



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CODIGO

AP-BIB-FO-06

VERSION

1

VIGENCIA

2014

PAGINA

1 de 1

Neiva, 16 de febrero de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

El (Los) suscrito(s):

Liliana Arroyo Morales, con C.C. No. 36068941,

Marylin Mariette Quintero Ardila, con C.C. No. 1080295190,

Autor(es) de la tesis titulada: **Modelo basado en agentes de los impactos de la pandemia Covid-19 en el ecosistema Desierto de La Tatacoa**, presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Magister en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Firma

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Modelo basado en agentes de los impactos de la pandemia Covid-19 en el ecosistema Desierto de La Tatacoa

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Quintero Ardila	Marylin Mariette
Arroyo Morales	Liliana

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Perdomo Sánchez	Oscar Iván
Ovalle Cerquera	Manuel

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magister en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

FACULTAD: Ciencias exactas y naturales

PROGRAMA O POSGRADO: Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 134

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general Grabados___ Láminas___
Litografías___ Mapas Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Adobe Acrobat Reader

MATERIAL ANEXO: documento y presentación de la tesis

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Complejidad	Complexity	6. Qgis	Qgis
2. Sistemas Complejos	Complex systems	7. Weka	Weka
3. Covid-19	Covid-19	8. Gephi	Gephi
4. Impactos	Impacts	9. Netlogo	NetLogo
5. Ecosistema estratégico	Strategic ecosystem		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Las medidas implementadas para detener los contagios de la enfermedad Covid-19, causada por el virus SARS-CoV-2, han tenido impactos positivos y negativos a nivel social, económico y ambiental a diferentes escalas mundiales, debido a la prohibición de actividades de contacto humano como el turismo. En este sentido, uno de los ecosistemas con mayores implicaciones a nivel nacional, es el Desierto de la Tatacoa, donde dejaron de llegar turistas desde el mes de marzo hasta septiembre de 2020, cuando se empezó a reactivar dicha actividad económica. Con el objetivo de explicar esas alteraciones, desde el paradigma de la complejidad, se propuso una metodología pragmática que incluyó la recolección de información primaria y secundaria, y su procesamiento con los programas Qgis, Weka, Gephi y NetLogo. Al final se obtuvo, un modelo basado en agentes, en el que se evidencia que los impactos en el turismo, la economía y la sociedad son principalmente negativos y en el ambiente, positivos. El sistema complejo muestra algunas dinámicas adaptativas como el fortalecimiento del turismo virtual o el surgimiento de nuevos negocios relacionados con el insumo de elementos de protección personal, como mecanismo de autoregulación y auto-eco-organización. El problema presenta un comportamiento catastrófico, de efecto mariposa y con auto-similitud en diferentes niveles de su jerarquía, ya que los impactos encontrados se asemejan a otros en diferentes escalas y lugares del mundo.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The measures implemented to stop the contagion of the Covid-19 disease, caused by the SARS-CoV-2 virus, have had positive and negative impacts on a social, economic and environmental level at different global scales, due to the prohibition of contact activities human like tourism. In this sense, one of the ecosystems with the greatest national implications is the Tatacoa Desert, where tourists stopped arriving from March to September 2020, when said economic activity began to reactivate. In order to analyze these alterations, from the paradigm of complexity, a pragmatic methodology was proposed that included the collection of primary and secondary information, and its processing with the Qgis, Weka, Gephi and NetLogo programs. In the end, an agent-based model was obtained, which shows that the impacts on tourism, the economy and society are mainly negative and positive on the environment. The complex system shows some adaptive dynamics such as the strengthening of virtual tourism or the emergence of new businesses related to the input of personal protection elements, as a self-regulation and self-eco-organization mechanism. The problem presents a catastrophic behavior, with a butterfly effect and with self-similarity at different levels of its hierarchy, since the impacts found are similar to others at different scales and places in the world.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Camilo Andrés Aragón

Firma:

Nombre Jurado: Manuel Ovalle Cerquera

Firma:



Modelo basado en agentes de los impactos de la pandemia Covid-19 en el ecosistema
Desierto de La Tatacoa

Marylin Mariette Quintero Ardila

Liliana Arroyo Morales

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

Neiva, Colombia

2021

Modelo basado en agentes de los impactos de la pandemia Covid-19 en el ecosistema
Desierto de La Tatacoa

Marylin Mariette Quintero Ardila

Liliana Arroyo Morales

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

Codirectores:

Mg. Oscar Iván Perdomo Sánchez

Mg. Manuel Ovalle Cerquera

Línea de investigación:

Sistemas Dinámicos Complejos

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad

Neiva, Colombia

2021

A nuestras familias.

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestras familias por todo el apoyo que nos brindaron durante el tiempo que estuvimos trabajando en esta investigación y, en general, por acompañarnos a lo largo de nuestras vidas.

Queremos agradecer a nuestros profesores de la Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad de la Universidad Surcolombiana, en especial al PhD. Mauro Montealegre Cárdenas por crear este espacio de reflexión académica en torno al paradigma de la complejidad y al profesor MSc. Camilo Aragón por sus valiosos aportes a esta investigación, asimismo a nuestros codirectores de tesis, MSc. Oscar Iván Perdomo Sánchez y MSc. Manuel Ovalle Cerquera, por creer en esta propuesta y compartirnos sus conocimientos.

Queremos agradecer al señor Yilver Lozano Gil, coordinador de turismo del municipio de Villavieja, por compartir con nosotras la información relacionada con el ecosistema Desierto de la Tatacoa.

Este trabajo no hubiera sido posible sin ustedes.

Resumen

Las medidas implementadas para detener los contagios de la enfermedad Covid-19, causada por el virus SARS-CoV-2, han tenido impactos positivos y negativos a nivel social, económico y ambiental a diferentes escalas mundiales, debido a la prohibición de actividades de contacto humano como el turismo. En este sentido, uno de los ecosistemas con mayores implicaciones a nivel nacional, es el Desierto de la Tatacoa, donde dejaron de llegar turistas desde el mes de marzo hasta septiembre de 2020, cuando se empezó a reactivar dicha actividad económica. Con el objetivo de explicar esas alteraciones, desde el paradigma de la complejidad, se propuso una metodología pragmática que incluyó la recolección de información primaria y secundaria, y su procesamiento con los programas Qgis, Weka, Gephi y NetLogo. Al final se obtuvo, un modelo basado en agentes, en el que se evidencia que los impactos en el turismo, la economía y la sociedad son principalmente negativos y en el ambiente, positivos. El sistema complejo muestra algunas dinámicas adaptativas como el fortalecimiento del turismo virtual o el surgimiento de nuevos negocios relacionados con el insumo de elementos de protección personal, como mecanismo de autoregulación y auto-eco-organización. El problema presenta un comportamiento catastrófico, de efecto mariposa y con auto-similitud en diferentes niveles de su jerarquía, ya que los impactos encontrados se asemejan a otros en diferentes escalas y lugares del mundo.

Palabras clave: complejidad, sistemas complejos, Covid-19, impactos, ecosistema estratégico, Qgis, Weka, Gephi, NetLogo.

Abstract

The measures implemented to stop the contagion of the Covid-19 disease, caused by the SARS-CoV-2 virus, have had positive and negative impacts on a social, economic and environmental level at different global scales, due to the prohibition of contact activities human like tourism. In this sense, one of the ecosystems with the greatest national implications is the Tatacoa Desert, where tourists stopped arriving from March to September 2020, when said economic activity began to reactivate. In order to analyze these alterations, from the paradigm of complexity, a pragmatic methodology was proposed that included the collection of primary and secondary information, and its processing with the Qgis, Weka, Gephi and NetLogo programs. In the end, an agent-based model was obtained, which shows that the impacts on tourism, the economy and society are mainly negative and positive on the environment. The complex system shows some adaptive dynamics such as the strengthening of virtual tourism or the emergence of new businesses related to the input of personal protection elements, as a self-regulation and self-eco-organization mechanism. The problem presents a catastrophic behavior, with a butterfly effect and with self-similarity at different levels of its hierarchy, since the impacts found are similar to others at different scales and places in the world.

Keywords: complexity, complex systems, Covid-19, impacts, strategic ecosystem, Qgis, Weka, Gephi, NetLogo.

Contenido

Resumen	5
Lista de Figuras	10
Lista de Imágenes	12
Lista de Tablas	13
Introducción.....	14
Planteamiento del Problema de Investigación.....	15
Descripción del Problema	15
Enunciación del Problema	26
Sistematización del Problema	27
Antecedentes y Justificación	28
Antecedentes	28
Justificación	38
Fundamentos Teóricos.....	40
Una aproximación al paradigma de la complejidad.....	40
El pensamiento complejo	44
<i>Principio sistémico u organizativo</i>	46
<i>Principio hologramático</i>	46
<i>Principio del bucle retroactivo o retroalimentación</i>	47
<i>Principio del bucle recursivo</i>	47
<i>Principio de autonomía / dependencia (auto-eco-organización)</i>	47
<i>Principio dialógico</i>	48
<i>Principio de reintroducción, del que conoce en todo conocimiento</i>	49
El enfoque o pensamiento sistémico	49
<i>Atributos de los sistemas</i>	51
<i>Clasificación de los sistemas</i>	54
<i>Sistemas Complejos</i>	56
Las ciencias de la complejidad.....	58
<i>Termodinámica del no-equilibrio</i>	61
<i>Teoría del Caos</i>	61
<i>Geometría de fractales</i>	61

<i>Catástrofes</i>	62
<i>Lógicas no Clásicas</i>	62
<i>Ciencia de redes</i>	63
Los Ecosistemas Estratégicos y la Sostenibilidad.....	63
Modelado Basado en Agentes.....	65
Objetivos de la Investigación.....	67
Objetivo General.....	67
Objetivos Específicos.....	67
Metodología.....	68
Área de estudio.....	68
Tipo y Enfoque de la Investigación.....	69
Universo de Estudio, Población y Muestra.....	70
Estrategia Metodológica.....	70
Fase 1: revisión bibliográfica.....	71
Fase 2: recorrido de campo y definición de agentes del sistema.....	71
Fase 3: recolección de información.....	73
<i>Datos secundarios</i>	73
<i>Aplicación de encuesta</i>	74
<i>Procesamiento de imágenes satelitales</i>	74
Fase 4: modelado del sistema complejo e interpretación de resultados.....	79
Análisis y Discusión de Resultados.....	82
Subsistema turismo.....	82
Subsistema económico.....	83
Subsistema social.....	85
Subsistema ambiental.....	89
Modelo basado en agentes del ecosistema Desierto de la Tatacoa.....	91
Los impactos de la pandemia Covid-19 en el Desierto de la Tatacoa.....	97
Posibles escenarios futuros.....	99
Conclusiones.....	100
Recomendaciones.....	104
Referencias Bibliográficas.....	105

Anexos	119
Anexo A: matriz del problema	119
Anexo B: cronograma de actividades	120
Anexo C: encuesta	122
Anexo D: datos agrupados empleados en la propuesta del modelo del sistema complejo.	125
Anexo E: Gráficas de correlación de los agentes sociales, económicos y ambientales, respecto al parámetro de turistas.	128
Anexo F: código del modelo basado en agentes propuesto para el ecosistema Desierto de la Tatacoa en el software NetLogo.	131

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución de la cantidad de casos de Covid-19 en todo el mundo, al 6 de septiembre de 2020.	16
Figura 2. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de NO_2 proyectadas y observadas durante las medidas de bloqueo por la Covid-19.....	20
Figura 3. Concentraciones de NO_2 en el norte de Italia.....	20
Figura 4. Comparación de la concentración de NO_2 en China entre 2019 y 2020.	21
Figura 5. Evolución de la cantidad de casos de Covid-19 en Colombia, al 1° de octubre de 2020 (datos acumulados).	23
Figura 6. Síntesis del problema de investigación.	26
Figura 7. Ejes temáticos utilizados para la elección de los antecedentes.	29
Figura 8. Concepciones de la complejidad, aplicadas a la investigación.	44
Figura 9. Principios del pensamiento complejo.....	45
Figura 10. Clasificación de los sistemas.....	55
Figura 11. Complejidad de algunos sistemas.	56
Figura 12. Elementos de una Teoría de Sistemas Complejos.....	58
Figura 13. Ejes de trabajo de las ciencias de la complejidad.	59
Figura 14. Ciencias de la complejidad.....	60
Figura 15. Fases de la estrategia metodológica.	70
Figura 16. Diagrama de relaciones causales del ecosistema.	72
Figura 17. Comportamiento de los agentes del subsistema turismo.....	83
Figura 18. Comportamiento de los agentes del subsistema económico	85
Figura 19. Comportamiento de algunos agentes sociales.....	86
Figura 20. Diagrama de árbol de la calidad de vida.	86
Figura 21. Diagrama de redes de la calidad de vida humana en el ecosistema.	87
Figura 22. Modelo basado en agentes del ecosistema Desierto de la Tatacoa.	93
Figura 23. Botones, deslizador y monitores del modelo en NetLogo.	94
Figura 24. Dinámica del ecosistema antes de la pandemia Covid-19.	95

Figura 25. Dinámica del ecosistema durante las medidas de contención de la pandemia Covid-19..... 96

Figura 26. Dinámica del ecosistema durante los primeros meses de reactivación del turismo.
..... 96

Lista de Imágenes

Imagen 1. Ubicación del área de estudio: ecosistema Desierto de la Tatacoa.	68
Imagen 2. Ecosistema: Desierto de la Tatacoa.	69
Imagen 3. Buscador de imágenes satelitales: Earth Explorer.	76
Imagen 4. NDVI de imagen satelital del área de estudio 2020.	77
Imagen 5. NDVI del municipio de Villavieja 2020.	78
Imagen 6. Identificación de las áreas de suelo descubierto y cobertura vegetal del ecosistema.	79
Imagen 7. Comparativo del agente cobertura vegetal, antes y durante las medidas de contención de la Covid-19.	91

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los antecedentes según su territorio de estudio, respecto al de la presente investigación.....	37
Tabla 2. Atributos de los sistemas con base en los conceptos descritos por Flórez y Thomas (1993), Hurtado Carmona (2011), Castaldo Suau (2012).	51
Tabla 3. Agentes del ecosistema.....	73
Tabla 4. Bandas espectrales del Landsat 8.	75
Tabla 5. Elementos del modelador de dinámica de sistemas de Netlogo.....	80
Tabla 6. Datos del subsistema turismo.	82
Tabla 7. Datos de los ingresos económicos municipales.....	83
Tabla 8. Datos del subsistema económico.	84
Tabla 9. Datos de los agentes sociales.....	85
Tabla 10. Agentes sociales emocionales.	88
Tabla 11. Influencia de la Covid-19 sobre algunos aspectos de la vida.....	89
Tabla 12. Estimación de la generación de residuos sólidos y las emisiones de CO ₂ por parte de los turistas en el Desierto de la Tatacoa.....	90
Tabla 13. Ecuaciones para la construcción del modelo en NetLogo.	92
Tabla 14. Impactos de la Covid-19 en el Desierto de la Tatacoa.....	98

Introducción

A través de la historia, múltiples epidemias se han convertido en pandemias causando estragos en la humanidad, no solo en lo relacionado con la salud pública, sino también en otros aspectos sociales, económicos y ambientales; amenazando el desarrollo sostenible a diferentes escalas territoriales en el mundo.

Actualmente, la pandemia Covid-19 derivada de la enfermedad causada por el virus SARS-CoV-2 se encuentra activa cobrando vidas humanas y configurando una nueva realidad condicionada por las medidas de contención implementadas para detener los contagios, tales como la cuarentena, el aislamiento, el distanciamiento social y el confinamiento. Estas estrategias se crearon con la buena intención de atacar y detener el problema de salud pública, sin embargo han causado alteraciones y nuevas dinámicas en otros aspectos de la vida. En Colombia las medidas se implementaron principalmente entre los meses de marzo a septiembre de 2020; cambiando la dinámica de ecosistemas como el Desierto de la Tatacoa ubicado en el municipio de Villavieja - Huila, en el cual se detuvo una de las actividades económicas más importantes para la población: el turismo.

Aunque la pandemia es reciente, algunas investigaciones ya han abordado sus impactos en la sociedad, en la economía o en el ambiente, en diferentes lugares; pero no lo han hecho integrando los tres componentes. Es por esto, que surge el interés por comprender el problema de forma sistémica, interdisciplinar e innovadora, implementando los principios, atributos y teorías de los diferentes enfoques de la complejidad (pensamiento complejo, enfoque sistémico y ciencias de la complejidad) aplicables al área de estudio.

El objetivo de esta investigación es explicar los impactos ocasionados por las medidas de contención de la pandemia Covid-19 en el ecosistema Desierto de La Tatacoa a nivel social, económico y ambiental, desde el paradigma de la complejidad. Con lo cual, se busca describir posibles escenarios posteriores a la reactivación del turismo y proporcionar un modelo para la toma de decisiones e implementación de estrategias aplicable no solo a la Tatacoa sino también a otros lugares y en otros momentos de la historia, en los que se presenten nuevas catástrofes similares.

Planteamiento del Problema de Investigación

En este capítulo se presentan las preguntas que motivaron el estudio del problema de investigación y su influencia a nivel mundial, regional y local. Asimismo, se describen los impactos ocasionados en el ámbito social, económico y ambiental por las medidas de contención aplicadas frente a la pandemia Covid-19.

Descripción del Problema

La Covid-19 es una enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2 (Síndrome Respiratorio Agudo Severo Coronavirus 2), posiblemente de origen zoonótico¹. Se transmite a través de gotículas respiratorias durante el contacto estrecho (menor a 1 m de distancia) entre una persona infectada (que tose, estornuda o habla) y una sana (que inhala las gotículas), sin la protección adecuada; también ocurre a través de fómites², produciendo un contagio indirecto por contacto con objetos o superficies contaminadas. El 30 de diciembre de 2019 se tomaron tres muestras de lavado broncoalveolar de un paciente con neumonía de causa desconocida en el Hospital Wuhan Jinyintan, los resultados fueron positivas para pan-Betacoronavirus, relacionado con la cepa de coronavirus tipo SARS de murciélago BatCov RaTG13, identidad 96% (WHO, 2020, págs. 4-8). Desde ese momento el virus empezó a propagarse por todo el mundo, llegando a convertirse en una pandemia³.

El 31 de diciembre de 2019 la oficina de la OMS, en la República Popular de China, fue notificada de la declaración de la Comisión Municipal de Salud de Wuhan en la que se informa sobre un conglomerado de casos de neumonía vírica de origen desconocido. Como respuesta a la emergencia en salud pública, la OMS activó su Equipo de Apoyo para la Gestión de Incidentes (IMST) con el fin de llevar a cabo “las actividades de investigación y

¹ En el informe citado se señala a los murciélagos como posibles reservorios del virus Covid-19. Se podría tratar de una consecuencia del tráfico de especies silvestres de fauna para consumo.

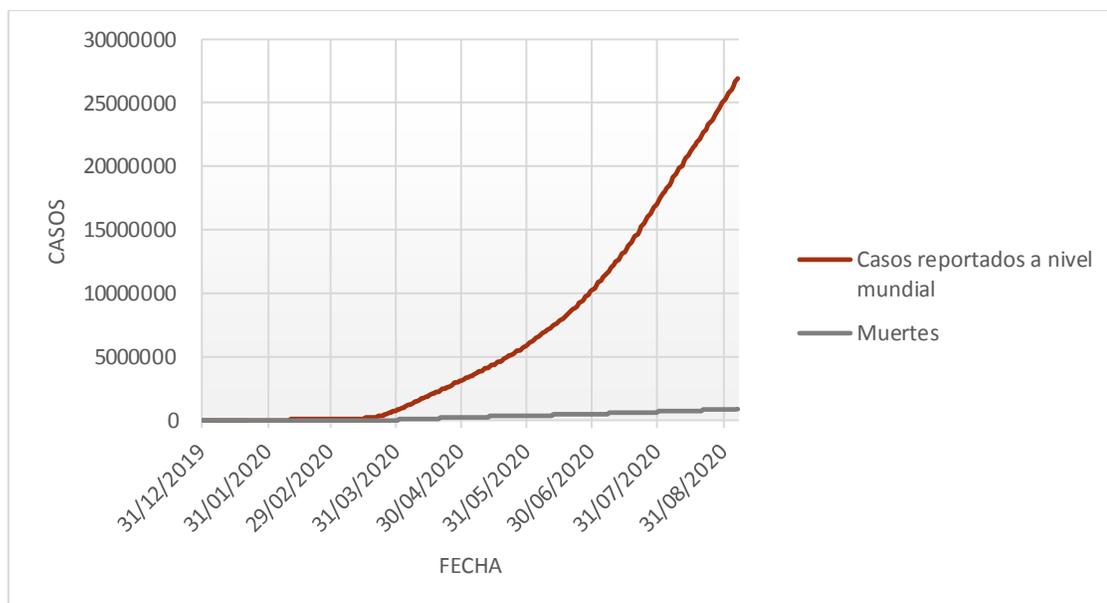
² La Real Academia Española (RAE, 2014) define el término fómite como sinónimo de fomes, que a su vez, significa: “Causa que excita y promueve algo”. En el área de la salud, se emplea para determinar al elemento inerte capaz de transportar y transmitir un patógeno.

³ La RAE (2014) define la palabra pandemia como: “enfermedad epidémica que se extiende a muchos países o que ataca a casi todos los individuos de una localidad o región”.

desarrollo para la prevención y respuesta ante la epidemia” (OMS, 2020b), dando inicio a una serie de actuaciones de diferentes organizaciones, a nivel mundial, con el fin de mitigar los efectos de la rápida propagación del virus.

El 3 de febrero de 2020, 34 días después de que se conociera sobre este virus, “se había propagado en 24 países e infectado a 17000 personas, el 99% de ellas en China” (Adhanom Ghebreyesus, 2020). En marzo, el número de casos confirmados a nivel mundial superó los 100000, detectándose su presencia en 146 países. A través de una declaración, la OMS recordó a “todos los países y comunidades que la propagación de este virus puede frenarse considerablemente o incluso revertirse si se aplican medidas firmes de contención y control” (2020a). Aun así, la cantidad de casos de contagio a nivel mundial continuó en ascenso, a principios del mes de septiembre ya se habían reportado más de 26,9 millones de casos, incluidos más de 880000 muertos (RTVE, 2020), como se observa en la figura 1.

Figura 1. Evolución de la cantidad de casos de Covid-19 en todo el mundo, al 6 de septiembre de 2020.



Nota: Gráfico elaborado a partir de *Distribución geográfica de los casos de COVID-19 en todo el mundo*, Centro Europeo para la Prevención y el Control de Enfermedades (ECDC, 2020).

Para el mes de diciembre, los muertos ya superaban 1,7 millones de personas. En respuesta y siguiendo las recomendaciones de la OMS, los países han implementado (en diferentes momentos de evolución de la enfermedad en su territorio) medidas de higiene para tratar de contener el virus, tales como la promoción del lavado de manos frecuente, el autocuidado (no tocarse los ojos, la nariz y la boca), la precaución al momento de toser o estornudar para evitar el contagio a personas cercanas, la desinfección de áreas comunes, entre otras (OMS, 2020c).

Dentro las medidas aplicadas para restringir el contacto físico entre las personas, se destacan la cuarentena, el aislamiento, el distanciamiento social y el confinamiento. Sánchez y de La Fuente (2020) explican las diferencias de estos términos: la cuarentena es el aislamiento, en un lugar determinado, de individuos posiblemente contagiados durante el periodo de incubación de la enfermedad; por su parte el aislamiento se emplea para definir la acción de impedir que las personas confirmadas de contagio salgan de un lugar determinado; el distanciamiento social es la restricción en el contacto físico, con el fin de evitar contagios por personas infectadas que no han sido identificadas como tal⁴, mientras que el confinamiento es de tipo comunitario e incluye diversas estrategias para reducir las interacciones sociales como el uso obligatorio de tapabocas, la suspensión del transporte, el cierre de fronteras y la prohibición de actividades como el turismo.

