primera aproximación en la que deben revisarse temas de escala, automatización de procesos y procesamiento digital para poder llegar a proponer el IEDAN como un sistema de monitoreo a nivel nacional. Inclusive es importante trabajar en la incorporación de más variables explicativas con el objetivo de identificar e integrar el comportamiento de la sociedad desde lo simbólico relacionando la ética y los valores para comprender de alguna forma la manera la visión del fenómeno de degradación ambiental y sus implicaciones hacia una sociedad colombiana más sustentable.

Figura 4-14: Visualización IEDAN y otros estudios relacionados con deterioro ambiental. B: Estado de los Ecosistemas Colombianos (Etter et al., 2017) y C: Spatiotemporal Evaluation of The Human Footprint in Colombia: Four Decades of Anthropogenic Impact in Highly Biodiverse Ecosystems (Correa A et al., 2020).



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este trabajo se logró adaptar el enfoque teórico y metodológico de la TGS y la perspectiva ambiental, para tener una propuesta de análisis espacial relacionado con los procesos de degradación ambiental en los sistemas sociales y ecológicos del país. El planteamiento del modelo conceptual tuvo en cuenta la característica totalizante de la TGS, pues solo con indicadores de la dimensión ecosistémica o del sistema cultural, difícilmente se podrán encontrar soluciones integrales para abordar la complejidad del fenómeno de estudio. A partir del ejercicio de aplicación del IEDAN se identificaron tres núcleos de alta degradación ambiental en Colombia, uno asociado a la región Caribe y dos a la región andina; así mismo se identificaron sectores de la Amazonía, la Orinoquía y el Pacífico con valores medios degradación ambiental.

Con este enfoque holístico se logró integrar en el análisis espacial una dimensión de lo ambiental que actualmente es compleja de espacializar, el sistema cultural, y se encontró que ésta, puede incidir de manera importante en el estado de la degradación ambiental, pues con el resultado se identifican áreas en las regiones del Pacífico, la Orinoquía y el Amazonas, con categorías de degradación que van de baja a media, situación diferente a la presentada en los índices de sostenibilidad con que cuenta el país.

Con las 12 variables seleccionadas se encontró que el IEDAN presenta una perspectiva diferente y complementaria para caracterizar la degradación ambiental en el país y para orientar la gestión del territorio; dado que el índice ayudaría a direccionar acciones no solo en áreas del país en donde diferentes tipos de degradación del orden ecosistémico y cultural tienen congruencia espacial, sino también en áreas en las que se debe gestionar alguna dimensión determinada para lograr la sustentabilidad y evitar profundizar en conflictos ambientales.

Adicionalmente se encontró que esta propuesta puede utilizarse como herramienta de apoyo en la definición a escala subnacional de socioecorregiones que responden a un conjunto de variables explicativas de degradación ambiental y pueden aportar al diseño de políticas y estrategias territoriales que incentiven el desarrollo del sistema cultural procurando la estabilidad de la dimensión ecosistémica.

A pesar de los resultados generados, es importante mencionar que el IEDAN tiene como factor limitante la falta de información espacial específica. Tanto la dimensión ecosistémica como la cultural requieren variables espacialmente explícitas que a la fecha no se tienen o están a una escala muy general; por lo cual, al no disminuir esta brecha, prima el desconocimiento de las realidades locales que llevan a fallas importantes en la planificación y gestión territorial. Pese a esta situación es posible afirmar que el desarrollo del IEDAN con las variables seleccionadas podría considerarse como una herramienta espacial que podría dar soporte a los tomadores de decisiones respecto al trabajo de los sistemas sociales y ecológicos en pro de la disminución de la degradación ambiental.

5.2 Recomendaciones

Para lograr que el comportamiento del índice se ajuste a la realidad del país en términos de degradación ambiental, es necesario incluir la mayor cantidad de tipos de degradación por elemento ambiental y por lo tanto se recomienda continuar con la búsqueda o el levantamiento de variables espaciales explicativas relacionadas con el aire, el bosque y los componentes del sistema cultural como paradigma tecnológico, relaciones sociales y la red simbólica.

Adicionalmente se recomienda continuar en la investigación de la selección de variables que compondrán el IEDAN para contar con un conjunto representativo de ambas dimensiones que cumpla con los criterios establecidos y permita no solo el análisis descriptivo simple como en este trabajo sino también un análisis estadístico multivariado por técnicas de análisis de relaciones entre variables como ACP o Análisis de clusters con el fin de tener una idea clara de la estructura de los datos según los aportes de cada variable y de su influencia en la orientación de un ejercicio de aplicación del IEDAN utilizando la técnica de análisis espacial de superposición ponderada.