Las medidas que se implementaron como respuesta al problema de salud pública, tienen en común el impacto que han causado a nivel social, económico y ambiental a diferente escala en todo el mundo; llegando a crear una nueva realidad. Como lo señalan Nicola *et al.* (2020) la Covid-19 “ha tenido un efecto perjudicial en los sistemas sanitarios mundiales con un efecto dominó en todos los aspectos de la vida humana tal como la conocemos” (pág. 1).

En el ámbito social se han reportado impactos como el aumento de la población en condición de pobreza y pobreza extrema, la violencia de género e intrafamiliar, aumento de

⁴ Esta medida es importante para la contención de la Covid-19, ya que al existir pacientes asintomáticos se dificulta la identificación total de los contagiados y al no conocer esta información aumenta el riesgo, debido a que estas personas son portadores del virus y pueden transmitirlo, pero no desarrollan la enfermedad.

los casos de depresión y ansiedad, mayores dificultades de acceso a la educación formal, entre otros.

La pobreza extrema se mide como la cantidad de la población mundial (2020) que vive con menos de USD 1,90 al día. El Banco Mundial pronostica que la Covid-19 podría propiciar que, entre 71 y 100 millones de personas en el mundo pasen a considerarse en pobreza extrema en el año 2020, haciendo que la tasa global de este factor pase de 8,23% en el año 2019 a estar entre 8,82 y 9,18 %, aproximadamente de 632 a 669 millones de personas; siendo este el primer aumento desde 1998 cuando golpeó la crisis financiera asiática. Para medir la pobreza, se consideran dos líneas, ingresos inferiores USD 3,20 e inferiores a USD 5,50 al día, en las que se cree que llegarán 176 y 177 millones, respectivamente (Mahler, Lakner, Castañeda Aguilar, & Wu, 2020).

Así mismo, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) pronostica que en el 2020 la pobreza en América Latina aumentaría al menos 4,4%, es decir, 28,7 millones de personas más, respecto al año anterior; para un total de 214,7 millones de personas que equivalen al 34,7% de la población total de la región. Por su parte, la pobreza extrema aumentaría 2,6%, es decir 15,9 millones de personal, para un total de 83,4 millones de personas (NU. CEPAL, 2020). Con esta proyección, la brecha social se acentúa en la región debido a la pandemia.

Los efectos ocasionados en el ámbito económico son de gran magnitud, superior a las consecuencias que han tenido otras pandemias y epidemias, durante los últimos cuarenta años (Gössling, Scott, & Hall, 2020). Como lo manifiesta la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2020a) “La crisis ya ha repercutido ampliamente en el plano económico y en el mercado laboral, tanto en la oferta (producción de bienes y servicios) como en la demanda (consumo e inversión)”, afectando las cadenas de suministros en todo el mundo (pág. 2).

Durante los meses de enero a marzo de 2020 se perdió el equivalente a 155 millones de empleo a tiempo completo respecto al trimestre inmediatamente anterior. La OIT prevé que en el segundo semestre de 2020 el número ascienda a 400 millones de empleos a nivel mundial y una tasa de pérdida del 18,3 % en las américas (OIT, 2020b). Es importante la

implementación de políticas que fomenten la recuperación de los puestos laborales y dignifiquen las condiciones de aquellos trabajadores que se dedican a actividades informales.

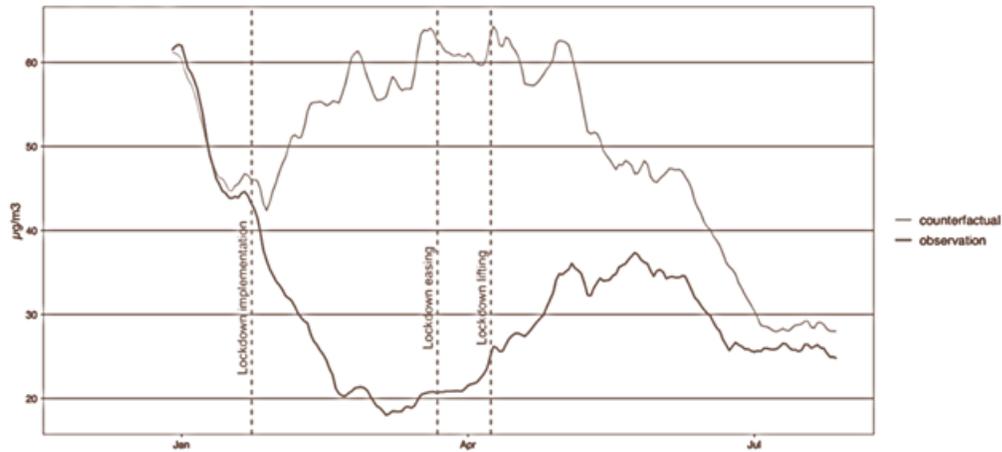
Así mismo, el turismo tuvo una drástica caída, la Organización Mundial del Turismo señala que el número de turistas internacionales se redujo en un 98% durante el mes de mayo en comparación con el año inmediatamente anterior, así como una disminución del 56% durante los primeros 5 meses de 2020; esto representa 300 millones de turistas menos y 320.000 millones de dólares estadounidenses en pérdidas, más del triple de la crisis económica global de 2009 (OMT, 2020). El turismo es un medio que propicia la propagación del virus, pero también es una víctima de las consecuencias de las medidas que se imponen para contenerlo, dejando en riesgo a millones de personas que dependen económicamente de esta actividad.

Debido a las limitaciones en las actividades sociales y económicas, el impacto en el medio ambiente natural a nivel mundial tiene, en su mayoría, consecuencias positivas, ya que disminuyen significativamente los niveles de contaminación. En la atmosfera esta situación se refleja con la disminución en la concentración de gases como Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Carbono (CO₂), durante la aplicación de medidas restrictivas en diferentes países.

El Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio (CREA) encontró que la concentración de NO₂ en Wuhan – China disminuyó considerablemente, respecto al nivel contrafactual⁵, a partir del momento en el que se implementaron las medidas de bloqueo (Thieriot, 2020), como se puede observar en la figura 2, el contaminante llegó a estar por debajo de los 20 µg/m³ cuando se esperaba que superara los 50 µg/m³. El Dióxido de Nitrógeno es un contaminante gaseoso que tiene influencia sobre otros contaminantes y propicia la aparición de lluvia ácida; la exposición prolongada a NO₂ produce en las personas, principalmente, enfermedades respiratorias.

⁵ El nivel contrafactual hace referencia a las estimaciones esperadas de un parámetro a partir de observaciones pasadas.

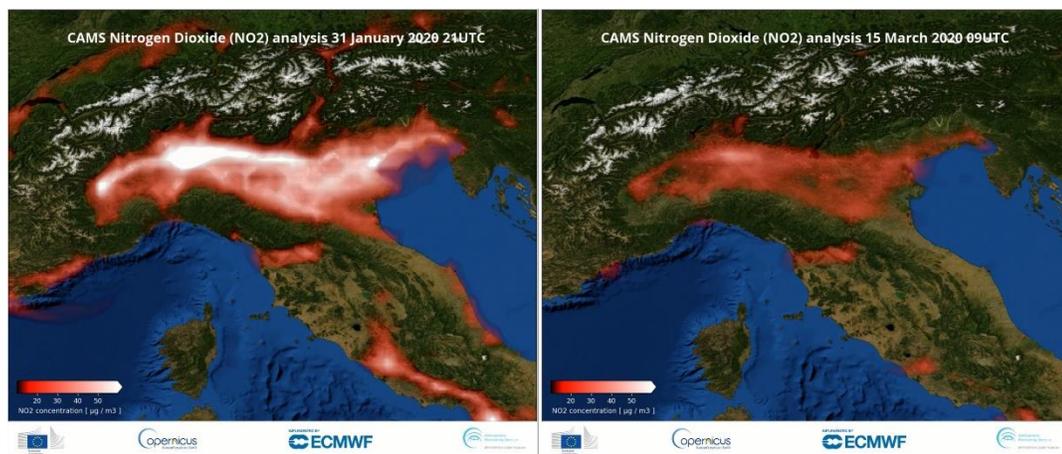
Figura 2. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de NO_2 proyectadas y observadas durante las medidas de bloqueo por la Covid-19.



Nota: Adaptado de *Niveles de NO_2 observados y contrafactuales en Wuhan en 2020*, Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio (CREA) (Thieriot, 2020).

Como se observa en las figuras 3 y 4, la disminución de NO_2 en la atmósfera también se evidenció en otros países como Italia, donde la tasa fue de -10% por semana, entre el 31 de enero y el 15 de marzo (CAMS, 2020) y China donde la reducción estuvo entre el 10 y 30% durante enero y febrero del año 2020 en comparación con la misma época de años anteriores (2005 a 2019) (NASA en español, 2020).

Figura 3. Concentraciones de NO_2 en el norte de Italia.

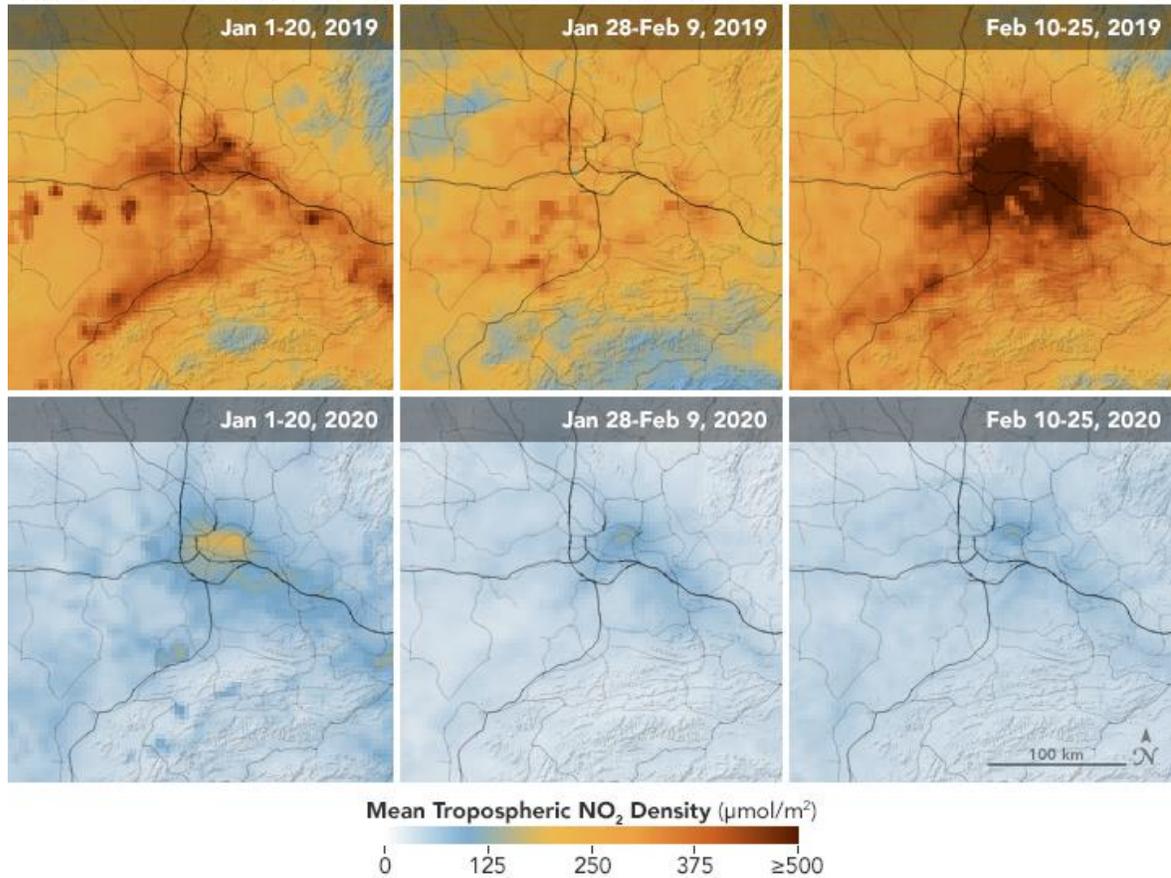


Nota: Adaptado de *Concentraciones superficiales de dióxido de nitrógeno sobre el norte de Italia*, Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus (CAMS, 2020).

Figura 4. Comparación de la concentración de NO₂ en China entre 2019 y 2020.

Pollutant Drops in Wuhan—and Does not Rebound

Unlike 2019, NO₂ levels in 2020 did not rise after the Chinese New Year.



Nota: Adaptado de *El contaminante cae en Wuhan y no se recupera*, de la NASA y la Agencia Espacial Europea (NASA en español, 2020).

Los principales emisores de este agente contaminante son el tráfico y la quema de combustibles fósiles (OMS, 2003). Por lo tanto al detenerse las actividades humanas, las fuentes de esta contaminación dejaron de producir o disminuyeron las emisiones gases de efecto invernadero, mejorando la calidad del aire.

De igual manera, las emisiones de CO₂ han disminuido significativamente, se espera que durante el 2020 se presencie la mayor caída anual de emisiones de CO₂, en comparación con las crisis económicas o períodos de guerra anteriores (Evans, 2020). Esto obedece a la caída en la demanda de energía eléctrica a nivel mundial.

Durante el primer trimestre de 2020 las emisiones diarias globales de CO₂ disminuyeron en un 17%, debido a que la demanda mundial de carbón se redujo casi un 8%, la de petróleo un 5%, la de gas natural un 2%, la de electricidad alrededor del 20%; en relación con el mismo periodo de año anterior. Por su parte, la demanda de energía renovable aumentó en aproximadamente un 1,5% en respuesta a la implementación de nuevos proyectos eólicos y solares. Con base en estos datos, la Agencia Internacional de Energía, estima que durante el 2020 “las emisiones globales de CO₂ disminuirán en un 8%, o casi 2,6 gigatoneladas (Gt), a niveles de hace 10 años” (IEA, 2020).

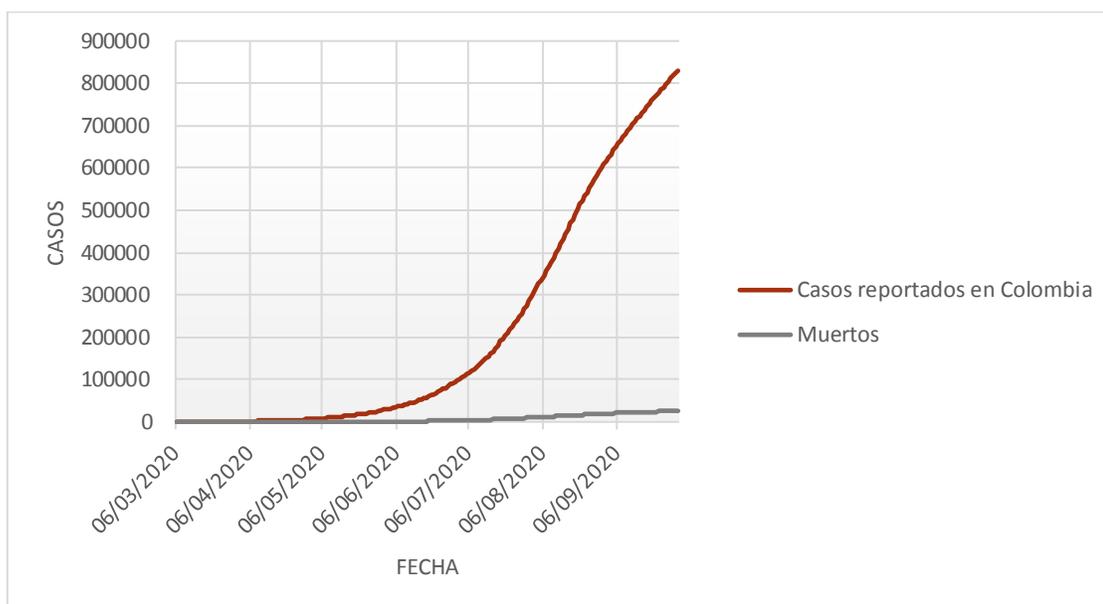
A pesar de que la disminución en las emisiones de CO₂ fue significativa durante el primer semestre del año, en el mes de mayo se presentó un aumento sin precedentes de la concentración atmosférica de ese gas, en toda la historia de la humanidad. Los expertos advierten que la reducción que se logró no apaciguará el cambio climático, sino que por el contrario se espera un efecto rebote proporcional a la reactivación económica global, en la que los gobiernos, en su afán por dar solución a la crisis socioeconómica, se sentirán inclinados a reiniciar la industria de combustibles fósiles (Borunda, 2020).

Dentro de los impactos ambientales, se encuentra la reducción de cerca de un tercio de las vibraciones causadas por las actividades humanas sobre la corteza terrestre, denominadas por los geólogos como “ruido sísmico”. Este efecto se observó en estaciones sísmicas de diferentes ciudades alrededor del mundo, tales como Bruselas, Zurich, Londres, París y Los Ángeles. La reducción de las vibraciones tiene un efecto positivo sobre la detección de pequeños sismos, mejorando los estudios de la corteza (BBC NEWS, 2020).

En oposición a los impactos positivos descritos anteriormente, se encuentra el aumento en la producción, consumo y desecho de elementos de protección personal fabricados con plástico como mascarillas, guantes, gafas, pantallas protectoras faciales y equipos médicos como respiradores, ventiladores, jeringas de policarbonato, jeringas, bolsas de sangre; entre otros (Eljarrat, 2020). Como estos residuos no pueden ser reciclados debido al riesgo biológico que representan, terminan incinerados, en rellenos sanitarios o contaminando ecosistemas acuáticos y terrestres.

En Colombia, el primer caso de Covid-19 se reportó el día 6 de marzo de 2020, para el 1 de octubre ya se reportaban 829679 casos confirmados, dentro de los cuales se registraron 25998 decesos (figura 5). El pico más alto de contagios diarios se alcanzó el 19 de agosto, cuando se presentaron 13056 casos, fecha a partir de la cual las cifras empezaron a disminuir, observándose un ligero aplanamiento de la curva.

Figura 5. Evolución de la cantidad de casos de Covid-19 en Colombia, al 1° de octubre de 2020 (datos acumulados).



Nota: Gráfico elaborado a partir de *Distribución geográfica de los casos de COVID-19 en todo el mundo*, Centro Europeo para la Prevención y el Control de Enfermedades (ECDC, 2020).

El gobierno nacional ha implementado medidas de contención, que al igual que en otros países, han generado impactos en todos los aspectos de la vida. Con la Resolución 385 del 12 de marzo de 2020, el Ministerio de Salud y Protección Social declaró la emergencia sanitaria por causa de la Covid-19 y se adoptaron medidas sanitarias, preventivas de aislamiento y cuarentena, para hacer frente al virus.

La fase de aislamiento preventivo obligatorio terminó el día 1° de septiembre y el país entró en una etapa denominada aislamiento selectivo, con el fin de permitir una reactivación económica. Ámbito en el cual, se esperaba para este año un crecimiento cercano

al 3,5%; sin embargo los principales resultados señalan pérdidas económicas entre \$4,6 billones y \$59 billones por mes, cifras que representan entre 0,5% y 6,1% del PIB nacional (Bonet Morón, y otros, 2020).

Por su parte, la tasa de desempleo aumentó en el país, en el mes de mayo se ubicó en 21,4 % (en mayo de 2019 fue de 10,5 %), lo que representa la pérdida de 4,9 millones de empleo (Revista Semana, 2020a). Para el mes de agosto de 2020, la tasa de desempleo del total nacional fue 16,8%⁶, frente al 10,8% registrado en el mismo mes el año anterior (DANE, 2020). Se evidencia una disminución del desempleo entre mayo y agosto, que obedece a la reactivación económica, sin embargo la cifra sigue siendo superior a la presentada en el 2019.

Al igual que el desempleo, la pobreza multidimensional⁷ aumentó con la pandemia. Entre el 2018 y el 2019 se presentó una disminución del 19,1 al 17,5% (8,5 millones de personas) en este aspecto, cerca de 615.000 personas salieron de la pobreza. Sin embargo, Fedesarrollo estima que el efecto de la pandemia elevará la pobreza⁸ en Colombia al 38% (antes de la crisis era de 26,9 %), es decir, cerca de 19 millones de personas. La pobreza extrema⁹ se incrementaría desde 7,4% hasta 16,2% (Revista Dinero, 2020).

Sobre el componente ambiental, en Colombia se han reportado varios impactos, tanto positivos como negativos, durante la fase de aislamiento. Positivos como la reaparición de especies animales silvestres en zonas libres de turistas, como es el caso de los delfines observados en la zona costera de la bahía Santa Marta, las nuevas especies de aves avistadas en el Humedal Jaboque en Bogotá o los osos de anteojos paseando en Chinácota (Marca Colombia, s.f.); y negativos como el aumento de la deforestación en la amazonía, afectando

⁶ Según el DANE, en las 13 principales ciudades y áreas metropolitanas la cifra alcanzó los 24,5% en mayo y 19,6% en agosto.

⁷ Desde 2010, en Colombia la pobreza se mide a través del enfoque de ingresos (pobreza monetaria) y de acceso a bienes y servicios que garantizan unas condiciones mínimas de vida, lo que se conoce como pobreza multidimensional, para su estimación se analizan los aspectos de educación, condiciones de la niñez y la juventud, trabajo, salud, vivienda y servicios públicos (Galvis Arias, 2020).

⁸ Se considera a una persona en condición de pobreza si sus ingresos son inferiores a \$327500 mensuales (DANE como se citó en Revista Semana, 2020b).

⁹ Se considera a una persona en condición de pobreza extrema si sus ingresos son inferiores a \$137500 mensuales (DANE como se citó en Revista Semana, 2020b).

a más de 13443 especies de plantas y animales; debido al retiro de los entes de control por la pandemia (Morillo, 2020).

A nivel local, diferentes medios de comunicación publicaron noticias sobre los impactos socioeconómicos de la pandemia en el municipio de Villavieja, en el que una de las principales actividades económicas es el turismo en el Desierto de La Tatacoa¹⁰. Los medios reportaron el llamado que realizaron los más de 80 orientadores turísticos al gobierno nacional para solicitar ayudas que les permitieran afrontar la crisis de desempleo como consecuencia de la falta de turistas en el lugar (Noticias caracol, 2020). Son alrededor de 700 familias que dependen del turismo, el transporte y el comercio, las que se vieron afectadas por este problema.

En materia ambiental, antes de la pandemia se reportaban impactos como contaminación lumínica (LA FM, 2020), deterioro del ecosistema por la construcción dentro del área protegida y por la llegada masiva de turistas. Sin embargo, durante el tiempo de aislamiento, se observaron cambios positivos en la vegetación y la fauna, aumentando en calidad y cantidad.

Los impactos de la pandemia en el ecosistema objeto de estudio, han sido poco documentados, por lo cual este trabajo busca conocer y modelar a fondo el problema a nivel local, con el fin de que la comunidad se pueda anticipar a futuras situaciones similares. El problema se sintetiza en la figura 6.

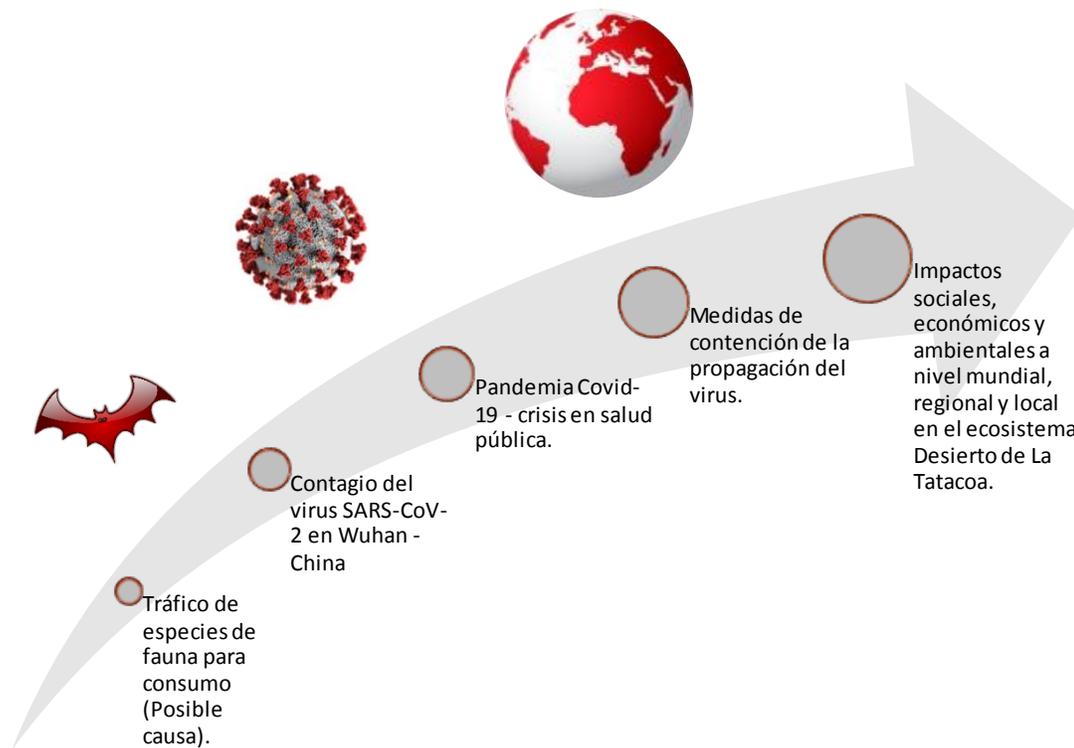
Al analizar el problema, se puede deducir que su comportamiento obedece al efecto mariposa, ya que a partir de una pequeña perturbación, el contagio del virus en un ser humano posiblemente por el consumo de un animal en Wuhan - China, hubo notables impactos socioeconómicos y ambientales en el ecosistema Desierto de La Tatacoa en Villavieja, Huila y el resto del mundo, generando una nueva realidad con un sinnúmero de posibilidades. Es inverosímil la relación que puede llegar a existir entre dos lugares geográficamente tan alejados.

¹⁰ Esta actividad se detuvo en el mes de marzo y se reactivó 1° de octubre de 2020.

Además el problema presenta auto-similitud en diferentes escalas globales, ya que los impactos en unas regiones se manifestaron en otras en mayor o menor magnitud, algo característico de los fractales.

Así mismo, se puede decir que esta investigación aborda un problema de frontera, es decir un problema que “interpela o bien convoca a diferentes métodos, tradiciones, lenguajes y disciplinas” (Maldonado, 2014, pág. 89); ya que para entenderlo y modelarlo se requiere el acercamiento e implementación de varias disciplinas, metodologías y programas computacionales, como se verá más adelante.

Figura 6. Síntesis del problema de investigación.



Enunciación del Problema

La pregunta de investigación que plantea este estudio es: ¿Cuáles impactos generaron la cuarentena, el aislamiento, el confinamiento y el distanciamiento social, decretados a raíz de la pandemia Covid-19, en el ecosistema Desierto de La Tatacoa a nivel social, económico y ambiental?

Sistematización del Problema

En la pregunta general anterior se encuentran contenidas las siguientes subpreguntas: ¿qué información aporta un modelo del ecosistema a esta investigación?, ¿cuáles principios del paradigma de la complejidad y sus enfoques se manifiestan en el ecosistema objeto de estudio y de qué manera?, ¿qué ocurrirá con el ecosistema cuando se levante la medida de aislamiento humano? y ¿qué ocurriría con el ecosistema si no se volvieran a practicar actividades turísticas allí?, ¿es posible que un evento negativo para la sociedad sea positivo para el ambiente? y ¿Viceversa? En el anexo A se presenta la matriz del problema que motivo la formulación de estas preguntas de investigación.

Antecedentes y Justificación

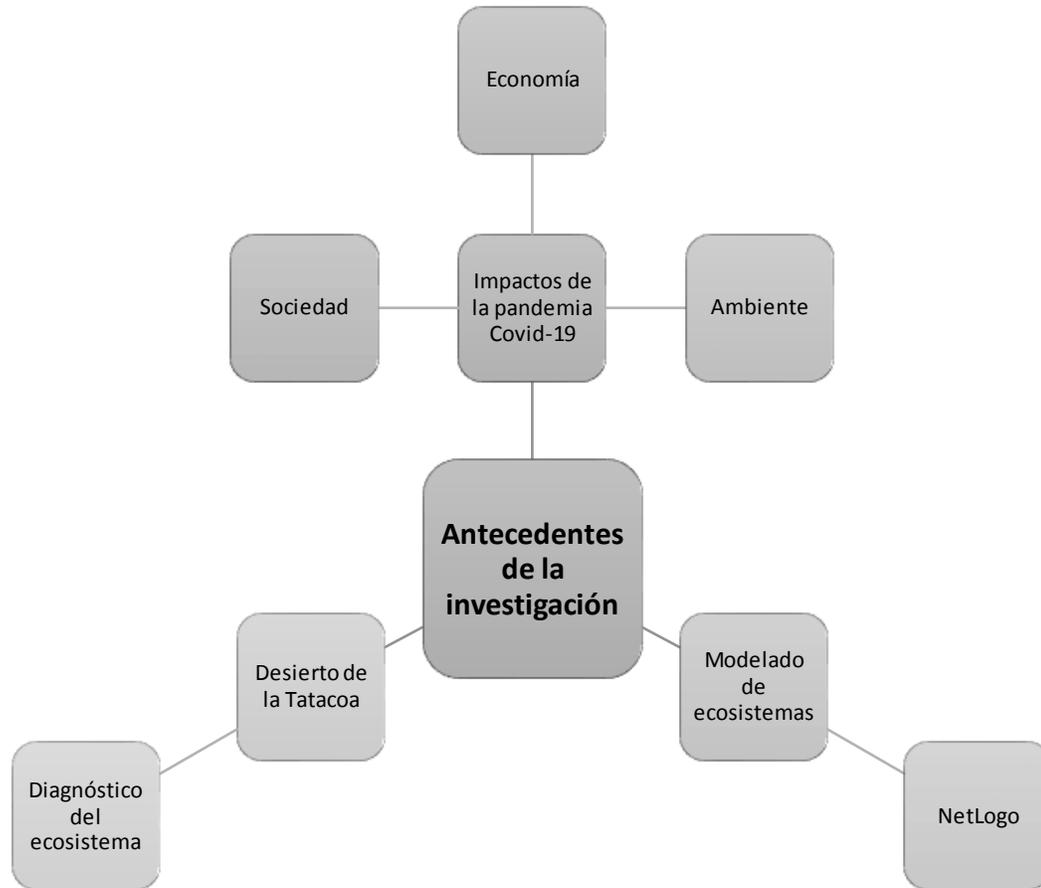
En este capítulo se presentan algunas investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo, que se encuentran relacionadas con el problema abordado y se describen los aportes metodológicos más importantes para el presente estudio. Asimismo se exponen las razones por las cuales es valiosa la realización de este trabajo.

Antecedentes

Desde que empezó la pandemia Covid-19, son múltiples las investigaciones que se han realizado para evaluar sus impactos desde las concepciones de distintos campos: la epidemiología, la educación, la psicología, la medicina, la política, la sociología, la economía, la biología, entre otros. A continuación se exponen los trabajos, más relevantes para esta investigación, que abordaron los impactos sociales, económicos y ambientales de la pandemia en otros lugares del mundo; así como algunos estudios de modelado de ecosistemas e investigaciones realizadas en el ecosistema Desierto de La Tatacoa para estudiar sus dinámicas. Dichos ejes temáticos se utilizaron para elegir los antecedentes y se presentan en la figura 7.

Carballo, Monterroza y López Tobar (2020) investigaron sobre el “Impacto Social del Covid-19 en el Salvador” durante el inicio de la pandemia, exponiendo la situación vivida en ese país en diferentes sectores de la sociedad (comercio, educación, salud, población en general); el objetivo de ese trabajo fue analizar dichas experiencias durante los meses de abril y mayo del año 2020, luego de que el gobierno implementara la cuarentena por la situación de emergencia. Emplearon un método biográfico narrativo a partir de la aplicación de entrevistas, abordando 18 categorías; de las cuales se tomaron 5, para la presente investigación (sentimientos que despierta la pandemia, principal temor, impacto de la pandemia a nivel personal, actividades que se vieron afectadas, apoyo que se le ha ofrecido) adaptándolas al instrumento de encuesta y permitiendo abordar los impactos sociales, ya no en un país, sino en un ecosistema estratégico del Huila; es decir a una escala menor.

Figura 7. Ejes temáticos utilizados para la elección de los antecedentes.



Al final, los autores concluyeron que la población salvadoreña de los sectores estudiados, está atravesando una situación de estrés personal y económico debido a un suceso sin precedentes. Además, se evidenció las limitaciones de la educación, la economía y la salud, que quedaron al descubierto ante la emergencia.

Por su parte, Lozano Chaguay, Lozano Chaguay y Robledo Galeas (2020) publicaron el artículo “Desempleo en tiempos de Covid-19: efectos socioeconómicos en el entorno familiar”, que buscó establecer los efectos en la familia por la pérdida de empleo, a raíz de los impactos de la pandemia sobre la producción de bienes y servicios. En esa investigación emplearon una metodología de carácter descriptivo, basada en la revisión bibliográfica de

fuentes primarias relacionadas con el problema que estudiaron. Al final, concluyeron que el desempleo tiene efectos psicológicos como la ansiedad, el estrés y la depresión sobre el individuo, que llegan a afectar directamente a la familia.

El aporte de ese trabajo a esta investigación, radica en que permitió identificar al desempleo como un impacto con implicaciones sobre la familia y configurar una cadena de relaciones de causa- efecto entre los agentes: producción de bienes y servicios – empleo – individuo – familia, que hace parte del modelo diseñado para entender las afectaciones de la pandemia en el desierto. El desempleo y la relación del individuo con su familia, se incluyeron en la encuesta aplicada en el municipio de Villavieja.

En el mismo sentido, pero con un enfoque más económico que social, Félix Mendoza y García Reinoso, (2020) realizaron un “Estudio de pérdidas y estrategias de reactivación para el sector turístico por crisis sanitaria Covid-19 en el destino Manta - Ecuador” analizando el impacto económico de la pandemia desde la mirada empresarial. En esa investigación se propusieron dos objetivos: el primero consistió en realizar un diagnóstico de las pérdidas ocasionadas por la emergencia sanitaria en el sector empresarial turístico durante marzo, abril y mayo, y el segundo, en identificar estrategias de reactivación como respuesta a la crisis. Para esto, implementaron una metodología denominada Diagnóstico – Seguimiento – Evaluación Participativa, que incluye la aplicación de encuestas, entrevistas y observaciones; permitiendo la elaboración de un diagnóstico del sector turístico en la región, en el que se concluye que es necesario implementar estrategias de reactivación que permitan superar la importante pérdida económica por no facturación e imposibilidad de solventar los gastos, en las empresas del sector en cuestión.

La investigación realizada en Manta – Ecuador, permite ver la importancia de analizar el impacto económico tanto en la población que se dedica a trabajar independientemente como en las empresas, con el fin de proponer un diagnóstico sistémico de la realidad estudiada. Es por eso, que se incluyeron datos sobre las medianos y pequeñas empresas del turismo en Villavieja.

En relación con el estudio de los impactos de la pandemia en la naturaleza, Oyague, Yaja y Franco, (2020) realizaron el trabajo denominado “Efectos ambientales del

confinamiento debido a la pandemia de COVID-19: evaluación conceptual y análisis de datos empíricos en Tacna, marzo–abril 2020”, el cual buscó realizar un análisis objetivo de esos posibles impactos positivos y/o negativos. Para ello, emplearon técnicas para la valoración de las alteraciones y análisis indirectos basados en información satelital. Las variables estudiadas son las emisiones de NO₂ y CO, el contenido de clorofila en el litoral de Tacna y el vigor de la vegetación agrícola durante los meses de marzo y abril, de los años 2019 y 2020. Todos los impactos ambientales identificados fueron de carácter positivo, lo que les permitió concluir que el ecosistema migra hacia un estado eficiente cuando se reduce la presión ejercida por las personas.

Las emisiones de gases contaminantes y el estado de la cobertura vegetal, son variables que se contemplan en el presente estudio, por lo cual el trabajo realizado por Oyague, Yaja y Franco representa un aporte metodológico para obtener y analizar información satelital referente a los impactos ambientales.

Sin embargo, no todos los impactos de las medidas impuestas a raíz del Covid-19 son positivos, Alarcón Holguín (2020) investigó la alteración generada por la alta demanda y disposición inadecuada de elementos de protección personal relacionados con la pandemia; en su trabajo denominado “Equipos de protección para coronavirus Covid-19 y su impacto ambiental en Playita Mía, Manta”, cuyo objetivo fue determinar el impacto de dichos elementos en la playa objeto de estudio. Para ello utilizó diferentes técnicas: observación *in situ*, aplicación de una matriz de impactos, encuestas y ficha ambiental, revisión bibliográfica. El autor concluyó que el manejo incorrecto de los equipos de protección personal genera impactos ambientales negativos; moderados en suelo y aire, y severos en el mar y el paisaje natural.

El trabajo de Alarcón Holguín revela que los impactos en la naturaleza originados por las medidas de contención de la Covid-19 no solo pueden ser positivos sino también negativos; por cual se incluye la variable “residuos” en el análisis sistémico realizado al Desierto de La Tatacoa para determinar su impacto.

En cuanto al modelado de ecosistemas, Pita Merino (2014) realizó el trabajo denominado “Implementación de un modelo dinámico simplificado y análisis de la

Sostenibilidad sobre el caso del turismo en las Islas Galápagos”, ese estudio aborda el problema de la presión del sistema capitalista sobre los recursos naturales, que pone en riesgo la sostenibilidad; lo cual se manifiesta en el ecosistema objeto de estudio con los impactos generados por el turismo.

Esa investigación tuvo por objetivo crear un modelo del sistema involucrando el medio ambiente, la sociedad y la economía, para lo cual se utilizó como metodología la dinámica de sistemas, que permite entender las relaciones causales de un conjunto de elementos. Se elaboró un modelo conceptual a partir de los datos históricos recopilados de las variables, empleando el programa NetLogo.

Al final se concluyó que el modelo no logró reproducir las dinámicas reales en su totalidad, pero si representa una aproximación importante de simulación de la sostenibilidad del modelo turístico en el ecosistema, ya que integra las dinámicas de los elementos a partir de sus relaciones causales, permitiendo la identificación de patrones de comportamiento. Al igual que en este proyecto, se realizó un modelo de un ecosistema influenciado por el turismo aplicando el mismo programa; por lo tanto ese estudio representa un insumo metodológico para el diseño teórico y práctico, así como para la elección de algunas variables y del *software* a utilizar.

Empleando el mismo *software*, Villegas González *et al.* (2016), elaboraron una “Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos Complejos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana”. El ecosistema estudiado presenta alteraciones en su dinámica hidrobiológica que causa inundaciones, debido al inadecuado uso del suelo y la construcción de obras civiles, amenazando la sostenibilidad en la zona. Los autores propusieron un modelo integrado y participativo basado en agentes, en el que se integran elementos del ecosistema y la población; para lo cual realizaron talleres con las comunidades locales y diseñaron un modelo que incluye los componentes hidrodinámica, población y suelo. Finalmente, destacan la importancia de los modelos en la toma de decisiones y recomiendan que la información se valide con la comunidad, incluyéndola en el proceso.

Teniendo en cuenta que el proceso de modelado puede llegar a ser subjetivo, toma relevancia la inclusión de la comunidad que hace uso del territorio en cuestión y de expertos

que conozcan las dinámicas del sistema, para la interpretación del mismo y la elección de las variables a estudiar de forma objetiva.

A nivel local, en el Desierto de La Tatacoa se han desarrollado múltiples investigaciones para entender las dinámicas internas del ecosistema y sus relaciones con agentes externos, desde diferentes enfoques, componentes y disciplinas. Por ejemplo, Giraldo Uribe, Sánchez Muñoz y Ruíz Agudelo (2020) realizaron la investigación denominada “Propuesta de indicadores ambientales para un turismo sostenible en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia”, en la cual se contempla el problema de la presión ejercida por la actividad turística en el medio natural y se realiza un valoración de indicadores ambientales del año 2019, expresada a través del Índice Ambiental para el Turismo Sostenible (IATS). Con este trabajo, los autores lograron cuantificar y plasmar parte de las afectaciones ambientales del turismo en solo 8 de los 28 indicadores que propone la Organización Internacional del Turismo, debido a la escasa y/o poco fiable información estadística de las variables, disponible.

Estudiando el mismo problema, Puentes Ruíz y Esguerra Cabrera (2018) desarrollaron el trabajo de grado “Sostenibilidad ambiental del turismo en el Distrito Regional de Manejo Integrado La Tatacoa, municipio de Villavieja, departamento del Huila”, cuyo objetivo principal consistió en analizar la incidencia de la actividad turística en el área de estudio y las relaciones que deben darse entre los actores sociales para propiciar el desarrollo sostenible. La metodología empleada es de carácter descriptivo y permitió realizar un diagnóstico, a partir del desarrollo de 5 fases: revisión documental, identificación de actores locales y regionales, observación de campo, implementación de instrumentos de recolección de datos (entrevista y encuesta) y consolidado de los resultados. Lo anterior permitió identificar impactos como: la generación de residuos sólidos, contaminación hídrica, erosión y afectaciones de la flora y fauna. El trabajo concluyó que aunque se cuenta con instrumentos de planificación, donde se propone la zonificación del ecosistema, estos no se cumplen (ocasionando impactos ambientales). Se requiere de la articulación de los diferentes actores para promover el turismo como reglón estratégico de la economía local, pero de forma sostenible.

Las dos últimas investigaciones descritas, representan un punto de partida para entender las afectaciones del turismo (de forma cualitativa y cuantitativa) y el estado de conservación del ecosistema antes de la pandemia Covid-19.

Uno de los impactos ambientales más estudiados en el Desierto de La Tatacoa y sus alrededores, es la desertificación causada por factores ambientales y antropogénicos. En ese sentido, Ortiz Palma y Mayor Polanía (2013) trabajaron en la “Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de La Tatacoa. Periodo: 1075 a 1993” utilizando fotografías aéreas georreferenciadas de los años 1975 y 1993 y el *software* ARGIS 10.1. Los autores concluyeron que el proceso de desertificación fue creciente con una tasa de 281 ha/año, lo que representa un total de 5078 ha degradadas durante los 18 años del estudio.

Sin embargo, Rojas Marín, Pérez Gómez, y Fernández Méndez (2019) encontraron una tendencia de recuperación del suelo (aunque en un periodo de tiempo diferente al analizado en la investigación anterior), en su trabajo denominado “Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia” con los objetivos de evaluar la estabilidad de las coberturas del suelo en el lugar e identificar las áreas donde se hace evidente la pérdida o recuperación de vegetación natural y su variación espacial en el tiempo, durante un periodo de 23 años que comprende desde 1987 hasta 2010.

Los autores emplearon imágenes satelitales correspondientes a la primera época seca de 3 años que cubren el rango temporal estudiado. Posteriormente se les aplicó una corrección geométrica y atmosférica, se clasificaron digitalmente las imágenes y se realizó un análisis multitemporal. Esto permitió concluir que durante el periodo de estudio, en el área, la cobertura vegetal conformada por arbustos, matorrales y fragmentos de bosque aumentó, mientras que las tierras desnudas o degradadas disminuyeron. Es decir que disminuyó la desertificación en la zona.

La cobertura vegetal es una variable que cambia con el tiempo, en relación a las presiones naturales y antrópicas a las que se somete. Es importante incluirla en el presente trabajo, ya que en la observación de campo se identificaron cambios positivos en ese aspecto

durante el tiempo en el que se suspendió el turismo en la zona, como se mencionó en la descripción del problema. Aunque en los dos trabajos citados anteriormente los resultados son opuestos, representan una guía metodológica para el análisis de imágenes satelitales que pueden ayudar a entender el impacto de la desertificación.

En oposición a los impactos en La Tatacoa, algunos autores han planteado iniciativas que contribuyen a la conservación del ecosistema. Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, y Tovar (2000) propusieron “Directrices para la zonificación, uso y manejo del desierto La Tatacoa”, a partir de un diagnóstico, actual (año 2000) y potencial, del área de estudio, incluyendo factores como las categorías uso del suelo, las oportunidades y amenazas y los objetivos para la zonificación. Los autores definieron 7 zonas de manejo: 1) intangible o científica, 2) primitiva, 3) recreación general exterior o de uso extensivo, 4) zona de recreación de alta densidad de uno o de uso intensivo, 5) histórico – cultural, 6) amortiguación, y 7) recuperación natural. Al final, concluyeron que La Tatacoa tiene valores naturales, que se manifiestan en su desarrollo geológico, los hallazgos paleontológicos, los asentamientos prehistóricos, las zonas áridas y semiáridas, y su imponente paisaje. Por lo cual, es importante la formulación de alternativas de uso y manejo en relación con una zonificación que contribuya a la ampliación del conocimiento científico y al desarrollo socioeconómico de la región.

Así mismo, en el libro “La Tatacoa: Ecosistema Estratégico de Colombia” se reúne el trabajo realizado por varios profesores de la Universidad Surcolombiana y funcionarios del Instituto Huilense de Cultura (actualmente es la Secretaría Departamental de Cultura) en el Desierto de La Tatacoa; desde diferentes disciplinas. En el capítulo VIII, Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, y Tovar (2001) realizan una “Propuesta básica de un área de manejo especial para el Desierto de La Tatacoa”, en relación con su uso, protección y administración. A partir de la implementación de matrices para jerarquizar y relacionar Objetivos y Usos del territorio, se identificó que el Área Natural Única (ANAUN) y el Distrito de Manejo Integrado de Recursos Naturales (DIMIR) son las categorías que permiten un mejor uso de la Tatacoa.

Los estudios realizados por Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, y Tovar (2000 y 2001) son la base por la cual se emitió, en el año 2014¹¹, la declaratoria del área como Distrito Regional de Manejo Integrado La Tatacoa, reglamentando sus usos, la zonificación y las condiciones para intervenirlo.

Los trabajos analizados en este capítulo se clasifican en la tabla 1 de acuerdo al área de estudio en investigaciones internacionales, nacionales y locales. Estos estudios brindan una visión amplia de las variables que se estudian en esta investigación; así como de los métodos y técnicas que se pueden utilizar con el fin de obtener la información primaria; ya que son estudios realizados tanto en el ecosistema Desierto de la Tatacoa, como en otros escenarios a nivel mundial antes y durante la pandemia.

Esta revisión también permitió comprender que el modelado de sistemas dinámicos complejos, es una labor que incluye múltiples dinámicas y que, en ocasiones, se debe simplificar el modelo para que este se adapte a la realidad; tomando las variables más relevantes para el propósito del estudio y de las cuales se cuenta con datos históricos o se puedan adquirir.