En este sentido se sugiere incluir la ponderación como un aspecto de investigación para futuros desarrollos relacionados con el IEDAN y poder comparar con los resultados que en este trabajo se obtuvieron sin ponderar, teniendo en cuenta que respecto a la integración de variables de sistemas

sociales y ecológicas se encontraron diversas posiciones, algunos autores sugieren ponderar Córdoba et al (2020), Etter et al (2011), Mikulic et al (2015), Schuschny & Soto (2009), mientras que otros mencionan que no existe referencia científica para diferenciar los pesos en estudios que involucren los sistemas sociales y ecológicos (Bandura, 2006; Estoque & Murayama, 2014).

Contar con información de fenómenos como la degradación ambiental en sistemas sociales y ecológicos del país es importante para orientar los cambios profundos que deben establecerse para lograr una sociedad colombiana sustentable. La búsqueda de estos cambios se asume dependiendo de las diferencias de cada región y sus dinámicas temporales; por lo cual se recomienda continuar con la investigación para en el desarrollo de este índice espacial incluir el componente temporal para crear una línea base como aproximación al estado de los sistemas sociales y ecológicos y poder realizar análisis de cambio en un periodo de tiempo específico.

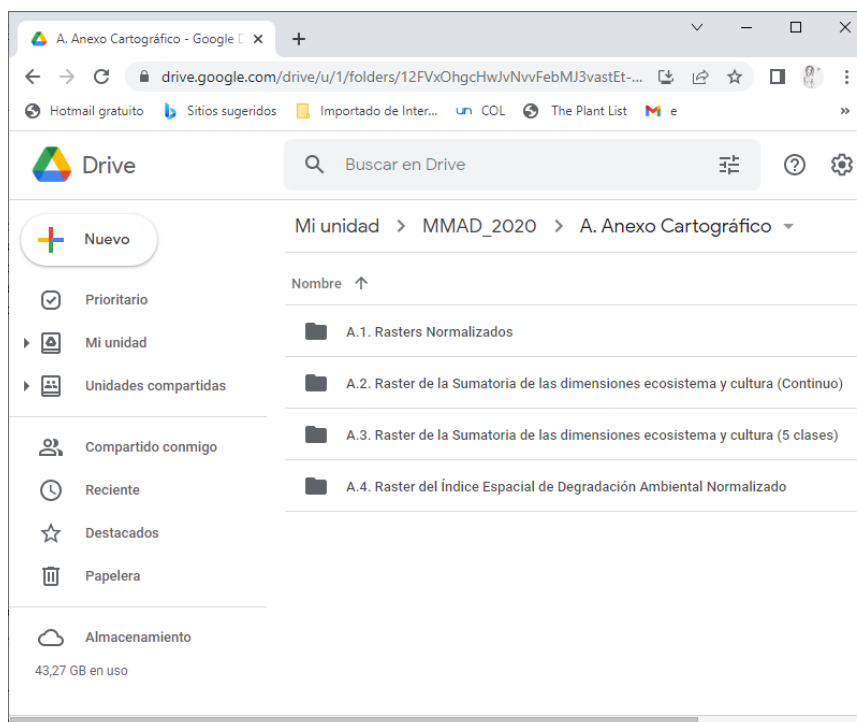
Dado que la información que se requiere se convierte en temas de manejo de “Big Data” se recomienda la investigación en el planteamiento del índice para que en temas de procesamiento se mejore y se alcance la interoperabilidad al momento de calcularlo y no se convierta en un tema de almacenamiento engorroso y se pueda operacionalizar el conocimiento de la degradación ambiental en los sistemas sociales y ecológicos del país.

Finalmente, es importante recalcar que el desarrollo de esta fase tiene como objetivo principal hacer una primera prueba piloto del comportamiento espacial del IEDAN en todo el territorio nacional; por lo tanto, es necesario que futuros trabajos de investigación aborden pruebas de validación estadística, confiabilidad y efectividad del índice.

A. Anexo Cartográfico

En esta sección se relacionan cuatro complementos al documento: i) los raster de las capas normalizadas; ii) la sumatoria de las dimensiones ecosistema y cultura en raster (continuo); iii) la sumatoria de las dimensiones ecosistema y cultura en raster (5 clases); y iv) el raster del índice. Para compartir estos archivos debido a su formato (Raster) y requerimiento de espacio de almacenamiento se optó por presentarlos en una carpeta en el drive llamada “A. Anexo Cartográfico” la cual contiene la información como se muestra en la Figura 5-1 y a continuación el enlace de acceso para la consulta de los archivos.