Como regla general, en las investigaciones en cuestión se analizan variables sociales, económicas o ambientales; pero en la presente investigación se pretende integrar los tres tipos, con el fin de realizar un estudio complejo.

¹¹ Según Acuerdo No. 008 del 25 de septiembre de 2014 emitido por el Consejo Directivo de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM).

Tabla 1. Clasificación de los antecedentes según su territorio de estudio, respecto al de la presente investigación.

Clasificación	Trabajo	Autor(es)	Año
Internacional	Implementación de un modelo dinámico simplificado y análisis de la Sostenibilidad sobre el caso del turismo en las Islas Galápagos.	Pita Merino	2014
	Impacto Social del Covid-19 en el Salvador.	Carballo, Monterroza y López Tobar.	2020
	Desempleo en tiempos de Covid-19: efectos socioeconómicos en el entorno familiar en Ecuador.	Lozano Chaguay, Lozano Chaguay y Robledo Galeas.	2020
	Estudio de pérdidas y estrategias de reactivación para el sector turístico por crisis sanitaria Covid-19 en el destino Manta – Ecuador.	Félix Mendoza y García Reinoso.	2020
	Efectos ambientales del confinamiento debido a la pandemia de COVID-19: evaluación conceptual y análisis de datos empíricos en Tacna, marzo–abril 2020.	Oyague, Yaja y Franco.	2020
	Equipos de protección para coronavirus Covid-19 y su impacto ambiental en Playita Mía, Manta.	Alarcón Holguín	2020
	Nacional	Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos Complejos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana.	Villegas González et al.
Local	Directrices para la zonificación, uso y manejo del desierto La Tatacoa.	Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, y Tovar.	2000
	Propuesta básica de un área de manejo especial para el Desierto de La Tatacoa.	Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, y Tovar.	2001
	Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema	Ortiz Palma y Mayor Polanía.	2013

Clasificación	Trabajo	Autor(es)	Año
	estratégico desierto de La Tatacoa. Periodo: 1075 a 1993.		
	Sostenibilidad ambiental del turismo en el Distrito Regional de Manejo Integrado La Tatacoa, municipio de Villavieja, departamento del Huila.	Puentes Ruíz y Esguerra Cabrera.	2018
	Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia.	Pérez Gómez, y Fernández Méndez.	2019
	Propuesta de indicadores ambientales para un turismo sostenible en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.	Giraldo Uribe, Sánchez Muñoz y Ruíz Agudelo.	2020

Justificación

Para combatir los estragos en la salud pública de la Covid-19 en el mundo, los gobiernos han implementado medidas como la cuarentena, el aislamiento, el distanciamiento social y el confinamiento, para evitar el contacto entre las personas y lograr reducir la tasa de contagio del virus que provoca la enfermedad. Estas estrategias han causado impactos a nivel social, económico y ambiental a diferentes escalas, tal es el caso del Desierto de la Tatacoa, donde el turismo se detuvo durante los meses de marzo a septiembre del año 2020, generando nuevas dinámicas en el complejo ecosistema.

Con el ánimo de explicar las implicaciones de las medidas de contención a escala local en el enclave La Tatacoa ubicado en el municipio de Villavieja - Huila, esta investigación se propone diseñar un modelo del ecosistema en NetLogo, empleando los principios, atributos y teorías que los enfoques del paradigma de la complejidad (el pensamiento complejo, el enfoque sistémico y las ciencias de la complejidad) aportan al estudio de los sistemas complejos. Asimismo, se busca describir dos escenarios futuros posibles: el primero, con la reactivación del turismo y el segundo, con un aislamiento humano prolongado.

Para lograrlo, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva en torno a la evaluación de los impactos de la pandemia a nivel mundial, el modelamiento de ecosistemas, el diagnóstico del enclave objeto de estudio, así como de los fundamentos teóricos relacionados con los enfoques del paradigma de la complejidad, los ecosistemas estratégicos y la sostenibilidad. También, se aplicaron encuestas para determinar los cambios socio-económicos y se procesaron imágenes del satélite estadounidense de observación terrestre Landsat 8, con lo cual se pudo establecer la variación del área en la cobertura vegetal.

El modelo de los impactos de la pandemia en el ecosistema representa herramienta metodológica que aporta este trabajo, para la toma de decisiones gubernamentales y la preparación ante próximas catástrofes como la que se está viviendo actualmente, no solo en este ecosistema sino también en otros alrededor del mundo, ya que la situación presenta similitudes en diferentes escalas y lugares.

Esta es una propuesta innovadora, toda vez que emplea tecnología de punta para el análisis de los agentes, relaciones y dinámicas del sistema; integrando diversas disciplinas para comprender, o al menos intentarlo, un problema tan apasionante como complejo, el de un virus que un día empezó a habitar en las personas, cambiándoles la realidad por completo.

Las ciencias clásicas, han abordado los problemas a partir de la especialización, la simplificación, desligando sus elementos; con este trabajo se pretende mostrar que es posible lo divergente, entrelazar y encontrar espacios comunes entre conceptos que parecían lejanos, para entender al sistema como una unidad en relación con sus elementos y a sus elementos a partir del todo.

Se espera que con el tiempo, las investigaciones en ecosistemas y otros campos relacionados con los sistemas complejos, migren más hacia las ciencias revolucionarias y menos hacía la ciencia normal. Ya que esto permitiría un conocimiento más profundo de las posibilidades emergentes de la estrecha relación entre la evolución y la entropía, como flechas del tiempo productoras de complejidad en el sistema, fenómeno o problema.

Fundamentos Teóricos

A continuación se describen los principales ejes temáticos que sustentan esta tesis y permiten situarla dentro de un conjunto de definiciones y conceptos que dan soporte al problema, a la metodología y al análisis de los resultados, desde la perspectiva de la complejidad.

Una aproximación al paradigma de la complejidad

Las ciencias clásicas estudian la realidad separando al sujeto y al objeto, y siguiendo la secuencia de observación/demostración/verificación/experimentación/comprobación, para tratar de imponer obsesivamente el orden sobre el caos (Da Conceição de Almeida, 2014), con el fin de “plantear las leyes que gobiernan los elementos fundamentales de la materia, de la vida” (Morin, 2004).

Pero, las leyes no obedecen al tiempo¹², en palabras de Antonio García Olivares (1999) “la ley es atemporal” (Pág. 93) y la realidad se compone de múltiples elementos, relaciones y manifestaciones individuales y colectivas; en diferentes escalas y atendiendo a la dualidad cíclica orden-desorden, en términos de Morin (2004): “no hay fenómeno simple”, son de complejidad creciente y evolucionan con el tiempo; aunque Maldonado (2014) difiere de este punto de vista al asegurar que “no todas las cosas son complejas y en numerosas ocasiones es incluso deseable que no lo sean o que no se vuelvan o hagan complejas” (pág. 72).

En todo caso, una investigación orientada a la construcción del conocimiento a partir de la realidad no debería fragmentarla, sino abordarla desde la noción de la complejidad, lo que permite ampliar la comprensión del fenómeno o problema que se esté estudiando, ya que revela conexiones simples e invisibles ante la mirada clásica de la ciencia y tradicional de la filosofía, pero que, en conjunto explican la complejidad del fenómeno.

¹² Un ejemplo de atemporalidad en la ciencia, es la ley de la gravitación universal, que permite estudiar la fuerza de atracción entre distintos cuerpos, obviando al tiempo.

Entonces, ¿qué es la complejidad?¹³ Maldonado (2003) señala que determinar qué es complejidad y cómo medirla en un sistema, representa un problema difícil en ciencia y filosofía. No existe una sola definición de complejidad, para Elizalde Prada (2013) “la complejidad ha sido homologada y reducida¹⁴ a una sumatoria de elementos diversos, difíciles y prácticamente indescifrables” (Pág. 46). Para Morin (2004), es irracionalidad, incertidumbre, angustia, desorden, es una aventura, es una noción más lógica que cuantitativa, es una invitación a definir y a explorar. Este término no se puede definir de manera simple¹⁵, ya que alude a múltiples interpretaciones. Morin (1994) advierte que la complejidad expresa turbación, confusión e incapacidad para simplificar las ideas y define a la complejidad como:

Un tejido de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados: presenta la paradoja de lo uno y lo múltiple. Al mirar con más atención, la complejidad es, efectivamente, el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico. Así es que la complejidad se presenta con los rasgos inquietantes de lo enredado, de lo inextricable, del desorden, la ambigüedad, la incertidumbre... (pág. 17)

Desde un punto de vista menos abstracto, González (2009) la define como “una forma de analizar, de reflexionar sobre determinados aspectos de la naturaleza, la sociedad y el pensamiento, los cuales presentan ciertas características que los clasifican como sistemas de comportamiento complejo” (pág. 243). Cabe resaltar que las buenas ciencias no trabajan con definiciones, sino con problemas, en este caso, la cuestión es la complejidad (Maldonado & Gómez Cruz, 2011).

¹³ Complexus, si se habla de su etimología, que significa “lo que está tejido en conjunto” (Morin, 1994, pág. 17).

¹⁴ La RAE (2014) define, brevemente la complejidad como “cualidad de lo complejo” y elementalmente al término complejo como aquello “que se compone de elementos diversos”, que es “complicado” o se refiere al “conjunto o unión de dos o más cosas que constituyen una unidad”.

¹⁵ Según Morin (1994) una primera aproximación al término de complejidad define que: “es complejo aquello que no puede resumirse en una palabra maestra, aquello que no puede retrotraerse a una ley, aquello que no puede reducirse a una idea simple”.

Históricamente hablando, la complejidad es joven, surge como una revolución científica, es decir, una transición a nuevos paradigmas. Para Kuhn (1971) el término paradigma hace referencia a “realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica” (Pág. 33); el autor, posteriormente transformó esa definición, hacia el paradigma como una constelación de creencias, valores, técnicas y soluciones concretas a problemas, compartidas por los integrantes de una comunidad y que empleadas como modelos pueden remplazar reglas explícitas para dar solución a los problemas que se excluyen en la ciencia normal..

La revolución hacia el paradigma de la complejidad es reciente pero enérgica y vertiginosa. Alrededor de los años 1960s surge uno de los intentos por aproximar diversos conocimientos: la epistemología. Para Cebeiro & Watzlanick (1998), este término “deriva del griego episteme, que significa conocimiento, y es una rama de la filosofía que se ocupa de todos los elementos que procuran la adquisición de conocimiento, e investiga los fundamentos, límites, métodos y la validez del mismo” (Pág. 56). Dos de los representantes de esta ciencia son G. Bachelard, quien aportó la noción de obstáculo epistemológico para referirse a “las dificultades específicas que no permitían una apropiación adecuada de la realidad” (Villamil Mendoza, 2008) y J. Piaget con su aporte sobre la epistemología de las relaciones interdisciplinarias.

Sin embargo, las ciencias de la complejidad ya habían tenido su origen con el trabajo científico, lógico y filosófico, realizado por Newton y Leibniz sobre el movimiento impredecible, regular y variable, es decir, sobre los sistemas dinámicos. A principios del siglo XX, H. Poincaré “sienta las bases para lo que más adelante será el estudio de fenómenos, sistemas y comportamientos caóticos” a partir de análisis simplificado que realiza del movimiento del sol respecto de otros cuerpos, logrando profundizar en un fenómeno complejo. (Maldonado & Gómez Cruz, 2011, pág. 15). Posteriormente, surgieron las ciencias de la complejidad, que se explican más adelante.

Los primeros institutos dedicados a investigaciones en complejidad, se crearon a partir de los años 1970s (Maldonado & Gómez Cruz, 2011):

- 1978: Centro de Estudios para la Dinámica No-Lineal en el Instituto La Jolla;
- 1980: Instituto Santa Cruz para la Ciencia No-Lineal del Colectivo de Caos de Santa Cruz;
- 1981: Instituto para la Ciencia No-Lineal en la Universidad de California en Davis;
- 1984: Instituto Santa Fe (SFI por su siglas en inglés), dedicado a las ciencias de la complejidad.

Existen 3 concepciones reconocidas de investigaciones en complejidad (figura 8): 1) el pensamiento complejo¹⁶ como método de aproximación al mundo y al ser humano para entender la realidad, sin acudir a interpretaciones simplificadas y reduccionistas, 2) el enfoque o pensamiento sistémico¹⁷ que consiste en estudiar el todo a través de las relaciones, nodos y sinergias que lo componen y 3) las ciencias de la complejidad¹⁸ que se ocupan de los fenómenos, sistemas y comportamientos de complejidad creciente; estos enfoques cuestionan la separación sujeto-objeto y a su vez permiten un mejor acercamiento a la complejidad de los sistemas, sus problemas y posibles soluciones desde una mirada no-lineal; lo cual los separa de las ciencias tradicionales que abordaban los fenómenos de manera lineal y disciplinar (Elizalde Prada, 2013).

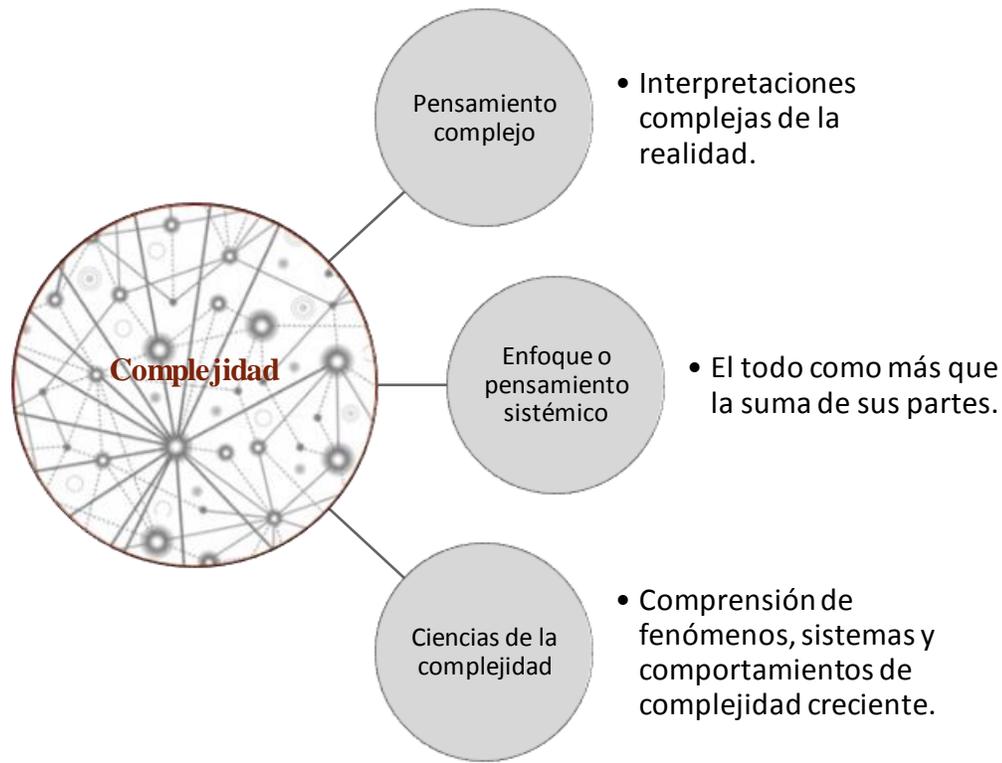
Las concepciones de la complejidad no son excluyentes entre sí, por el contrario se complementan armónicamente para brindar al investigador una gama amplia de teorías, nociones y disciplinas que le permiten abordar la realidad con libertad, en procesos que se nutren tanto de la intuición como de la rigurosidad científica.

¹⁶ Se reconoce a Edgar Morin como padre y principal representante del pensamiento complejo.

¹⁷ Entre los creadores del enfoque sistémico se encuentran sus creadores se encuentran F. Capra, Von Bertalanffy, Von Foester, H. Maturana y G. Bateson (Elizalde Prada, 2013).

¹⁸ Dos de sus principales representantes son Ilya Prigogine e Immanuel Wallerstein.

Figura 8. Concepciones de la complejidad, aplicadas a la investigación.



Nota: Gráfico elaborado a partir de *Aproximación a las ciencias de la complejidad*, Elizalde Prada (2013).

El pensamiento complejo

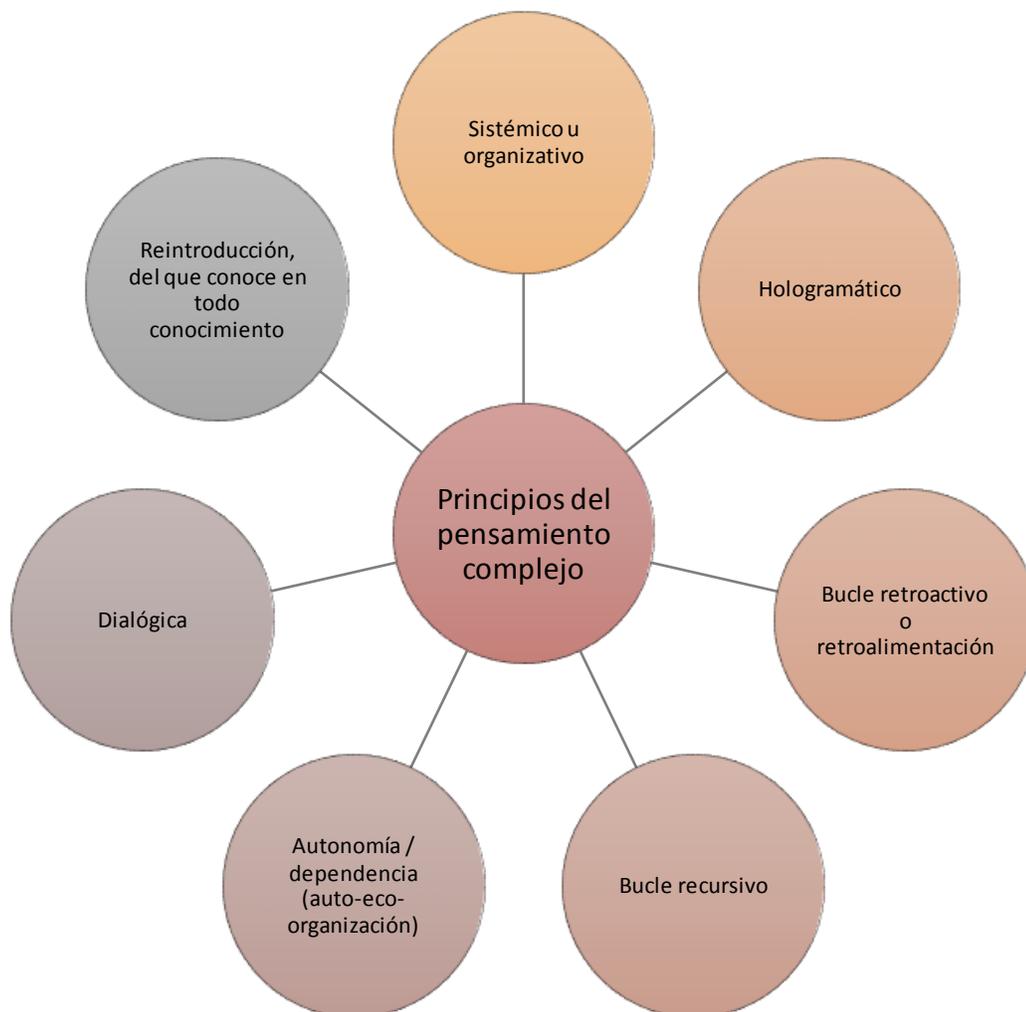
“Legítimamente, le pedimos al pensamiento que disipe las brumas y las oscuridades, que ponga orden y claridad en lo real, que revele las leyes que lo gobiernan” (Morin, 1994, pág. 10), sin embargo la concepción de pensamiento complejo surgió para romper esa forma tradicional de reprimir la mente y por el contrario, darle libertad.

En este sentido, el pensamiento complejo aspira al conocimiento multidimensional, capaz de tratar, de dialogar, de negociar, con lo real; religando al máximo los modos simplificadores de pensar. Se trata, entonces, de integrar al observador con su observación (objeto) y al objeto con su entorno; dejando atrás el pensamiento simplificador que divide, mutila y reduce la complejidad de la realidad, estudiándola de manera unidimensional y cegadora (Morin, 1994).

Así mismo, pensar desde lo complejo significa: entender al objeto como organización, sistema, máquina (vida, sociedad), aceptar la provisionalidad, la relatividad y las contradicciones en el conocimiento y afrontarlas desde la cooperación (Morin, 1982).

Con el fin de romper el modo de operación del pensamiento tradicional y dar paso al pensamiento complejo, Morin (1999) propone siete principios complementarios e interdependientes para desarrollar un pensamiento vinculante (figura 9).

Figura 9. Principios del pensamiento complejo.



Nota: Gráfico elaborado a partir de *La cabeza bien puesta, repensar la reforma, reformar el pensamiento*, Morin (1999).

Principio sistémico u organizativo

Según Estrada García (2020) “este principio permite articular el conocimiento de las partes con el del todo, y su objetivo radica en combatir la idea reduccionista, de que el todo es tan solo la suma de las partes” (pág. 1019). En este sentido, Morin (1999) señala que: “la organización de un todo produce cualidades o propiedades nuevas en relación con las partes consideradas de manera aislada: las emergencias” (pág. 98). Desde de esta noción, la investigación de los ecosistemas y de los impactos de las actividades humanas en estos, es una construcción integradora del conocimiento que se pueda adquirir de sus elementos y la relación que tienen con el comportamiento del todo como sistema. Así se logra una comprensión más completa de la realidad y se identifican propiedades emergentes que de otra forma no lograrían ser captadas por el observador.

Principio hologramático

Este principio representa un punto intermedio entre el holismo¹⁹ y el reduccionismo²⁰, en el cual, tanto las partes como el todo son de alta y equiparable importancia para entender la realidad. Cada parte del sistema contiene la información del todo, tanto la parte está en el todo, como el todo está en la parte; en este sentido el conocimiento que se adquiere de la parte permite adentrarse en el todo y lo que se sabe del todo se encuentra estrechamente relacionado con sus partes (Morin, 1994). Por lo tanto, se construye conocimiento a partir de la investigación integradora en dos direcciones opuestas pero complementarias: desde la parte hacia el todo y del todo a la parte.

¹⁹ El término holismo fue acuñado por Jan Smuts en su libro *Holismo y Evolución* (1962), es una doctrina filosófica se refiere a la forma de concebir los objetos y sistemas en su totalidad, en su conjunto, en su complejidad, para apreciar interacciones, detalles y dinámicas que no se percibirían al estudiar sus elementos por separado (Briceño, y otros, 2010).

²⁰ Según Viniestra Velázquez (2014) el término reduccionismo se refiere a “una postura epistemológica que sostiene que el conocimiento de lo complejo debe ser, obligadamente, a través de sus componentes más simples, o que un sistema complejo solamente puede explicarse por la reducción hasta sus partes fundamentales” (pág. 253), lo cual tiende a restringir el estudio del sistema a simplemente el comportamiento y la composición de sus partes.

Principio del bucle retroactivo o retroalimentación

Este principio se refiere a las causalidades circulares en las que la causa actúa sobre el efecto y el efecto sobre la causa, como una manera de autorregulación²¹ del sistema. Cuando se manifiesta de forma negativa permite reducir el desvío y estabilizar el sistema y cuando lo hace de forma positiva amplifica el impacto (Morin, 1999). La retroalimentación brinda información al sistema, que le permite regular sus dinámicas. Esta concepción se opone a la causalidad unilineal predominante y limitante en el pensamiento tradicional, que se reduce a la simple idea de que algo produce efectos, sin considerar la influencia que estos tienen sobre las causas.