Figura 5-1: Visualización de organización del Anexo Cartográfico en el drive



Enlace de acceso para consulta de los archivos:

<https://drive.google.com/drive/folders/12FVxOhgcHwJvNvvFebMJ3vastEt-w-EU?usp=sharing>

Bibliografía

- Andrade, G., & Castro, L. (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia: invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*, 16(30), 53–71.
- Andrade, G., Chaves, M., Corzo, G., & Tapia, C. (Eds.). (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad: Gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio de uso de la tierra en el territorio colombiano*. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/35145>
- Ángel, A., & Noguera, A. P. (2012). *Despliegues investigativos de su Pensamiento en Educación Ambiental*.
- Ángel Maya, A. (2013). El reto de la vida. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 4(9), 1–69. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ArcGIS-Pro2.9. (2022). *Métodos de clasificación de datos*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- Armenteras, D., González, T., Meza, M., Ramírez, D. J. P., Cabrera, E., Galindo, G., & Yepes, A. (2018). *Causas de Degradación Forestal en Colombia: una primera aproximación* (D. Armenteras, T. González, M. Meza, D. J. P. Ramírez, E. Cabrera, G. Galindo, & A. Yepes (Eds.)).
- Arnold, M., Ph, D., Osorio, F., & Antropología, M. A. D. De. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio*, 3, 40–49.
- Berkes, F., & Folke, C. (1998). *Linking social and ecological systems for resilience and sustainability* (F. Berkes & C. Folke (Eds.); Linking so).
- Bertalanffy von, L. (1986). *Teoría General de los Sistemas; Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Blowers, A., Boersema, J., & Martin, A. (2012). Is Sustainable Development Sustainable? *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.666045>
- Boada, L. F. (2016). *Lineamientos Metodológicos para la determinación del área de influencia de proyectos sobre el componente biótico*. 147. <http://www.bdigital.unal.edu.co/57132/>
- Bolognesi, T., Gerlak, A. K., & Giuliani, G. (2018). *Explaining and Measuring Social-Ecological*

- Pathways : The Case of Global Changes and Water Security.*
<https://doi.org/10.3390/su10124378>
- Boulding, K. E. (1956). General Systems Thinking - the skeleton of science. *Management Science*, 2(3), 197–208. <http://www.jstor.org/stable/2627132>
- Bradshaw, C. J. A., & Di Minin, E. (2019). Socio-economic predictors of environmental performance among African nations. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45762-3>
- Carrizosa, J. (2005). *Desequilibrios territoriales y sostenibilidad local. Conceptos, metodologías y realidades* (U. N. de C. I. de E. A. (IDEA) (Ed.)).
- Carrizosa, J. (2014). *Colombia compleja* (J. B. de B. J. C. Mutis (Ed.)). <http://hdl.handle.net/20.500.11761/32548>
- Cerón Hernández, V. A., Fernández Vargas, G., Figueroa, A., & Restrepo, I. (2020). The approach of socio-ecological systems in environmental sciences. *Investigación & Desarrollo*, 27(2), 85–109. <https://doi.org/10.14482/indes.27.2.301>
- Chapin, F. S., Kofinas, Gary P, A., & Folke, C. (2009). Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-Based Natural Resource Management in a Changing World. In F. S. Chapin, A. Kofinas, Gary P, & C. Folke (Eds.), *Environmental Conservation - ENVIRON CONSERV.* <https://doi.org/10.1017/S0376892910000470>
- Choudhary, M., Chauhan, G., & Kushwah, Y. (2015). Environmental Degradation : Causes , Impacts and Mitigation. *ResearchGate, February*, 1–4.
- Colding, J., & Barthel, S. (2019). *Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later.* 24(1).
- Concha, M., Cerda, C., & Zappi, M. (2012). Enfoque sistémico para el diseño de sistemas energéticos acuícolas resilientes: discusión aplicada al caso de una empresa de cultivos. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(3), 813–821. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue3-fulltext-28>
- Córdoba, C., Triviño, C., & Calderón, J. T. (2020). Agroecosystem resilience. A conceptual and methodological framework for evaluation. In *PLoS ONE* (Vol. 15, Issue 4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220349>
- Correa A, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J. J., Buriticá, S. R., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal Evaluation of The Human Footprint in Colombia: Four Decades of Anthropogenic Impact in Highly Biodiverse Ecosystems. *BioRxiv*, 117(April), 2020.05.15.098855. <https://doi.org/10.1101/2020.05.15.098855>
- de Jong, C. E., & Kok, K. (2021). Ambiguity in social ecological system understanding: Advancing

- modelling of stakeholder perceptions of climate change adaptation in Kenya. *Environmental Modelling and Software*, 141(April), 105054. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105054>
- Delgado, L., & Marin, V. (2005). FES-sistema: Un concepto para la incorporación de las sociedades humanas en el análisis medioambiental en Chile. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21, 18–22.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP.b. (2018). *Resumen Ejecutivo Política de Crecimiento Verde*. 114. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3934.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2018a). *Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia 2015*. 44.
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2018b). *Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia 2015*. 44. [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoración económica de la degradación ambiental.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoración_económica_de_la_degradación_ambiental.pdf)
- Dressel, S., Ericsson, G., & Sandström, C. (2018). Mapping social-ecological systems to understand the challenges underlying wildlife management. *Environmental Science and Policy*, 84(June), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.03.007>
- Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2014). Social – ecological status index : A preliminary study of its structural composition and application. *Ecological Indicators*, 43, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.031>
- et al, O. (2019). Land degradation. In E. C. B. V. M.-D. H.-O. P. D. C. R. P. Z. R. S. S. C. R. van D. M. F. E. H. S. L. S. N. M. P. J. P. J. P. P. V. E. H. K. K. M. J. Malley P.R. Shukla J. Skea (Ed.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 1–92). <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0538>
- Etter, A., McAlpine, C. A., Seabrook, L., & Wilson, K. A. (2011). Incorporating temporality and biophysical vulnerability to quantify the human spatial footprint on ecosystems. *Biological Conservation*, 144(5), 1585–1594. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.02.004>
- Etter, Andres, Andrade, Á., Saavedra, K., Amaya, P., & Arévalo, P. (2017). *Estado De Los Ecosistemas Colombianos*. 2, 1–138. http://www.conservation.org.co/media/A7.LRE-Colombia_INFORME_FINAL_2017.pdf
- Farhad, S. (2012). *Los sistemas socio-ecológicos: Una aproximación conceptual y metodológica*.
- Fonseca, C. (2016). *DESARROLLO TERRITORIAL SUSTENTABLE COMO BALANCE SINÉRGICO DE CINCO RIQUEZAS. Nuevos criterios e instrumentos para afrontar el “Antropoceno”. Un Ejercicio de medición en Colombia* (p. 30).

- Franco-vidal, L., Ruiz Agudelo, C. A., Delgado, J., Andrade, G., & Guzman, A. (2015). Interacciones socioecológicas que perpetúan la degradación de la laguna de Fúquene, Andes orientales de Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 19(37), 49. <https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd19-37.ispd>
- Galano, C., Curi, M., Motomura, Ó., Silva, M., Ángel-Maya, A., Ángel, F., Borrero, J., Carrizosa, J., Cortés, H., Flórez, M., & Leff, E. (2002). Manifiesto por la Vida: Por una ética para la Sustentabilidad. *Ambiente & Sociedad*, 10, 1–14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2002000100012>
- Galindo, et al. I., Galindo, G., Espejo O. J., Ramírez, J. ., Palacios, S., Granados, L., V., Forero, C., Valbuena, C. A., Rubiano, J. C., Lozano, R. H., Vargas, K. M., Palacios, A., Palacios, S., Franco, C. A., Granados, E. I., Vergara, L. K., & Cabreara, E. (2014). Memoria técnica de la Cuantificación de la superficie de bosque natural y deforestación a nivel nacional. Actualización Periodo 2012 – 2013. *Ideam*, 56.
- Gligo, N., Alonso, G., Barkin, D., Brailovsky, A., Brzovic, F., Carrizosa, J., Durán, H., Fernández, P., Gallopín, G., Leal, J., Botero, M. M. De, Morales, C., Monasterio, F. O., Panario, D., Pengue, W., & Becerra, M. R. (2020). *La tragedia ambiental de América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta*.
- Gunderson, L. H., Holling, C. ., & Light, S. S. (Eds.). (1995). *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institution* (p. 593).
- Hermelin, M. (2015). Landscapes and landforms of Colombia. *Landscapes and Landforms of Colombia*, 1–210. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0>
- Hortúa R, S. E. (2014). *Representaciones discursivas sobre la palma de aceite en Colombia 2002-2012: Análisis Crítico del Discurso (ACD) desde una perspectiva ambiental*. 153. <http://www.bdigital.unal.edu.co/45799/>
- IDEAM. (2019). *Estudio nacional de la degradación de suelos por salinización* (M. y E. A. Instituto de Hidrología (Ed.)).
- IPBES. (2018). Land degradation and restoration. In *Companion to Environmental Studies*. <https://doi.org/10.4324/9781315640051-105>
- Jha, R., & Murthy, K. V. B. (2011). A Consumption Based Human Development Index and the Global Environmental Kuznets Curve. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.509243>
- Lavaux, S. (2004). *Degradación ambiental y conflictos armados : las conexiones*.
- Lavell, A. M. (1996). Ciudades en Riesgo: Degradación Ambiental, Riesgos Urbanos y Desastres. *La Red*, 2–27.