El principio de bucle retroactivo es muy útil para entender las relaciones causales entre los elementos bióticos y abióticos del ecosistema objeto de estudio de la presente investigación.

Principio del bucle recursivo

Este principio se refiere a la autoproducción y la auto-organización del sistema, “se trata de un bucle generador en el que los productos y los efectos son en sí mismos productores y causantes de lo que los produce” (Morin, 1999, pág. 99). Si se aplica esta noción a los ecosistemas, se puede decir que a partir de las dinámicas entre los elementos bióticos y abióticos se crea el ecosistema que a su vez presenta características (clima, área, geografía, grado de conservación-degradación), que permiten o no la generación de nuevos elementos y definen sus propiedades de acuerdo a las necesidades adaptativas para hacer parte del ecosistema.

Principio de autonomía / dependencia (auto-eco-organización)

Este principio hace referencia a la capacidad de los seres vivos de desarrollarse de manera autónoma aunque dependiente de su entorno, ya que requieren la energía, la información y la organización de su ambiente, se le conoce como auto-eco-organización y destaca que la vida se regenera constantemente a partir de sus células muertas (Morin, 1999).

²¹ En los organismos vivos se conoce como homeostasis.

En los ecosistemas existen múltiples formas en las que se manifiesta este principio, es el caso del surgimiento de vida microbiana en función de la descomposición de un organismo macroscópico muerto, o trasladándolo a un aspecto más social, el surgimiento de actividades paleontológicas a partir de la muerte de organismos en épocas pasadas; solo por citar dos ejemplos.

En ese sentido, se podría decir que no solo la vida se nutre de la muerte, sino que también lo hacen otro tipo de procesos (culturales, sociales, educativos, económicos) y que la muerte puede entenderse en otros campos (diferentes a la biológica) como la pérdida de las propiedades o la destrucción de un elemento o un sistema; con el ánimo de aplicar este principio a otros procesos de la realidad (humanos, físicos).

Principio dialógico

Según Morin (1999) “lo dialógico permite asumir racionalmente la inseparabilidad de nociones contradictorias para concebir un mismo fenómeno complejo” (pág. 101), concibiendo entonces que existen términos que tienden a excluirse entre sí, pero que en realidad se encuentran íntimamente ligados e indisociables, tal es el caso de la triada orden/desorden/organización. La organización se encuentra en un punto medio entre el orden y el desorden y al mismo tiempo se compone de ellos, aun cuando representan dos términos que se expelen mutuamente. Para Godoy (2008) las interacciones también hacen parte de este conjunto de expresiones, en ese sentido propone:

Orden/desorden/interacciones/organización, forman entonces un primer macro-concepto tetralógico, evidentemente complejo, cargado de incertidumbre, de emergencias, no simplificante, asociando la física y sus nociones de entropía a la evolución de la biología y las inter-retroacciones de la antro-po-sociología, en donde cada componente no puede ser explicado por sí mismo, necesitando así de los demás miembros del tetragrama para lograr su entera expresión. (pág. 67)

En todo caso, representada como triada o como tétrada, la dialógica ayuda a entender el dialogo y la fuerte conexión que existe entre características del sistema, que de manera simple se considerarían completamente opuestas y disociables.

Principio de reintroducción, del que conoce en todo conocimiento

Este principio se refiere, según Morin (1999) a que “todo conocimiento es una reconstrucción/traducción que hace una mente/cerebro en una cultura y un tiempo determinados” (pág. 101), este proceso permite el uso pleno de la inteligencia y al mismo tiempo depende de la complejidad de organización de las ideas que tenga cada ser humano. La implementación generalizada de este principio, permitiría que nuevas humanidades emergieran para abordar los problemas globales y fundamentales, partiendo de la cultura. Entonces, el ser humano se caracterizaría principalmente por su civismo, solidaridad y vínculo ético inter-especie, por las relaciones armónicas con la naturaleza y el cosmos; dejando atrás la voluntad de dominar el mundo.

En este sentido, si se analiza el problema de esta investigación, se evidencia una deficiente implementación del principio de conocer en todo conocimiento, manifestada a partir de las relaciones insostenibles hombre-naturaleza que causan impactos de gran magnitud en los ecosistemas, como por ejemplo la extracción de fauna silvestre para consumo, lo cual se cree que causó el traspaso del virus SARS-CoV-2 del murciélago al ser humano²², provocando una pandemia que a su vez produjo alteraciones sociales, económicas y ambientales en todo el mundo. Es muy necesario empezar a pensar desde la complejidad, como individuos y como sociedad.

El enfoque o pensamiento sistémico

El enfoque sistémico reúne una gran cantidad de métodos, herramientas y principios interdisciplinarios con el fin de comprender y describir el sistema a partir de las relaciones en su interior, su estructura, su comportamiento, sus características y sus propiedades emergentes; también permite plantear hipótesis para dar soluciones a diversos problemas (Liévano Martínez & Londoño, 2012).

El pensamiento sistémico surge formalmente con la Teoría General de Sistemas (TGS) propuesta por Ludwig Von Bertalanffy en 1968, como mecanismo integrador entre

²² Se explica con más detalle en el primer capítulo de esta tesis: Planteamiento del Problema de Investigación.

las ciencias sociales y naturales, aplicado a los complejos cuya característica central es que no se pudieran reducir (Arnold C. & Rodríguez M., 1990).

Teniendo en cuenta las similitudes estructurales o isomorfismos que se presentan en diferentes campos, con la Teoría General de Sistemas, Bertalanffy buscaba la formulación de los principios universales y modelos válidos para los sistemas en general “sea cual fuere la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o fuerzas reinantes entre ellos” (Bertalanffy, 1968, pág. 37), como una disciplina lógico-matemática, con el fin de superar la especialización de la ciencia predominante en esa época y transitar hacia el estudio del comportamiento en conjunto.

La Teoría General de Sistemas se basa en 6 fundamentos (Castaldo Suau, 2012): 1) los sistemas existen dentro de otros sistemas, 2) la función de un sistema depende de su estructura, 3) los sistemas son abiertos, 4) los sistemas son dinámicos, 5) los sistemas evolucionan, 6) los sistemas son indescriptibles en su totalidad. Estos principios son aplicables a los ecosistemas y los modelos que se proponen de ellos; para entenderlos es importante aproximarse al concepto de sistema.

Existen múltiples definiciones de sistema, en primer lugar, hacia el siglo XVII, fue concebido como la interrelación de elementos constituyentes de una globalidad (Morin, 1986), posteriormente con la Teoría General de Sistemas, Bertalanffy (1968) lo definió como “un complejo de elementos en interacción” (pág. 33).

En un sentido más sistémico que estructuralista, porque incluye a la organización ligada a la totalidad y a la interrelación, Ferdinand Saussure propone que “el sistema es una totalidad organizada, hecha de elementos solidarios que no pueden ser definidos más que los unos con relación a los otros en función de su lugar en la totalidad” (Ferdinand Saussure, como se citó en Morin, 1986, pág.124).

En este sentido, Morin (1986) propone al sistema como una unidad global organizada de interrelaciones constitutivas de la realidad entre los elementos/eventos, acciones o individuos; donde cada uno de estos son al mismo tiempo sistemas. Con esta concepción el término adopta un matiz de complejidad.

Es importante resaltar, que los sistemas a menudo están conformados por subsistemas, que se definen según lo requiera la investigación y cumplen con funciones de producción, apoyo, mantenimiento, adaptación y/o dirección (Hurtado Carmona, 2011). La jerarquía, de la cual hacen parte los sistemas, y otros atributos serán abordados a continuación.

Atributos de los sistemas

En la tabla 2 se compilan y definen los atributos o características más importantes de los sistemas a partir de las ideas de varios autores.

Tabla 2. *Atributos de los sistemas con base en los conceptos descritos por Flórez y Thomas (1993), Hurtado Carmona (2011), Castaldo Suau (2012).*

Atributo	Definición
Objetivos	Son los propósitos que tiene el sistema. Como regla general, consisten en transformar energía.
Sinergia	La sinergia se refiere tanto las interacciones de influencia recíproca entre las partes del sistema, como el intercambio de energía de este con otros o con sus subsistemas. Aunque dos sistemas se formen de los mismos componentes, pueden llegar a ser completamente diferentes debido a que presenta una sinergia distinta. Debido a la sinergia, las modificaciones que ocurren en un elemento cambian al sistema en su globalidad.
Jerarquía	Hace referencia a la organización estructural en la que los sistemas hacen parte de sistemas más grandes (super-sistema) y a su vez están contenidos por sistemas más pequeños (subsistemas).
Recursividad	Es la característica que tienen los sistemas de estar compuestos por subsistemas, que a su vez son elementos independientes con las propiedades de los sistemas.
Corrientes de entrada	Son los insumos o materia prima que ingresan al sistema para que este cumpla con sus objetivos y funcione adecuadamente. Su

Atributo	Definición
	disponibilidad depende del suministro por parte del super-sistema en el que se encuentra el sistema.
Proceso de conversión	Se refiere a la transformación de la energía al interior del sistema, con el fin de lograr el objetivo.
Corrientes de salida	Son los productos que el sistema entrega al super-sistema. Pueden ser negativos o positivos dependiendo de su utilidad para el super-sistema.
Retroalimentación	Es la información que entra al sistema y le permite saber si está cumpliendo o no con el objetivo, y proponer las medidas de corrección necesarias en caso de que no lo esté haciendo; funciona como un elemento de control. La retroalimentación se da de forma positiva cuando refuerza el impulso inicial contribuyendo a acelerar la transformación en un comportamiento de expansión indefinida con efectos des-integrantes en el sistema; mientras que la negativa atenúa la transformación, llevando el sistema a la estabilidad, con un comportamiento adaptativo y de finalidad.
Fronteras	La frontera contiene los elementos que le pertenecen al sistema, puede ser física cuando delimita un espacio geográfico o funcional cuando abarca actividades.
Entorno	Es todo aquello que se encuentra dentro del super-sistema, que no pertenece al sistema objeto de estudio.
Entropía	En un estado en el que el sistema tiende al desorden, la desorganización, el caos. La entropía corresponde a la segunda ley de la termodinámica y se considera que al alcanzar la entropía máxima, el sistema ha alcanzado su equilibrio, es decir, la muerte.
Negentropía	También se conoce como entropía negativa y se refiere a la capacidad del sistema de contrarrestar los efectos desorganizadores y lograr estabilizarse, para crecer y desarrollarse antes de su muerte.

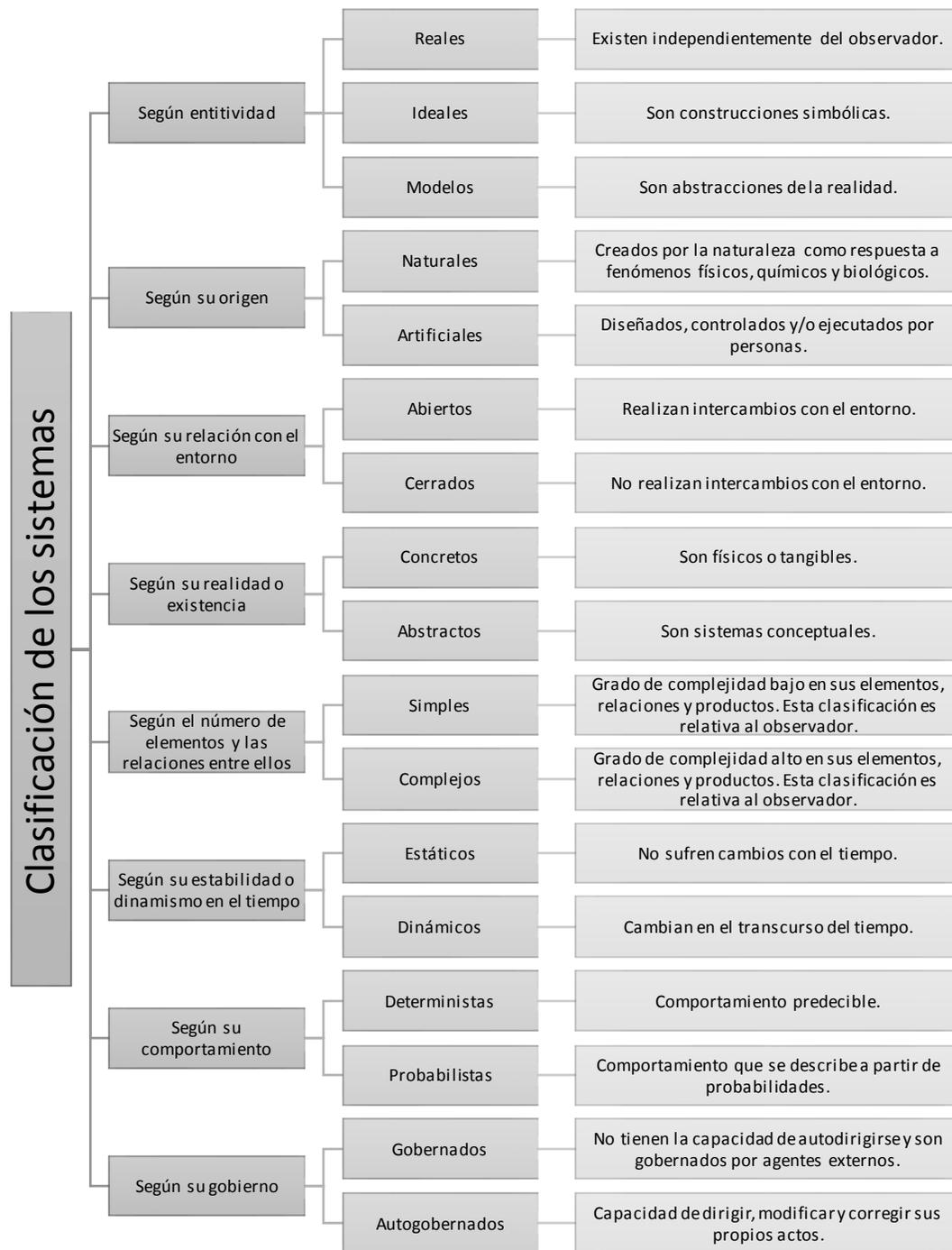
Atributo	Definición
Globalidad	Se refiere a las cualidades propias, indivisibles e irreductibles del sistema que se pueden reconocer únicamente en la realidad, pero que se forman a partir de las singularidades del mismo; formado la unidad que existe gracias a las relaciones entre las partes y el todo.
Emergencias	Son las propiedades y características nuevas que aparecen en un sistema, respecto a las propiedades de los elementos considerados individualmente.
Constreñimientos	Son las propiedades y características que pierden los elementos, cuando hacen parte de un sistema.
Organización	Se refiere a la forma como se ensamblan, estructural y funcionalmente, la materia, la energía y la información; a partir de asociaciones o combinaciones entre los elementos, individuos o eventos. Permitiendo que el sistema se integre, mantenga, evolucione y produzca, de manera solidaria y sólida.
Almacenamiento	Es la energía que acumula el sistema para su funcionamiento.
Flujos	Son los movimientos constantes de energía, materia o información de un elemento a otro, dentro del sistema.
Umrales	También conocidos como “discontinuidades”, para referirse a los límites máximos y mínimos dentro de los cuales puede funcionar y sobrevivir el sistema, como causa y resultado de la evolución.
Homeostasis	Es el conjunto de mecanismos auto-regulatorios que le permiten al sistema alcanzar el equilibrio dinámico, dentro del umbral y en respuesta adaptativa a los cambios del medio.
Diferenciación	Cada elemento del sistema desempeña funciones especializadas, que lo diferencian de los demás.
Equifinalidad	Este término indica que a partir de diferentes condiciones iniciales o diversos procesos se puede alcanzar un mismo resultado final.

Clasificación de los sistemas

Los sistemas generales se pueden clasificar así (Arnold Cathalifaud & Osorio, 1998): según su entidad en reales, ideales y modelos; según su origen en naturales o artificiales y según su relación con el entorno en abiertos o cerrados. A esta clasificación, Castaldo Suau (2012) agrega: según su realidad o existencia pueden ser sistemas concretos o abstractos, según el número de elementos y relación entre ellos pueden ser simples o complejos y según su estabilidad o dinamismo en el tiempo pueden ser estáticos o dinámicos. Flórez y Thomas (1993) proponen una clasificación que incluye algunas de las mencionados anteriormente y además las siguientes: según su comportamiento los sistemas pueden ser sistemas deterministas o probabilistas y según su gobierno pueden ser gobernados o autogobernados. En la figura 10 se nombra la característica principal de cada uno de ellos.

En este sentido, un ecosistema es real, natural, abierto, concreto, complejo, dinámico, de comportamiento principalmente probabilístico y autogobernado; mientras que su representación a partir de un *software* es un modelo, artificial, abierto, abstracto, complejo, dinámico de comportamiento, principalmente determinístico y gobernado. Aunque el ecosistema es la realidad y el modelo se acerca a ella, no comparten por completo la misma clasificación.

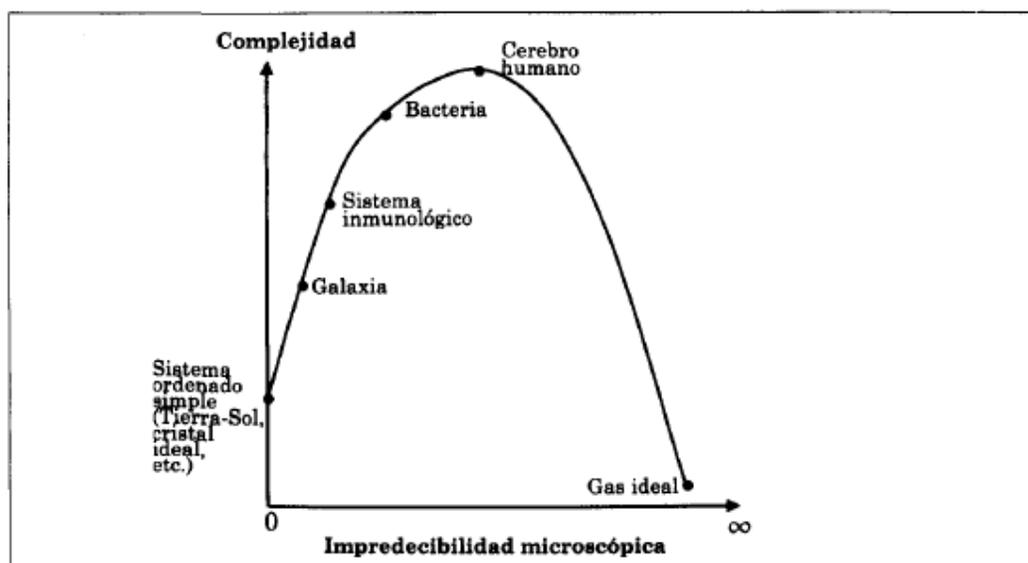
Figura 10. Clasificación de los sistemas.



Nota: Gráfico elaborado a partir de los paradigmas arcaicos a la Teoría General de Sistemas, aplicación al análisis, creación y enseñanza del diseño, de Castaldo Suau (2012) y de La Teoría General de Sistemas de Flórez & Thomas (1993).

Por su parte, García Olivares (1999) propone una clasificación de sistemas según su complejidad, dentro de la cual existen sistemas de complejidad mínima y sistemas de complejidad crecientemente alta. Los primeros se caracterizan por ser predecibles, deterministas y con pocas variables macroscópicas aunque caóticos a nivel molecular por ejemplo un gas contenido en un recipiente sellado; mientras que los segundos tienen una predictibilidad microscópica intermedia pero una libertad macroscópica crecientemente mayor que los primeros, por lo tanto requieren de mayor cantidad de información para describir su estado, por ejemplo la sociedad humana o los ecosistemas.

Figura 11. Complejidad de algunos sistemas.



Nota: Gráfico tomado de *La evolución de la complejidad*, de García Olivares (1999).

Sistemas Complejos

Los sistemas de complejidad creciente presentan dinámicas irreversibles, súbitas, imprevisibles, aperiódicas, aleatorias, inciertas y no-algorítmicas, que obedecen a la articulación de diferentes escalas macroscópicas y microscópicas temporales y a la relación entre las dos flechas opuestas del tiempo, la de la entropía y la de la evolución, una hacia la muerte y la otra hacia la vida, componiendo lo que se denomina como densidad temporal; de allí, que la complejidad de los fenómenos radica en sus futuros posibles y es directamente

proporcional a los grados de libertad que exhibe, es decir al número de parámetros que pueden varias independientemente dentro del sistema (Maldonado, 2014).

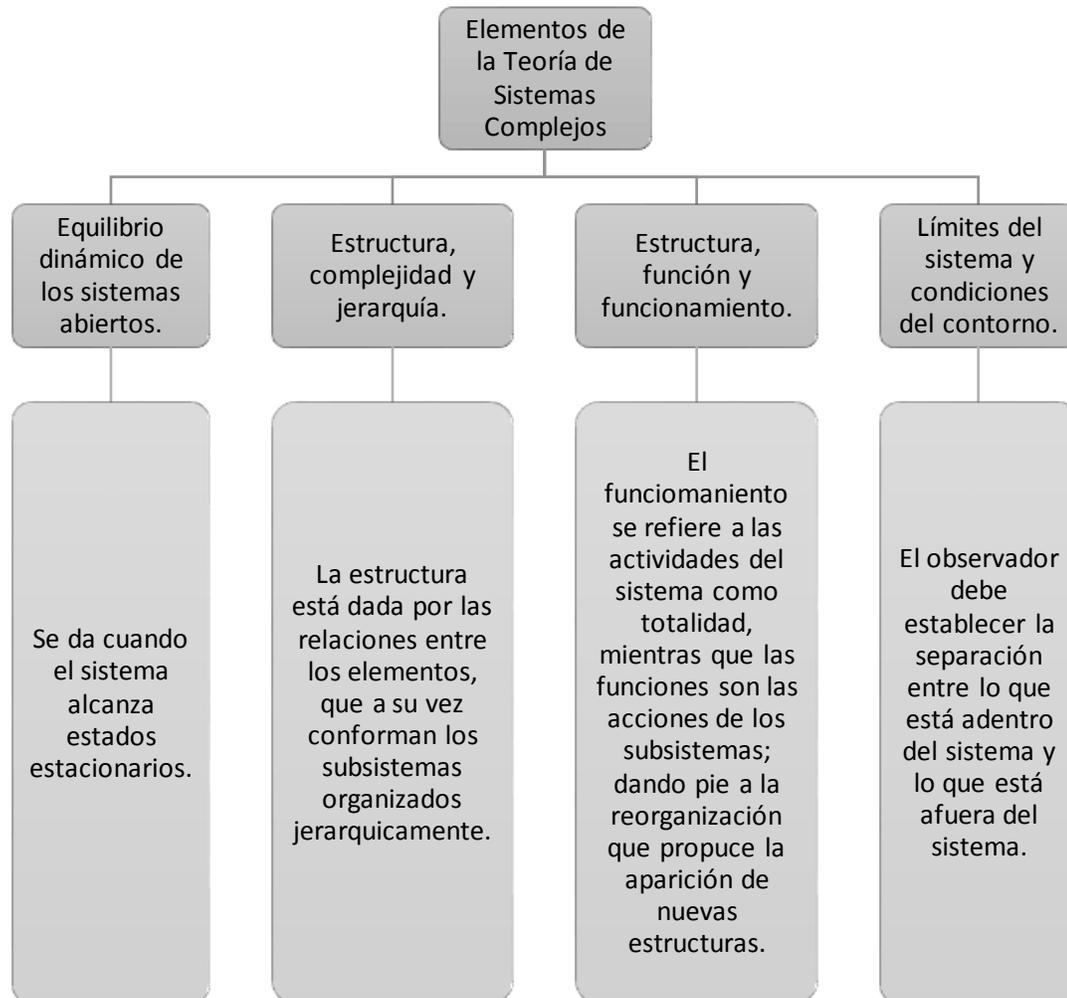
La complejidad de los sistemas es mayor cuando existe una alta interdependencia entre sus componentes y son indecidibles, es decir que no se pueden demostrar, calcular formalmente o reflejan un comportamiento no determinista; lo cual también depende del ojo observador quien puede caracterizar al sistema como complejo, aun cuando este sea simple (Simon, como se citó en Tarride M. , 1995, pág. 48).

Aparte de ser complejos, existen sistemas que también son adaptativos, es decir que se transforman para mejorar o sobrevivir; como consecuencia de los flujos de información tanto internos como desde y hacia su entorno. Gell-Man (1995) señala que todos los sistemas procesan información y determina que la adaptación social se da en tres niveles: 1) adaptación directa como respuesta a características específicas en una época determinada, 2) adaptación con cambios de esquema como respuesta a presiones del mundo real, cuando la primera no funciona y 3) la supervivencia darwiniana del más apto, es una forma de selección natural los esquemas se extinguen individuos hacia nuevas formas de organización social. La adaptación se da como mecanismo para hacer frente a los acontecimientos del entorno.

En la investigación, definir lo que compone al sistema complejo, no es tarea fácil y depende del observador, puesto que como lo señala García (2006) no es posible abarcar la totalidad de las relaciones, por lo tanto es importante aplicar criterios de selección y determinar las escalas dinámicas y temporales en las que se da el fenómeno, e investigar de manera interdisciplinaria; asimismo define dos dinámicas de estos sistemas: 1) los estados estacionarios²³ en los que se mantiene el sistema cuando las condiciones del entorno sufren pequeños cambios y 2) desestructuración y reestructuración como parte de la evolución del sistema frente a perturbaciones de carácter exógeno o endógeno, para alcanzar un estado estacionario con una nueva estructura; y propone los elementos de una Teoría de Sistemas Complejos, los cuales se presentan en la figura 12.

²³ Los estados estacionarios ocurren cuando fluctúan las relaciones en el sistema, pero su estructura permanece invariable, es decir transformaciones capaces de compensar las perturbaciones; pueden darse en equilibrio o alejado de él (García, 2006).

Figura 12. Elementos de una Teoría de Sistemas Complejos.



Nota: Gráfico elaborado a partir de *Sistemas Complejos, conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, de García (2006).

Las ciencias de la complejidad

Las ciencias de la complejidad son una invitación a explorar la realidad con la mente abierta y dispuesta al conocimiento dinámico, accidentado, diverso y multidisciplinar; liberando al investigador de dogmas que no le permiten percibir los detalles más íntimos y sencillos que complejizan al fenómeno o problema estudiado.

Para Maldonado (2003) “las ciencias de la complejidad redefinen de raíz las relaciones mismas entre las ciencias y la filosofía, así como las ciencias entre sí, y por

consiguiente, entre ciencia y sociedad”²⁴ (pág. 143). Las ciencias de la complejidad se caracterizan por su capacidad de aportar múltiples respuestas a diversas cuestiones a partir de modelos precisos, mientras que las ciencias tradicionales responderían con una solución precisa a partir de modelos aproximados.

El trabajo en Ciencias de la complejidad se compone de tres ejes principales: 1) la teoría matemática de la complejidad (problemas P versus N-P), 2) las relaciones entre el universo microscópico y el universo macroscópico y 3) la teoría de los sistemas dinámicos (Maldonado & Gómez Cruz, 2011), la segunda y la tercera se encuentran conectadas ya que estudian, entre otras cosas, las relaciones entre elementos a diferente escala (figura 9). La presente investigación se adhiere principalmente a la teoría de los sistemas dinámicos.

Figura 13. Ejes de trabajo de las ciencias de la complejidad.

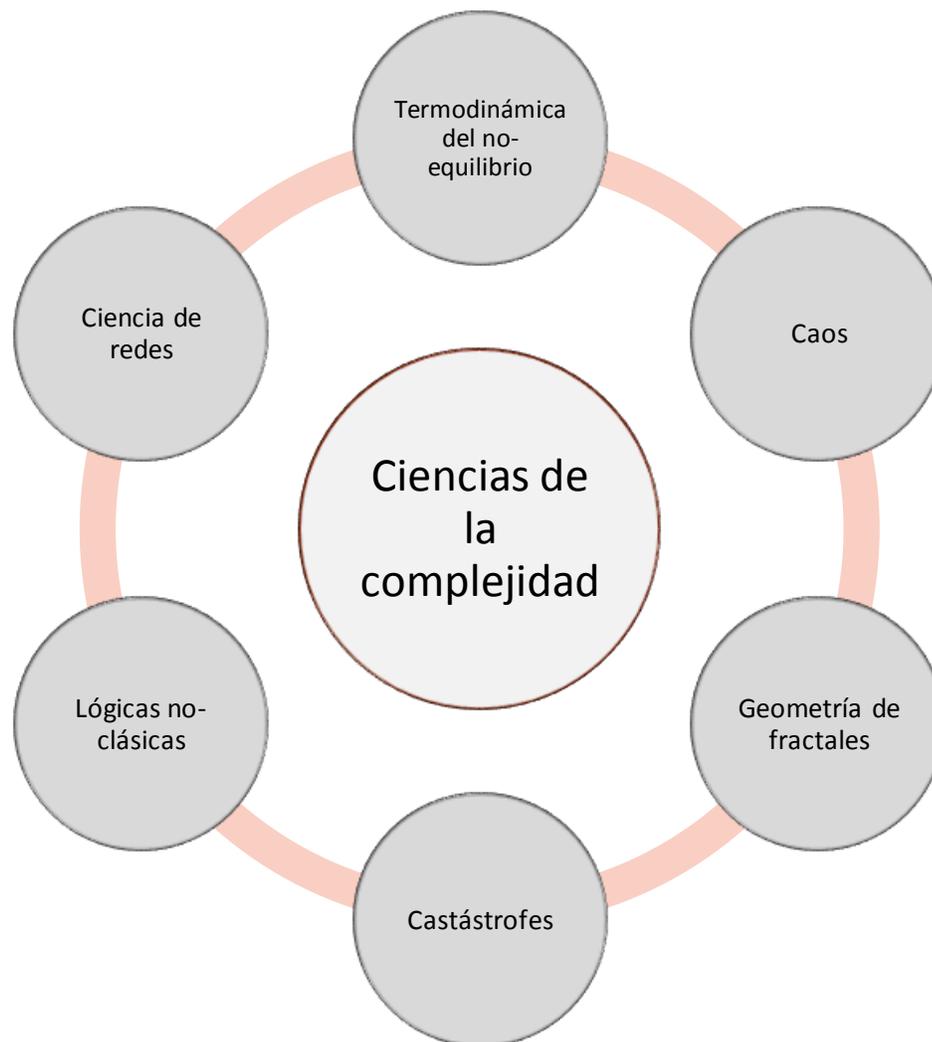


Nota: Gráfico elaborado a partir de *El mundo de las Ciencias de la Complejidad una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*, de Elizalde Prada (2013).

²⁴ El autor propone se realice una evaluación de esta idea para determinar si puede constituir una hipótesis o una tesis y al mismo tiempo se descontinúe la noción (platónica y aristotélica) de jerarquía de las ciencias, conocimientos y saberes, defendida durante la Edad Media.

Existen 6 ciencias de la complejidad (figura 14): 1) termodinámica de no-equilibrio, 2) lógicas no-clásicas, 3) ciencia de redes, 4) ciencia del caos, 5) teoría de los fractales y 6) teoría de las catástrofes. Las tres primeras predominan en los trabajos sobre complejidad, la cuarta y la quinta se encuentran estrechamente relacionadas entre sí y la última tiende a desaparecer como teoría matemática debido a la fuerza lógica del caos y se integra, como lenguaje, a las lógicas no-clásicas (Maldonado & Gómez Cruz, 2011).

Figura 14. Ciencias de la complejidad.



Nota: Gráfico elaborado a partir de *El mundo de las Ciencias de la Complejidad una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*, Maldonado y Gómez Cruz (2011).

Termodinámica del no-equilibrio

La termodinámica²⁵ del no-equilibrio es la primera ciencia formulada de la complejidad, está orientada a los estados alejados del equilibrio, es decir a la tendencia evolutiva y creativa de la vida y fue desarrollada por Ilya Prigogine y Stengers como complemento a la segunda ley de la termodinámica, conocida como la entropía que dicta que el desorden tiende a aumentar hasta alcanzar el equilibrio, la muerte (Maldonado & Gómez Cruz, 2011). En este sentido, los sistemas se pueden clasificar en: sistemas en equilibrio, sistemas cercanos al equilibrio y sistemas lejanos del equilibrio

Teoría del Caos

Hacia la década de los 60', en su intento por proponer un modelo atmosférico de predicción del clima, el meteorólogo Eduard Lorenz descubrió el efecto mariposa, al retirar cifras decimales de los números que utilizaba para hacer sus cálculos e ingresarlos nuevamente al computador, obtenía soluciones completamente diferentes; más adelante, hacia los años 70', James Yorke y Robert May, basados en el trabajo de Lorenz, descubrieron que sistemas sencillos tienen comportamientos complejos, es decir presentan caos, lo que implica una alta sensibilidad a variaciones en sus condiciones iniciales (Romanelli, 2006).

El caos describe a los sistemas a partir de atractores²⁶ fijos con un movimiento en forma de espiral hasta llegar a un punto medio de equilibrio, periódicos con una trayectoria de curva cerrada, cuasi periódicos con dos frecuencias involucradas de movimiento y forma de rosquilla y extraños con una evolución compleja en el espacio (Romanelli, 2006; Maldonado & Gómez Cruz, 2011)

Geometría de fractales

La geometría de fractales fue formulada por el ingeniero francés Benoit Mandelbrot tras preguntarse ¿Cuánto mide la costa de Inglaterra? y observar que estando más cerca del suelo, la medición de la longitud es más exacta que si se hiciera desde el espacio, es decir

²⁵ La termodinámica es la rama de la física que estudia el movimiento del calor y la energía.

²⁶ Un atractor es el lugar en el cual el sistema se estabiliza luego de un tiempo (Romanelli, 2006).

que las mediciones dependen de la escala que se emplee para medir; Surgió entonces, el concepto de fractal²⁷, el cual se refiere a un objeto con estructura geométrica recursiva, es decir que presenta autosimilaridad (Al-Majdalawi Álvarez, 2005) o “un conjunto en que las partes son similares al total, en algún sentido” (Mandelbrot, como se citó en Sastre, s.f., pág. 43). Ramis Anadalia y Sotolongo Codina (2009) explican la propiedad de autosimilaridad, “un objeto fractal puede ser subdividido reiteradamente, hasta el infinito, presentando en cada una de estas iteraciones una semejanza con el conjunto” (pág. 72).

La geometría de fractales ha sido utilizada en múltiples campos, uno de ellos, la ecología. Nancy Krieger, propuso la teoría eco-social, en la que explica la existencia de relaciones causales entre lo social referente a las enfermedades, la salud y el bienestar poblacional, y lo biológico – ecológico, presentes en cada nivel espacio-temporal (Mojica Perilla, 2009), como ocurre en los fractales.

Catástrofes

El matemático René Thom propuso la teoría de la morfogénesis y la estabilidad estructural, conocida posteriormente como la teoría de catástrofes o bifurcaciones, la cual describe cambios repentinos, súbitos, imprevistos e irreversibles que ocurren en un sistema, sin perjudicar su estabilidad o continuidad, gracias a su capacidad de subsistencia; esta teoría se presenta como un lenguaje aplicable en diferentes campos (Ramis Anadalia & Sotolongo Codina, 2009; Maldonado & Gómez Cruz, 2011) y proporciona modelos para interpretar los cambios bruscos o discontinuos de estados, fronteras o bordes, que se producen en una región del sistema al variar de una forma continua los parámetros de control (Nuño Ballesteros, 2004; Espinoza, 1995).

Lógicas no Clásicas

Las lógicas se refieren a conocimientos que explican el mundo o una parte de él de forma sistemática, definidas, por lo general, en términos de transmisión de verdad en un modelo (Maldonado, 2016; Barrio, 2016). Desarrollada inicialmente por Aristóteles, surgió

²⁷ “La palabra fractal proviene del adjetivo fractus, en latín, y su significado es irregular o rugoso” (Mandelbrot, como se citó en Valdez Cepeda & Olivares Sáenz, 1998, pág. 277).

la lógica formal clásica que es la lógica simbólica, matemática, proposicional o de predicados, utilizada para determinar la validez de enunciado o un grupo de enunciados (Maldonado, 2017) después surgieron las lógicas no clásicas, divergentes o filosóficas, de manera contrastante o alternativa a las primeras.

Las Lógicas no clásicas se caracterizan principalmente por su pluralismo lógico, con el cual se devela el hecho de que no existe una sola forma de pensar ni de vivir, y por lo tanto no existe una única lógica; sino que hay multiplicidades con diversos atributos y relaciones variadas que conforman las consecuencias deductivas en los estudios de los sistemas de complejidad creciente; de allí que las investigaciones en este campo contemplan la existencia de mundos posibles y su interpretación a partir de diversos modos de expresión del lenguaje, en contraste con el mundo real abordado por la lógica formal clásica (Maldonado, 2016).

Ciencia de redes

La ciencia de redes fue desarrollada entre los años 2001 y 2003, por D. Watts, L. Barabasi y S. Strogatz (Maldonado & Gómez Cruz, 2011). Su objeto de estudio son las redes entendidas como “conjuntos de relaciones (líneas, vínculos o lazos) entre una serie definida de elementos (nodos)” (Molina, 2004, pág. 36), en constante evolución coordinada en dos sentidos: uno hacia la generación de un producto y el otro modificando su propia morfología (Miceli, 2006).

Los Ecosistemas Estratégicos y la Sostenibilidad

El primer acercamiento al concepto de “ecosistema” se dio desde el siglo XVIII, cuando los naturalistas empezaron a preocuparse por conocer formalmente los patrones de distribución de los organismos, buscando comprender cómo se formaban y mantenían por la interacción de la biota con el ambiente físico (Rincón M. , 2017). Se consideraban las formas de vida con un desarrollo estático en tiempo y espacio, en el que la evolución de los organismos era ordenado y predecible.

Esas ideas fueron cambiando con el tiempo. El botánico Arthur George Tansley definió el término “ecosistema” como el “complejo de organismos junto con los factores físicos de su medio ambiente” en un lugar determinado, y propuesto además como una de

las unidades básica de la naturaleza, en la que existe intercambio constante y variado entre la parte orgánica e inorgánica (Tansley A. , 1935). Estos ecosistemas son de las más diversas clases y tamaños. Lo cual alude a una organización que depende de múltiples variables, factores y relaciones, mucho menos predecibles de lo que se pensaba anteriormente.

A partir de entonces, el concepto ha sido importante para comprender y definir sistemas, no solo naturales, sino también de otros campos de investigación como la sociología, ya que puede adaptarse a cualquier situación en la que se presenten relaciones entre factores bióticos y abióticos sin importar la escala o naturaleza de las interacciones (comunicación, intercambios de energía y materia, ciclos reproductivos, migraciones, entre otras).

El concepto ha evolucionado y en la actualidad está muy ligado al valor agregado que los sistemas naturales ofrecen a la sociedad. Por lo cual se acuñó el término “Ecosistema Estratégico” aludiendo a un espacio determinado, con significados y valores únicos para un grupo social, en un momento dado de su historia (Agudelo Patiño, 2010).

La importancia del ecosistema estratégico radica tanto en la disponibilidad de bienes y servicios (como el turismo) como en la asimilación de residuos de la población humana, que a su vez depende de la oferta ambiental propia del lugar. Por lo tanto, el ser humano encuentra la importancia de la naturaleza y propicia zonas de conservación que permitan perpetuar los recursos naturales en el tiempo.

Asimismo, se puede decir que los bienes y servicios ecosistémicos son importantes porque tienen relevancia a gran escala, no se pueden reemplazar con inventos tecnológicos, se deterioran por la acción antrópica y de manera global, requieren de una gran cantidad de especies para operar y son más valiosos que las ganancias económicas obtenidas con las actividades que los alteran (Daily et al., 1997, como se citó en Maass, 2003, pág. 118).

Por lo tanto, no tienen una denominación económica, sino un significado que trasciende hacia el valor natural, cultural, religioso, político, místico, social, paisajístico e histórico para el grupo de personas que aprovechan sus beneficios. Según Herrera (2014) “el tamaño y la localización del grupo social determinan la escala a la que tiene valor un ecosistema estratégico. Tanto la importancia (nacional, local, etc.) como el carácter

estratégico (conservación, suministros, etc.) dependen de intereses humanos” (pág. 52). Entonces, la importancia de cuidar los ecosistemas estratégicos y desarrollar actividades en ellos de forma sostenible, no se refiere solo a su continuidad y equilibrio, sino también a las construcciones simbólicas que hace la sociedad de estos.

En ese sentido, es deber de la humanidad desarrollar sus actividades con una tendencia hacia la sostenibilidad, que en palabras de Gell-Man (1995) significa lograr la mayor calidad de vida posible sin que se adquiera a expensas del futuro, lo cual incluye la supervivencia tanto de la diversidad cultural como de las comunidades ecológicas del planeta. El concepto de desarrollo sostenible se presentó por primera vez en 1987 en el informe de la Comisión de Brundtland para referirse al desarrollo duradero “que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (ONU, 1987, pág. 23).

Lo anterior implica, el aprovechamiento de los recursos naturales, previniendo y mitigando al máximo los impactos ecosistémicos, descritos, desde la teoría de los sistemas complejos, como alteraciones²⁸ con la capacidad de propagarse “de diversas maneras a través del conjunto de relaciones que definen la estructura del sistema y que, en situaciones críticas, genera una reorganización total” (García, 2006, pág. 87). Por lo tanto, la evaluación de los impactos ocasionados por un fenómeno en un ecosistema, es importante para entender la dinámica socio-ambiental y las implicaciones que tienen sobre el desarrollo sostenible.

Modelado Basado en Agentes

El ser humano construye conocimiento a partir de la observación de la realidad y de la experimentación con los elementos de su entorno; sin embargo en ocasiones no es posible manipular el fenómeno estudiado, debido a su magnitud espacio-temporal, su costo, la inmutabilidad de sus variables y/o por cuestiones éticas. Es entonces, cuando los investigadores emplean modelos que permiten entender problemas complejos superando las limitaciones que implica su estudio físico.

²⁸ Las alteraciones pueden ser positivas o negativas, y llegar a causar una disrupción en el sistema.

García Vázquez y Sancho Caparrini (2016) definen el modelo como “una representación abstracta de cierto aspecto de la realidad, formada esencialmente por los elementos que caracterizan dicho aspecto de la realidad y por las relaciones que mantienen esos elementos” (pág. 18). Es un intento de reproducir la realidad a partir de las características de sus elementos y la forma como interactúan entre sí, para entender situaciones pasadas y presentes o realizar proyecciones; empleando “métodos de punta actuales y hacia el futuro, a saber: el modelamiento y la simulación” (Maldonado, 2014, pág. 83).

En ese sentido, cuando se busca comprender procesos fundamentales, la importancia del modelo radicará en su productividad y no, en su precisión. Trabajar en modelamiento y simulación implica la utilización del computador y el desarrollo o programación de *software* para tal fin, lo que hace de esta, una labor novedosa en el estudio de los sistemas complejos (Maldonado & Gómez Cruz, 2010).

Los modelos basados en agentes constituyen una forma de modelar, que permite representar poblaciones heterogéneas, lo cual los separa de los modelos basados en ecuaciones, que son aplicables solo a poblaciones homogéneas; por agente se refiere a una unidad o código computacional con inteligencia artificial, que le permite interactuar con su medio ambiente y con otros agentes (Aguilera Ontiveros & Posada Calvo, 2017). Teniendo en cuenta que las dinámicas en los ecosistemas emergen de las interacciones entre sus agentes, este tipo de modelado constituye un método valioso para su representación y comprensión.

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Explicar los impactos ocasionados por las medidas de contención de la pandemia Covid-19 en el ecosistema Desierto de La Tatacoa a nivel social, económico y ambiental, desde el paradigma de la complejidad.

Objetivos Específicos

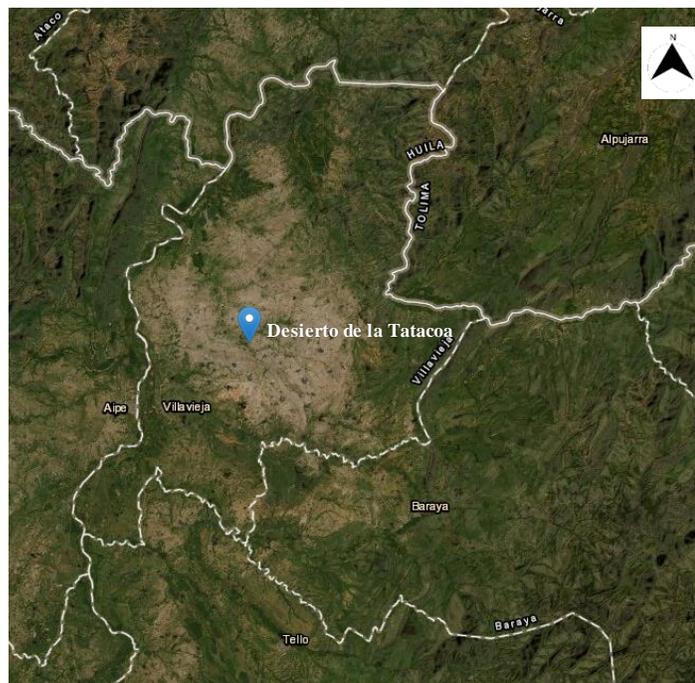
- Establecer los cambios en el área de la cobertura vegetal a partir de imágenes satelitales y en la dinámica socio-económica en tres momentos: antes de la pandemia, durante las medidas de contención y en el periodo de reactivación del turismo.
- Diseñar un modelo basado en agentes del sistema complejo, utilizando el software NetLogo; en el que se evidencien las relaciones entre agentes y subsistemas en relación con la variación del turismo.
- Proyectar los agentes, relaciones y dinámicas del ecosistema en dos escenarios futuros posibles: con la reactivación del turismo y con un aislamiento humano prolongado, de forma hipotética, con base en la dinámica del modelo.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio corresponde al ecosistema Desierto de la Tatacoa ubicado en las coordenadas geográficas: latitud $03^{\circ}13'14''$ norte, longitud $75^{\circ}13'08''$ oeste; el cual tiene un área aproximada de 54330.12 ha, cuya extensión se encuentra principalmente en el municipio de Villavieja, al norte del departamento del Huila - Colombia (figura 15).

Imagen 1. Ubicación del área de estudio: ecosistema Desierto de la Tatacoa.



Nota: adaptado de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA - USGS (United States Geological Survey) disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Según la clasificación de zonas de vida propuesta por Holdridge, en la Tatacoa se encuentran las zonas de bosque seco tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms-T), lo que corresponde a las provincias subhúmeda y semiárida, respectivamente (imagen 1). Por lo tanto la Tatacoa no es un desierto, como se le ha denominado popularmente, sino un área de desertificación (Olaya Amaya, Sánchez Ramírez, & Tovar, 2001).

Imagen 2. Ecosistema: Desierto de la Tatacoa.