- Leff, E. (2004). *RACIONALIDAD AMBIENTAL La reapropiación social de la naturaleza* (s. a. de c. . siglo xxi editores (Ed.)).
- Lewin, R. (1992). *Complejidad. El caos como generador de orden* (Tusquets.).
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., Alberti, M., Charles, L., Schneider, S. H., Ostrom, E., Pell, A. N., Lubchenco, J., Taylor, W. W., Ouyang, Z., Deadman, P., Kratz, T., Provencher, W., Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., ... Lubchenco, J. (2007). *Coupled Human and Natural Systems*. 36(8), 639–649.
- Manuel, J., Calderón, S., Torres, O. F., Pontoni, M. M., Torres, O. F., & Rojas, J. E. (2015). *POR EROSIÓN en Colombia 2015*.
- Marino, M., Tokatlián, J., & (Comp.). (1983). *Ecodesarrollo, el pensamiento del decenio*. Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente - INDERENA y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Márquez, G. (2003). Transformación de ecosistemas, pobreza y violencia en Colombia: aproximación empírica. *Desafíos Locales Ante La Globalización, January 2003*, 1–19.
- Martínez, L. F., Toro, J., & J. León, C. (2019). A complex network approach to environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 37(5), 407–420. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1552442>
- Maurya, P. K., Ali, S. A., Ahmad, A., Zhou, Q., da Silva Castro, J., Khane, E., & Ali, A. (2020). An introduction to environmental degradation: Causes, consequence and mitigation. *Environmental Degradation: Causes and Remediation Strategies, March*, 1–20. <https://doi.org/10.26832/aesa-2020-edcrs-01>
- Mikulic, J., Kožic, I., & Krešić, D. (2015). Weighting indicators of tourism sustainability: A critical note. *Ecological Indicators*, 48(1), 312–314. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.026>
- Moreno, L. A., Andrade, G. I., & Gómez, M. F. (Eds.). (2019). *Biodiversidad 2018. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2018/>
- Naciones Unidas, U. (n.d.). *COP26: Juntos por el planeta*. Acción Por El Clima. Retrieved May 20, 2022, from <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- Naia, L., Anaru, A., & Brown, G. (2008). *Social – ecological hotspots mapping : A spatial approach for identifying coupled social – ecological space*. 85, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.09.007>
- Noble, M. M., Harasti, D., Pittock, J., & Doran, B. (2021). Using GIS fuzzy-set modelling to integrate social-ecological data to support overall resilience in marine protected area spatial

- planning: A case study. *Ocean and Coastal Management*, 212(April), 105745. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105745>
- OECD, O. para la C. y el D. E. (2001). *Environmental Indicators. Towards Sustainable Development*.
- Papa Francisco. (2015). Encíclica Laudato Sí. *Tipografía Vaticana, Carta Encí*, 184. https://www.oas.org/es/sg/casacomun/docs/papa-francesco-enciclica-laudato-si-sp.pdf%0Ahttp://www.costarricense.cr/pagina/franval/index_archivos/Page1247.htm
- Partelow, S. (2018). A review of the social-ecological systems framework: Applications, methods, modifications, and challenges. *Ecology and Society*, 23(4). <https://doi.org/10.5751/ES-10594-230436>
- Pérez, V. A., Regil, G. H. H., & Mas, C. J. F. (2020). Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas*, 103. <https://doi.org/10.14350/rig.60150>
- Ramírez D, J. P., Galindo, G. A., Yepes, A. P., & Cabrera, E. (2018). *Estimación de la degradación de bosques de Colombia a través de un análisis de fragmentación* (C. E. Ramírez-Delgado J.P., Galindo G.A., Yepes A.P. (Ed.)).
- Ramonet, I. (2019). La pandemia y el sistema-mund. *Hilos Tensados*, 1, 1–476. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rangel, J. O. (2015). *La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional*. 200. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.136>
- Rathe, L. (2017). La sustentabilidad en los sistemas socio-ecológicos. *Utopia y Praxis Latinoamericana*, 22(78), 65–78.
- Real Academia Española. (n.d.). *Real Academia Española*.
- Redman, C. L., Grove, J. M., & Kuby, L. H. (2004). Integrating social science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems*, 7(2), 161–171. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0215-z>
- Rees, W. E. (1996). Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 17(3), 195–215. <https://doi.org/10.1007/BF02208489>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>