Esta área presenta características singulares que la diferencian de su entorno, convirtiéndola en un enclave; la presencia de fósiles que develan la riqueza biodiversa de eras anteriores y utensilios de antiguas civilizaciones, su naturaleza exuberante o su curvatura y cercanía a la línea del ecuador, que permiten apreciar fenómenos celestes y realizar exploración astronómica; son atributos que promueven el desarrollo de actividades turísticas y académicas.

Tipo y Enfoque de la Investigación

En el artículo “un estado del arte de las Ciencias de la Complejidad”, la Doctora Maria Da Conceição de Almeida (2014) identifica dos formas de realizar investigación en complejidad: 1) desde lo pragmático, aplicando y modelando el concepto y 2) desde lo paradigmático, en relación a investigaciones y construcciones teóricas con base en reflexiones epistemológicas. En este sentido, la presente investigación es, predominantemente, de tipo pragmática.

Asimismo, la investigación es interdisciplinar en cuanto integra principios, atributos y teorías de los enfoques (pensamiento complejo, enfoque sistémico y ciencias de la complejidad) del paradigma de la complejidad aplicable a los sistemas complejos.

Universo de Estudio, Población y Muestra

El universo de estudio corresponde a todos los territorios del planeta tierra que se vieron afectados por la pandemia Covid-19 tanto por sus implicaciones en la salud pública como las demás consecuencias en la sociedad, la economía y el ambiente. La población estudiada, es decir el Sistema Complejo corresponde al municipio de Villavieja, el cual se analizó desde el todo hacia sus partes y desde sus partes hacia el todo; por lo tanto se integró información global disponible en la oficina de turismo local y en imágenes satelitales e información particular de la muestra conformada por 42 familias a las cuales se les aplicó una encuesta socio-económica.

Estrategia Metodológica

La estrategia metodológica de la presente investigación se compone de 4 fases descritas en la figura 15: 1) revisión bibliográfica, 2) recorrido de campo y definición de agentes del sistema, 3) recolección de información y 4) modelado e interpretación de resultados.

Figura 15. Fases de la estrategia metodológica.



Fase 1: revisión bibliográfica.

Esta fase consistió en recolectar y analizar trabajos de grado, libros, artículos científicos, noticias e informes de entidades públicas y privadas; relacionadas con tres aspectos: 1) el problema de la investigación, 2) los antecedentes de estudios de los impactos de la pandemia, el modelamiento de ecosistemas e investigaciones en la Tatacoa y 3) los fundamentos teóricos de los enfoques del paradigma de la complejidad aplicables a los sistemas complejos.

Fase 2: recorrido de campo y definición de agentes del sistema.

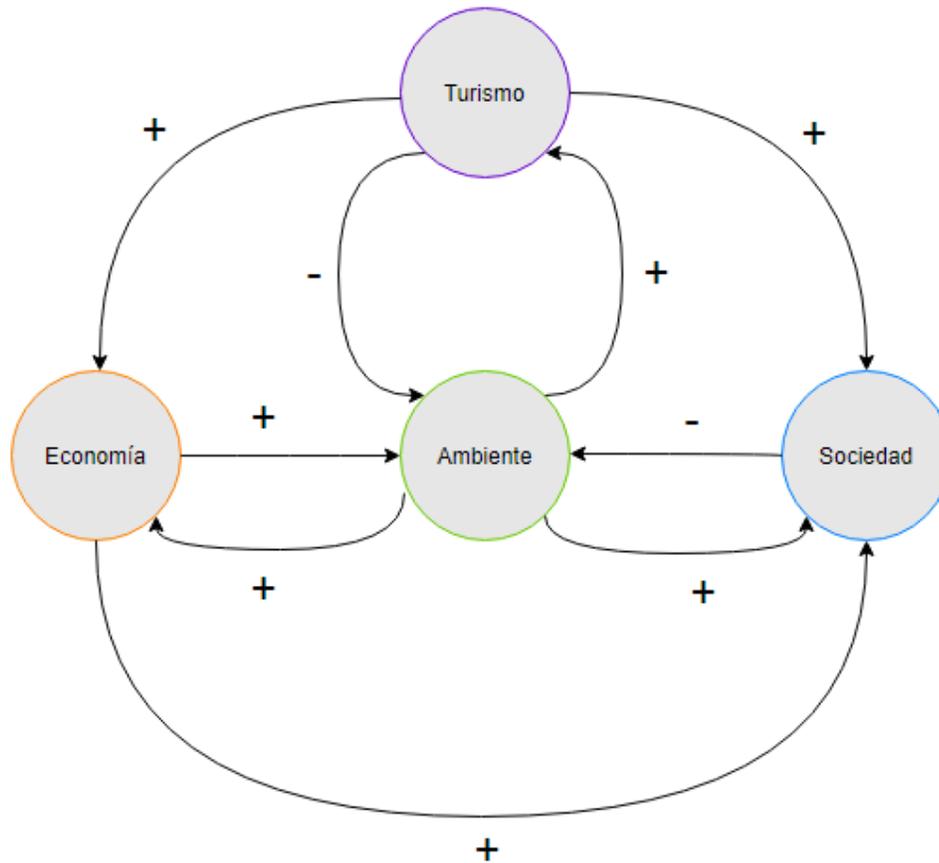
Esta fase consistió en realizar un recorrido por el ecosistema con el fin de identificar impactos observables, para lo cual se empleó libreta de campo y cámara fotográfica. La observación se realizó teniendo en cuenta la idea de Morin (1994) que dicta: “la parte de la realidad oculta por el objeto lleva nuevamente hacia el sujeto, la parte de la realidad oculta por el sujeto, lleva nuevamente hacia el objeto” (pág. 40).

Con base en lo observado en campo, se planteó un diagrama de relaciones causales²⁹ del ecosistema (figura 16), definiendo como subsistemas la sociedad, la economía y el ambiente y como flujo de entrada el turismo, las causalidades se representan con signos “+” o “-” según el carácter influenciado de un parámetro sobre otro.

En este sentido, se propuso al turismo como el conjunto de visitantes que llegan al ecosistema con el fin de realizar actividades académicas y/o recreativas; cuando este parámetro aumenta, mejora la economía local y la sociedad, ya que aumentan los ingresos económicos en el municipio y por ende la calidad de vida de la población, sin embargo el subsistema ambiente se ve afectado, ya que la carga de personas y contaminante, aumenta.

²⁹ García (2006) define a la causalidad como la "atribución de necesidades lógicas (teóricas) a la experiencia (observables y hechos)" (pág. 46). Es decir, la relación teórica que se propone entre los componentes del sistema, con el fin de explicar la influencia entre ellos.

Figura 16. Diagrama de relaciones causales del ecosistema.



Por su parte, cuando la economía mejora, aumenta la inversión en estrategias de conservación ambiental, lo que a su vez promueve la llegada de nuevos turistas atraídos por la belleza paisajística y el estado de conservación natural. Esto influye positivamente en el crecimiento poblacional y el desarrollo social, lo cual representa mayor cantidad de asentamientos en el ecosistema, que a su vez generan impactos negativos en el ambiente como pérdida de la cobertura vegetal por vertimientos.

Una vez definidos los componentes del sistema complejo, se procedió a identificar y seleccionar los agentes de mayor relevancia y establecer la disponibilidad de la información (antes, durante y después de las medidas de contención de la Covid-19) o la facilidad para obtenerla, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Agentes del ecosistema.

Subsistema	Agente	Fuente de la información
Turismo	Cantidad de turistas por mes	Oficina de coordinación turística del municipio de Villavieja.
	Vehículos que ingresan al ecosistema	
Economía	Ingresos económicos municipales por turismo	Encuesta.
	Ingresos familiares e individuales por turismo	
Sociedad	Nivel educativo	Estimación a partir de los ingresos económicos por individuo.
	Calidad de vida	
	Sentimientos generados por la pandemia	
	Empleo y desempleo	
	Nivel de pobreza y pobreza extrema	
Ambiente	Residuos sólidos	Estimación a partir de la cantidad de turistas.
	Cobertura vegetal	Imágenes satelitales.
	Emisiones de CO ₂	Estimación a partir de los vehículos que ingresan al ecosistema.

Fase 3: recolección de información.

De acuerdo a la fuente de información para cada parámetro, se procedió a aplicar las estrategias que permitieran obtener los datos, de forma primaria o secundaria.

Datos secundarios

Los datos diarios de los parámetros del subsistema turismo y sus ingresos económicos municipales, durante los años 2019 y 2020, fueron registrados por la oficina de coordinación turística del municipio de Villavieja y tabulados con una temporalidad mensual.

Aplicación de encuesta

La encuesta es una técnica para obtener información primaria a partir del diseño y aplicación de un conjunto de preguntas objetivas, coherentes y articuladas (Grande & Abascal, 2005).

Teniendo en cuenta que en el municipio de Villavieja alrededor de 700 familias dependen económicamente de las actividades del turismo, se tomó una muestra³⁰ de 42 familias a las cuales se les aplicó personalmente la encuesta del anexo C; con el fin de obtener un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 15% de información socio-económica.

Procesamiento de imágenes satelitales

Con el fin de establecer el área de cobertura vegetal, se seleccionaron imágenes del satélite de observación terrestre estadounidense Landsat 8 enviado en el año 2013 al espacio. El satélite cuenta con un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) que producen 11 bandas espectrales (tabla 4) (Earth Observing System, s.f.).

³⁰ El cálculo de la muestra se realizó utilizando la calculadora QuestionPro disponible en: <https://www.questionpro.com/es/calculadora-de-muestra.html>.

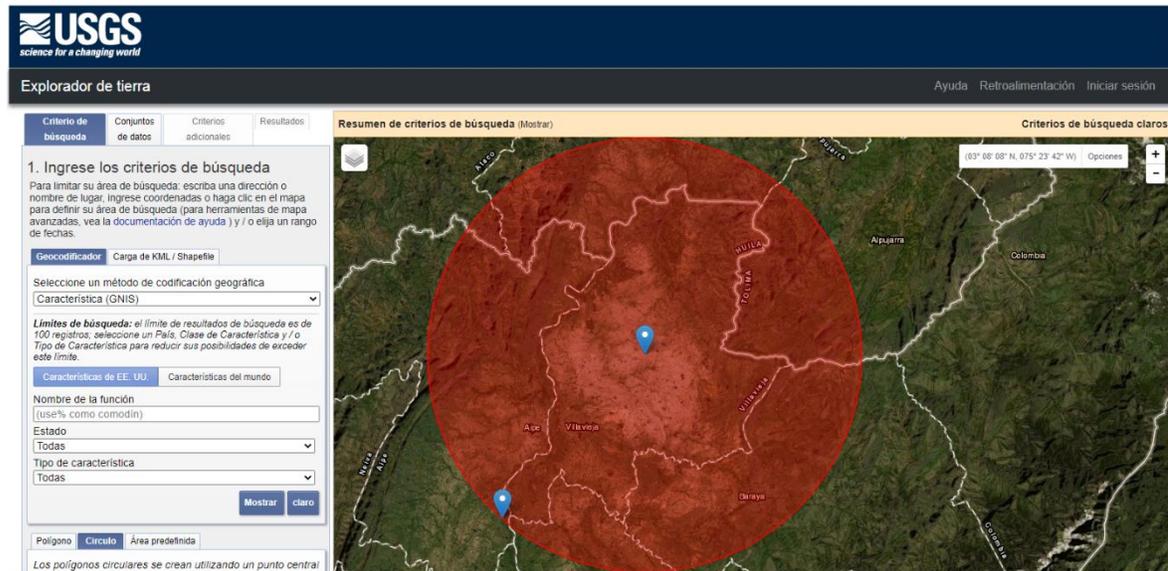
Tabla 4. Bandas espectrales del Landsat 8.

Sensor	Número de banda	Nombre de la banda	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
OLI	1	Costera	0.43 - 0.45	30
OLI	2	Azul (Blue)	0.45 - 0.51	30
OLI	3	Verde (Green)	0.53 - 0.59	30
OLI	4	Roja (Red)	0.63 - 0.67	30
OLI	5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
OLI	6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30
OLI	7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30
OLI	8	Pancromática	0.50 - 0.68	15
OLI	9	Cirros (Cirrus)	1.36 - 1.38	30
TIRS	10	Sensor térmico infrarrojo 1 (TIRS 1)	10.60 - 11.19	30 (100)
TIRS	11	Sensor térmico infrarrojo 2 (TIRS 2)	11.50 - 12.51	30 (100)

Nota: adaptado de *Acerca del Landsat 8* (Earth Observing System, s.f.).

Se descargaron 2 imágenes correspondientes a los meses de septiembre de 2019 y junio de 2020, es decir antes de la pandemia y durante las medidas de contención de la misma. Para realizar la descarga se utilizó el aplicativo de Earth Explorer de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en cual se creó un usuario y se seleccionaron imágenes con una nubosidad inferior al 30% (imagen 3).

Imagen 3. Buscador de imágenes satelitales: Earth Explorer.



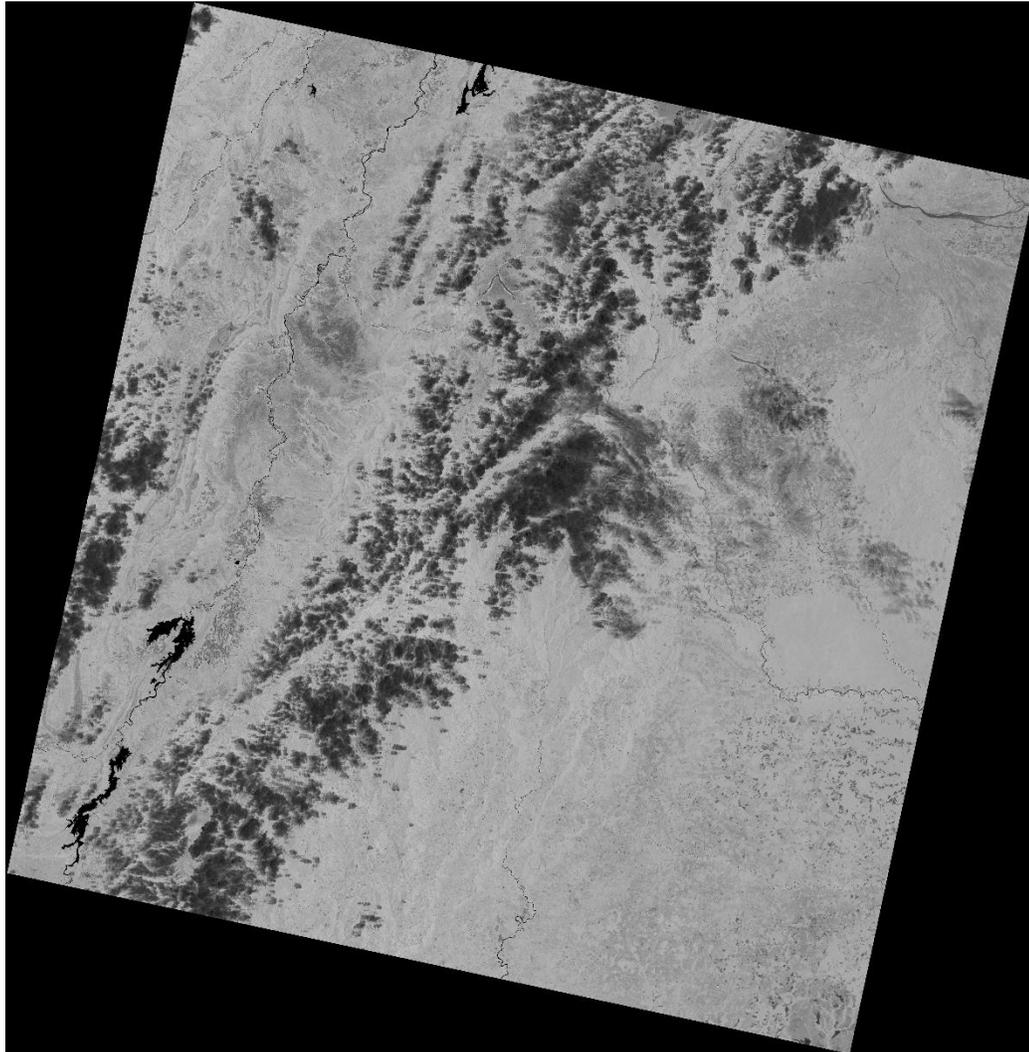
Nota: adaptado de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Una vez descargadas las imágenes, se procesaron utilizando el programa QGIS versión 3.16., el cual es un Sistema de Información Geográfica gratuito y de código abierto. En primer lugar se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) que se utiliza para estimar la calidad y cantidad de la vegetación de acuerdo a la radiación que esta emite o refleja. El NDVI se obtiene al combinar las bandas espectrales 5 infrarroja cercana y 4 roja, según la ecuación 1.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

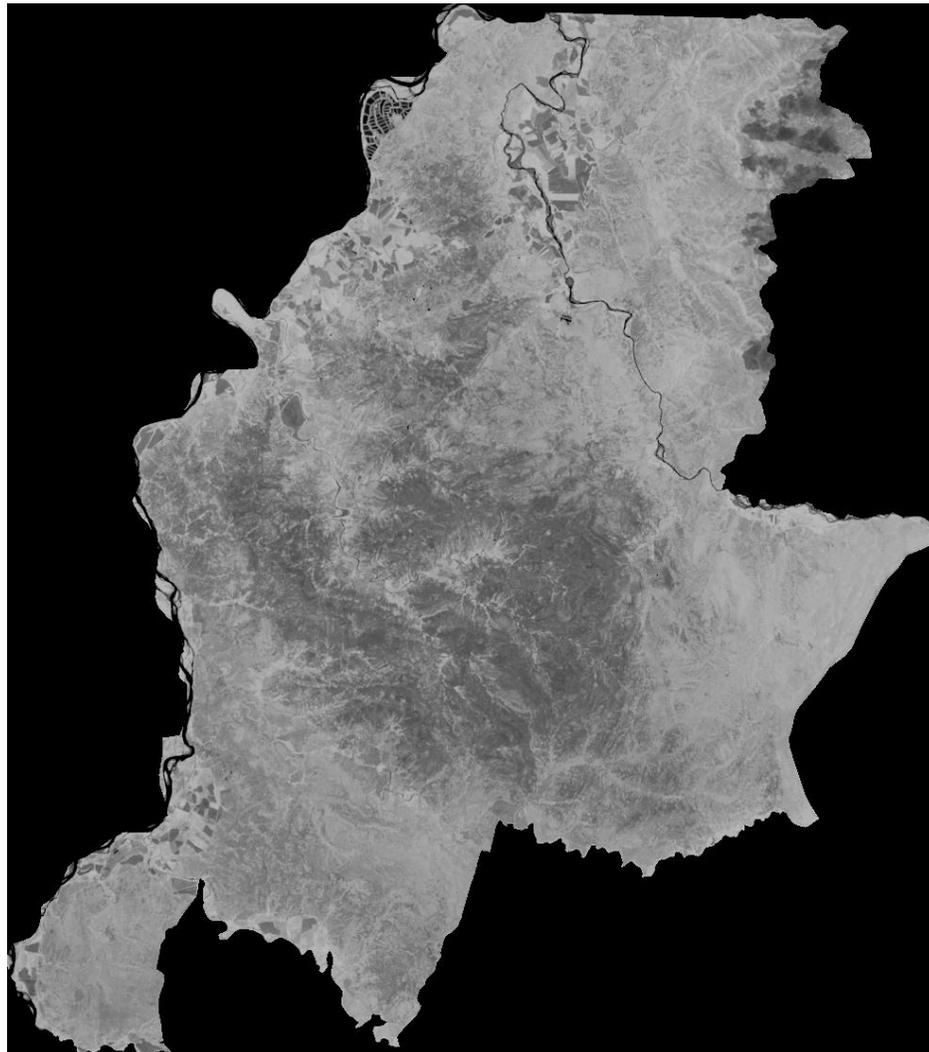
Para realizar el cálculo en el programa, se deben insertar las dos bandas o imágenes raster necesarias y la ecuación utilizando la calculadora de bandas del *software*. Al final se obtiene una imagen con la información del NDVI (imagen 4).

Imagen 4. NDVI de imagen satelital del área de estudio 2020.



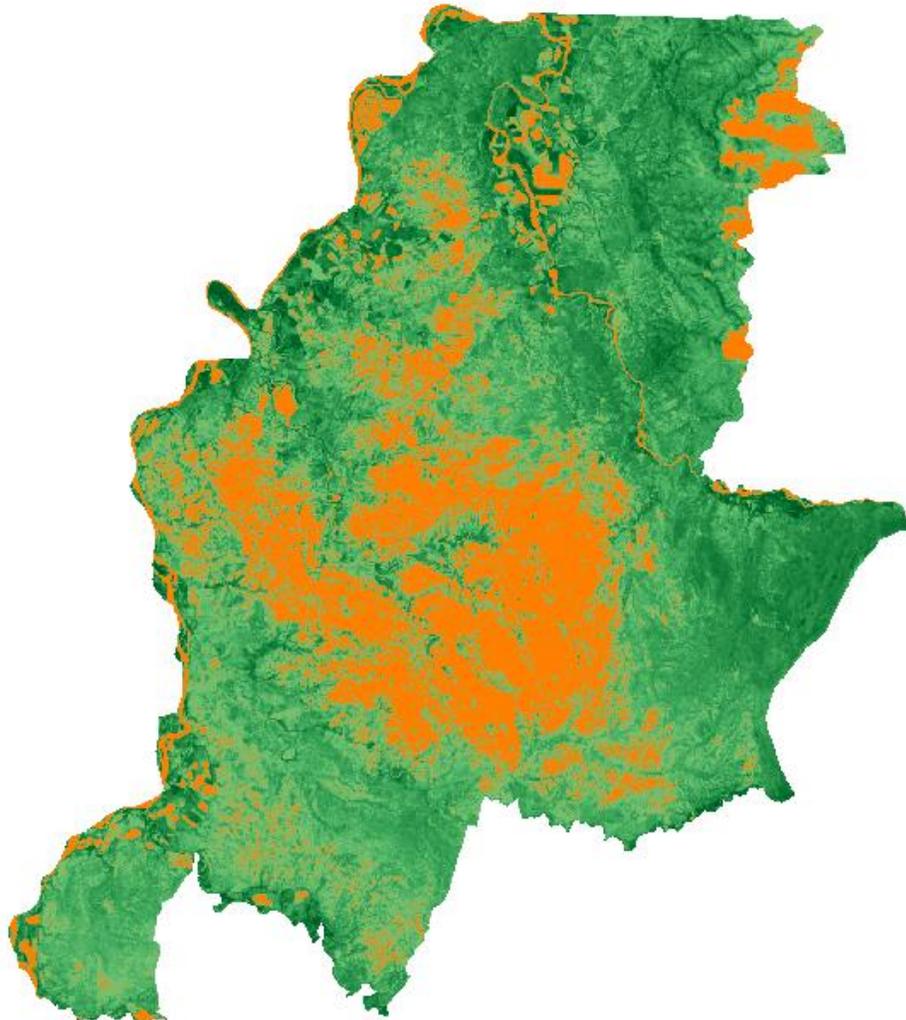
Posteriormente se recortaron las imágenes utilizando el área del municipio de Villavieja, obtenida del *shapefile* de la división administrativa de Colombia por municipios, disponible en el Geoportal del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (imagen 5).

Imagen 5. NDVI del municipio de Villavieja 2020.



Después se le aplicó color a cada imagen para distinguir las zonas de mayor cobertura vegetal con verde y las áreas de suelo descubierto con anaranjado, como se puede apreciar en la imagen 6. Posteriormente se realizó la reclasificación de cada imagen con el fin de determinar dos zonas: suelo descubierto con un NDVI entre 0 y 0.1 y cobertura vegetal con valores desde de 0.1 hasta 1.