- Schoon, M., & Van Der Leeuw, S. (2015). The shift toward social-ecological systems perspectives: Insights into the human-nature relationship. *Natures Sciences Societes*, 23(2), 166–174. <https://doi.org/10.1051/nss/2015034>
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible Andrés Schuschny. *Cepal*, 109.
- Sterk, M., van de Leemput, I. A., & Peeters, E. T. (2017). How to conceptualize and operationalize resilience in socio-ecological systems? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.09.003>
- Tamayo, A. (1999). Metodología Teoría General De Sistemas. *Revista Del Departamento de Ciencias*, 8, 84–89. <http://www.bdigital.unal.edu.co/57900/1/teoriageneraldesistemas.pdf>
- Thakur, B. K., Rout, H. S., & Chakraborty, T. (2014). Environmental Degradation, Sustainable Development and Human Well-being: Evidence from India. *MANTHAN: Journal of Commerce and Management*, 1(1). <https://doi.org/10.17492/manthan.v1i1.2436>
- The Resilience Alliance. (2010). Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners. *Resilience Alliance*, November 2015, 54.
- Toledo, V., Chaires, P., & Barón, L. (2002). Revisualizar lo rural: un enfoque socioecológico. *Gaceta Ecológica*, 62, 7–20. <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2897108.pdf>
- Torres C, G. (2016). Reflexiones alrededor de la epistemología ambiental. *Revista de Estudios Sociales*, 58, 39–51. <https://doi.org/10.7440/res58.2016.03>
- Tyagi, S., Garg, N., & Paudel, R. (2014). Environmental Degradation: Causes and Consequences. *European Researcher*, 81(8–2), 1491. <https://doi.org/10.13187/er.2014.81.1491>
- Uehara, T., Hidaka, T., Tsuge, T., Sakurai, R., & Cordier, M. (2021). An adaptive social-ecological system management matrix for guiding ecosystem service improvements. *Ecosystem Services*, 50(May), 101312. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101312>
- UNISDR, U. N. I. S. for D. R. (2004). Terminology: Basic Terms of Disaster Risk Reduction. ... *Global Review of Disaster Reduction* ..., 1–8. http://www.unisdr.org/files/7817_7819isdrterminology11.pdf
- Van Assche, K., Valentinov, V., & Verschraegen, G. (2019). Ludwig von Bertalanffy and his enduring relevance: Celebrating 50 years General System Theory. *Systems Research and Behavioral Science*, 36(3), 251–254. <https://doi.org/10.1002/sres.2589>
- Walker, H., & Salt, D. (2006). *Resilience Thinking. Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. 28(1), 1–8.
- Warner, K., Hamza, M., Oliver-Smith, A., Renaud, F., & Julca, A. (2010). Climate change,

- environmental degradation and migration. *Natural Hazards*, 55(3), 689–715.
<https://doi.org/10.1007/s11069-009-9419-7>
- Webb, N. P., Marshall, N. A., Stringer, L. C., Reed, M. S., & Herrick, J. E. (2020). *Land degradation and climate change: building climate resilience in agriculture*. 15(8), 450–459.
- Wu, S., Liang, Z., & Liu, Y. (2019). Quantifying the risk of irreversible degradation for ecosystems : A probabilistic method based on Bayesian inference. *Ecological Indicators*, 107(April), 105621. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105621>
- Zurrita, A., Badii, M., Guillen, A., Lugo, O., & Aguilar, J. (2015). Factores Causantes de Degradación Ambiental. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1–9.
[http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10\(3\)1-9.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10(3)1-9.pdf)