Imagen 6. Identificación de las áreas de suelo descubierto y cobertura vegetal del ecosistema.



Finalmente, se ejecuta la opción de “informe de valores únicos de capa raster” de Qgis, la cual genera un archivo HTML con la información de los píxeles y el área de cada clase de zona definida en la reclasificación.

Fase 4: modelado del sistema complejo e interpretación de resultados

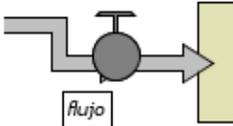
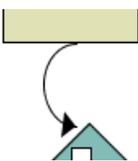
Para describir el subsistema social se emplearon dos programas Weka³¹ versión 3.8.5, el cual permitió la elaboración de un árbol de decisión sobre la dinámica de la calidad de

³¹ Weka es un *software* de minería de datos y aprendizaje automático.

vida y Gephi³² versión 0.9.2 con el que se elaboró un diagrama de redes para explicar la capacidad adaptativa de los diferentes grupos sociales clasificados según su escolaridad.

Con la información obtenida para los parámetros de cada subsistema se establecieron relaciones causales entre ellos y las respectivas ecuaciones utilizando Microsoft Excel, y se propuso un modelo del ecosistema basado en agentes, diseñado con el programa NetLogo versión 6.11. Este *software* es un lenguaje de programación creado por Uri Wilensky en 1999 para el modelado basado en agentes y cuenta con una herramienta denominada “modelador de dinámica de sistemas” que permite el análisis de las relaciones y comportamientos de las variables en diferentes escalas a partir del diseño con sus cuatro elementos básicos descritos en la tabla 5: 1) nivel, 2) variable, 3) flujo y 4) enlace.

Tabla 5. Elementos del modelador de dinámica de sistemas de Netlogo.

Nombre	Elemento	Descripción
Nivel o <i>stock</i>		Es un conjunto de elementos con un valor inicial.
Variable		La variable llama a un procedimiento a partir de una expresión numérica o una función.
Flujo o <i>flow</i>		El flujo inserta o retira valores de un nivel.
Enlace o links		El enlace hace que el valor de una parte del sistema se encuentre disponible para otra.

³² Gephi es un *software* ideal para el análisis de redes y la conectividad entre sus nodos.

En el panel de ejecución se dispone de botones y otros elementos que permiten visualizar la dinámica de las partes del sistema y del todo; tales como el botón *setup* que resetea el proceso, el botón *go* que lo reinicia, el deslizador para definir valores independientes, el monitor para observar el cambio de los parámetros o el gráfico en el que se presenta el comportamiento de los agentes.

El modelo del ecosistema se sintetiza teniendo en cuenta los principios del pensamiento complejo, los atributos del enfoque sistémico y las ciencias de la complejidad explicados en el marco teórico de esta investigación y se describen tanto los impactos de la pandemia, como dos escenarios futuros posibles en relación con el levantamiento o no de las medidas de restricción del turismo.

Análisis y Discusión de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación, empezando por cada subsistema (turismo, sociedad, economía y ambiente) y terminando con el modelo completo del ecosistema. La discusión gira en torno a los impactos ocasionados por la Covid-19, los aportes de la complejidad y dos escenarios futuros posibles.

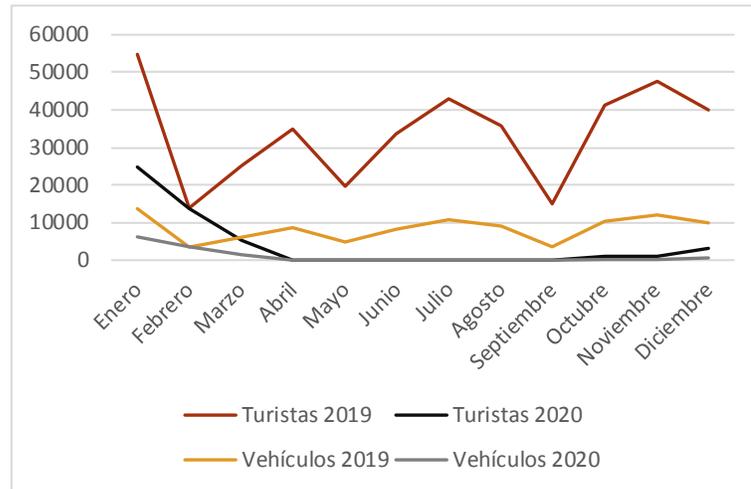
Subsistema turismo

El subsistema turismo se encuentra conformado por la cantidad de turistas y vehículos que ingresan al ecosistema. En los dos parámetros se observa la influencia de las medidas de contención de la Covid-19 durante los meses de marzo a septiembre del 2020, cuando las cifras estuvieron en cero; hacia el mes de octubre inició la reactivación del sector económico, el cual ha ido en aumento paulatinamente, los datos se registran en la tabla 6 y se puede observar la dinámica en la figura 17.

Tabla 6. Datos del subsistema turismo.

Mes	Turistas		Vehículos	
	2019	2020	2019	2020
Enero	54800	24800	13700	6200
Febrero	13888	13450	3472	3472
Marzo	25248	5248	6312	1312
Abril	34968	0	8742	0
Mayo	19840	0	4960	0
Junio	33480	0	8370	0
Julio	42904	0	10726	0
Agosto	35712	0	8928	0
Septiembre	14880	0	3720	0
Octubre	41200	830	10300	208
Noviembre	47728	954	11932	239
Diciembre	39928	3250	9982	813

Figura 17. Comportamiento de los agentes del subsistema turismo.



Subsistema económico

Uno de los agentes del subsistema economía son los ingresos económicos municipales generados por las actividades en el observatorio astronómico y en el museo paleontológico, agrupado mensualmente en la tabla 7.

Tabla 7. Datos de los ingresos económicos municipales.

Mes	Ingresos económicos municipales (\$)	
	2019	2020
Enero	7805000	35873500
Febrero	3692000	11227500
Marzo	12605500	3033600
Abril	20799500	0
Mayo	6024000	0
Junio	14459500	0
Julio	11121000	0
Agosto	18936500	0
Septiembre	6890000	0
Octubre	13871500	230000
Noviembre	11719500	580000
Diciembre	16196000	1020000

Los ingresos económicos municipales disminuyeron durante las medidas de contención, de manera abrupta debido al cierre de los dos atractivos turísticos. Lo cual influye sobre el mismo ecosistema, ya que se reduce la inversión destinada a la conservación por falta de dichos recursos.

En cuanto a los ingresos mensuales de la población, se les preguntó a los encuestados el número de integrantes de la familia y los ingresos familiares mensuales promedio que tenían antes de la pandemia, durante las medidas de contención y en los últimos meses del 2020, cuando se reactivó el turismo. Posteriormente se promediaron todas las respuestas. Estos datos son estimativos ya que por lo general las personas que trabajan en el turismo lo hacen de manera informal y por ende no se lleva un registro riguroso de los flujos económicos (ingresos – gastos - ganancias).

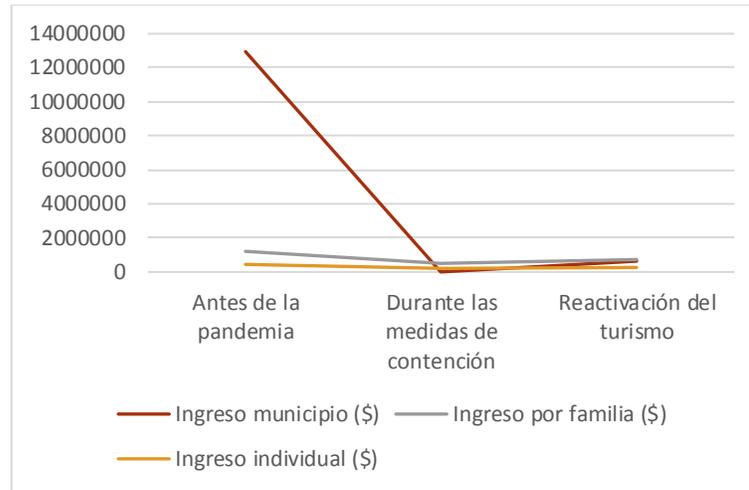
En la tabla 8 se presentan los datos de los agentes económicos. Antes de la pandemia los ingresos económicos de una familia cuya actividad depende directa o indirectamente del turismo, oscilaba entre \$350000 y \$3000000, durante las medidas de contención de la pandemia ese valor se ubicó entre \$0 y \$1200000, posteriormente se observa una recuperación de este agente, ya que pasa a estar entre \$170000 y \$1800000. Lo mismo ocurre a nivel municipal e individual.

Tabla 8. Datos del subsistema económico.

Época	Ingresos económicos promedio mensual municipales (\$)			Ingresos económicos promedio mensual por familia (\$)			Ingresos económicos promedio mensual por individuo (\$)		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Antes de la pandemia	3692000	35873500	12950306	350000	3000000	1209762	112500	1000000	441746
Durante las medidas de contención	0	0	0	0	1200000	502857	0	1200000	208028
Reactivación del turismo	230000	1200000	610000	170000	1800000	715238	60000	1200000	261170

En el sistema económico se refleja un impacto negativo, que afecta la calidad de vida de la población. En la figura 18 se relacionan las dinámicas propias de este subsistema.

Figura 18. Comportamiento de los agentes del subsistema económico



Subsistema social

En el subsistema social se realiza una estimación del comportamiento de algunos agentes relacionados con la calidad de vida humana (tabla 9).

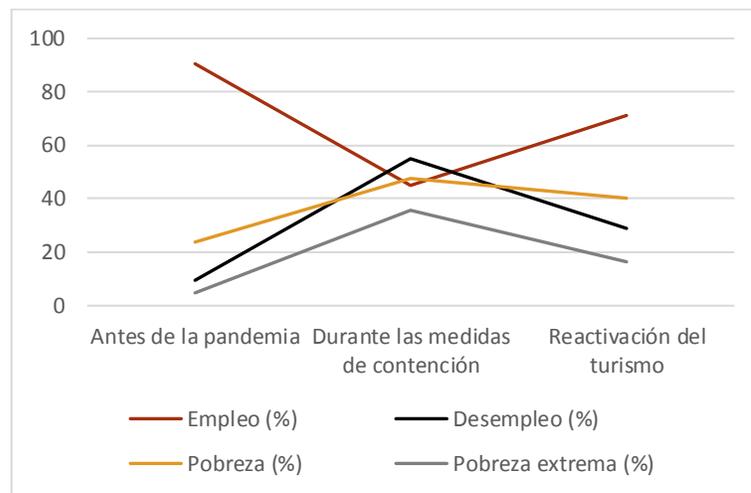
Tabla 9. Datos de los agentes sociales.

Época	Empleo (%)	Desempleo (%)	Pobreza (%)	Pobreza extrema (%)	Calidad de vida				
					Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala
Antes de la pandemia	90,5	9,5	23,8	4,8	23,8	47,6	28,6	0	0
Durante las medidas de contención	45	55	47,6	35,7	0	4,8	23,8	38,1	33,3
Reactivación del turismo	71	29	40,5	16,7	4,8	23,8	26,2	38,1	7,1

Las tasas de empleo y desempleo son inversamente proporcionales, tuvieron un cambio significativo durante las medidas de contención del virus. Un comportamiento similar, tuvieron los índices de pobreza y pobreza extrema calculados a partir de los ingresos mensuales por persona y la relación que indica que una persona es pobre si sus ingresos

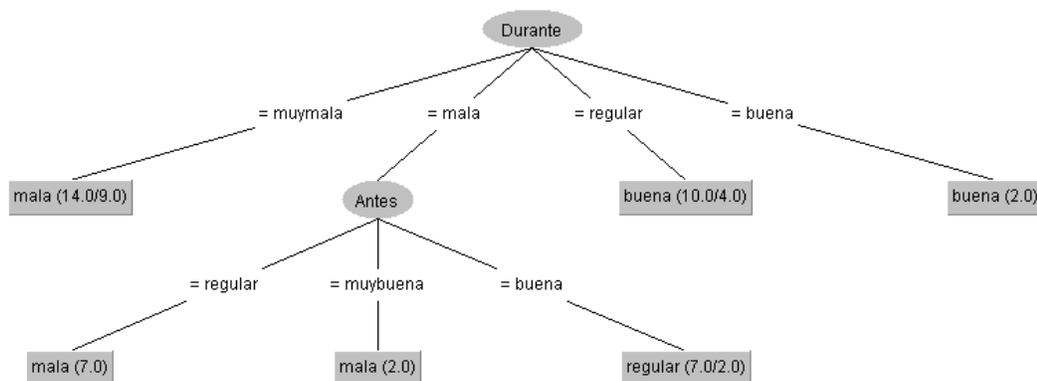
mensuales son inferiores a \$327500 o se encuentra en pobreza extrema si son menores a \$137350 (DANE como se citó en Revista Semana, 2020b). En la gráfica 19 se presenta la dinámica de los agentes empleo, desempleo, pobreza y pobreza extrema; se puede observar que la pobreza y la pobreza extrema aumentaron con la pandemia, mientras que el empleo disminuyó.

Figura 19. Comportamiento de algunos agentes sociales.



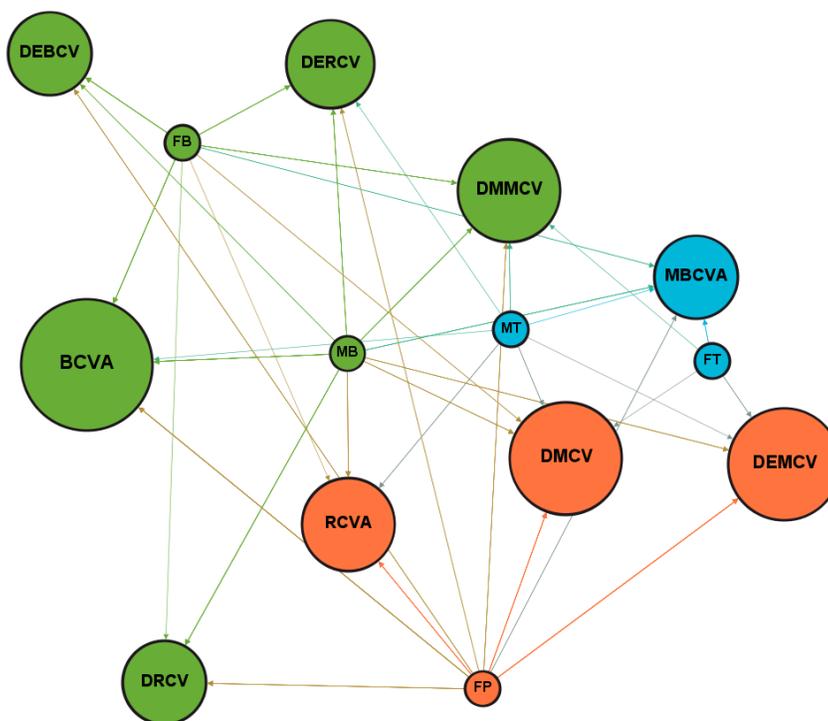
Para explicar los cambios en la calidad de vida, se propuso el diagrama de árbol de la figura 20, en el que se puede deducir que si durante las medidas de contención la vida fue buena, también lo será después; si fue regular, mejorará y si fue muy mala será mala después; aquí se puede observar una característica adaptativa de la sociedad.

Figura 20. Diagrama de árbol de la calidad de vida.



Según la encuesta aplicada se obtuvo que el nivel académico de la población se distribuye así: 14% técnico, 45% bachiller, 4,8% básica secundaria, 31% primaria y 4,8% primaria incompleta. Estos datos se conjugaron con la percepción de calidad de vida, para proponer un diagrama de redes (figura 21).

Figura 21. Diagrama de redes de la calidad de vida humana en el ecosistema.



Sigla	Significado
FP	Femenino - primaria
FB	Femenino – bachiller
MB	Masculino - bachiller
FT	Femenino – técnico
MT	Masculino - técnico
MBCVA	Muy buena calidad de vida antes de la pandemia
BCVA	Buena calidad de vida antes de la pandemia
RCVA	Regular calidad de vida antes de la pandemia
DMCV	Mala calidad de vida durante las medidas de contención
DMMCV	Muy mala calidad de vida durante las medidas de contención
DEMCV	Muy buena calidad de vida durante la reactivación turística
DEBCV	Buena calidad de vida durante la reactivación turística
DERCV	Regular calidad de vida durante la reactivación turística

En el diagrama se observa la capacidad adaptativa de las personas con nivel educativo bachiller, ya que antes de la pandemia la percepción de su calidad de vida era principalmente buena; sin embargo cuando dejaron de llegar los turistas paso a ser muy mala y regular, y al

reactivar las actividades en el ecosistema pasa a estar entre buena y regular. Mientras que las personas técnicas contaban con muy buena calidad de vida antes, pero no se evidencia una tendencia clara durante y después. Así mismo, las personas con nivel educativo primario consideran que su vida antes de la pandemia era regular, pero durante y después fue mala, es decir presentaron poca capacidad adaptativa, la cual puede estar relacionada con la falta de oportunidades laborales para las personas con menor preparación académica.

En la encuesta también se indagó sobre los impactos emocionales en la sociedad. El principal sentimiento que despierta la pandemia es la incertidumbre y el mayor temor son las pérdidas económicas (tabla 10).

Tabla 10. Agentes sociales emocionales.

Sentimientos que despierta la pandemia en la sociedad (%)		Temor frente a la pandemia (%)	
Incertidumbre	33,3	Pérdidas económicas Fallecimiento de parientes o amigos Contagiarse y contagiar a otros	38,1 35,7 26,2
Miedo	21,4		
Actitud positiva	14,3		
Estrés	14,3		
Desánimo - depresión	7,1		
Tristeza	7,1		
Impotencia	2,4		

Asimismo, se les preguntó a los encuestados sobre qué aspectos de su vida habían mejorado o empeorado durante las medidas de contención. La información se presenta en la tabla 11 y permite deducir, en términos generales, que el acceso al trabajo, la alimentación, los ingresos económicos y las relaciones de pareja empeoraron, la situación de vivienda, la vestimenta, la situación de salud y la relación con los hijos permaneció igual, mientras que el apoyo del gobierno mejoró.

Tabla 11. Influencia de la Covid-19 sobre algunos aspectos de la vida.

Aspecto de la vida	Peor que antes (%)	Mejor que antes (%)	Igual que antes (%)	No aplica (%)
Situación de vivienda	26,2	0	69	4,8
Acceso al trabajo	69	0	31	0
Alimentación	61,9	2,4	35,7	0
Vestimenta	31	0	69,9	0
Ingresos económicos	85,7	0	14,3	0
Apoyo del gobierno	31	42,9	26,2	0
Situación de salud	14,3	0	85,7	0
Relación con su pareja	45,2	0	40,5	14,3
Relación con sus hijos	33,3	0	45,2	21,4

Subsistema ambiental

La generación de residuos sólidos se estimó teniendo en cuenta que cada persona produce alrededor de 0.63 Kg/día en Latinoamérica³³ y que un turista permanece en promedio 2 días en la Tatacoa³⁴; para lo cual se empleó la ecuación 2.

$$\text{Residuos sólidos (Kg)} = \text{turistas} * 0.63 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} * 2 \text{ días} \quad (2)$$

Por su parte, la estimación de Dióxido de Carbono (CO₂) se hizo teniendo en cuenta que la combustión de un galón de gasolina produce alrededor de 20 libras del gas y que ese combustible alcanza para un recorrido cercano a 35 Km. Proponiendo un trayecto en carro de 7 Km, resulta la ecuación 3.

$$\text{Dióxido de Carbono (Kg)} = \text{vehículos} * \left(7 \text{ Km} * \frac{\text{gal}}{35 \text{ Km}}\right) * \left(20 \frac{\text{lb}}{\text{gal}}\right) * \left(\frac{1 \text{ Kg}}{2.2 \text{ lb}}\right) \quad (3)$$

³³ Según los datos de la Evaluación Regional desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo, la Organización Panamericana de la Salud y la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental un persona en Latinoamérica genera 0,63 kg/hab./día de residuos sólidos domiciliarios (El espectador, 2014).

³⁴ En encuesta realizada por portafolio verde (2014), el 50% de los turistas respondió que planeaban quedarse 2 días en la Tatacoa.

Las estimaciones de la generación de residuos sólidos y las emisiones de CO₂ por parte de los turistas, se presenta en la tabla 12. Cabe observar que si bien durante las medidas de contención de la pandemia los residuos sólidos provenientes del turismo disminuyeron, los residuos peligrosos aumentaron por el uso de elementos de protección personal como tapabocas y guantes; esto corresponde a una mirada de la realidad, pero no hay cifras para sustentarlo.

Tabla 12. Estimación de la generación de residuos sólidos y las emisiones de CO₂ por parte de los turistas en el Desierto de la Tatacoa.

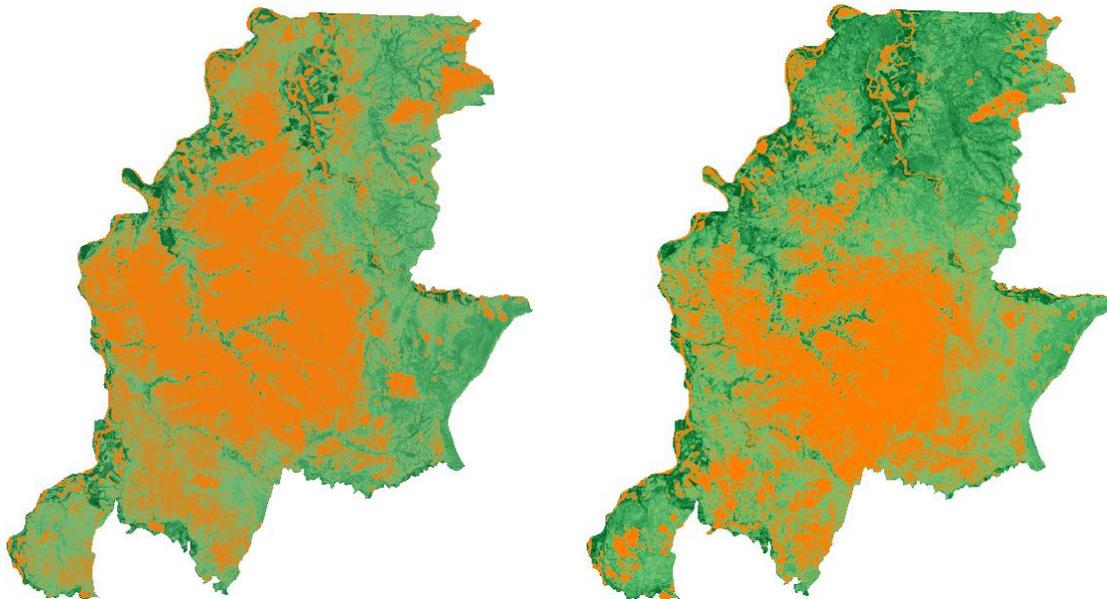
Mes	Generación de residuos sólidos (Kg)		Emisiones de Dióxido de Carbono (Kg)	
	2019	2020	2019	2020
Enero	69048	31248	24909	11273
Febrero	17499	17499	6313	6313
Marzo	31812	6612	11476	2385
Abril	44060	0	15895	0
Mayo	24998	0	9018	0
Junio	42185	0	15218	0
Julio	54059	0	19502	0
Agosto	44997	0	16233	0
Septiembre	18749	0	6764	0
Octubre	51912	1046	18727	378
Noviembre	60137	1202	21695	435
Diciembre	50309	4095	18149	1478

También es importante señalar que los residuos sólidos, salvo un pequeño porcentaje que se dispone inadecuadamente, se llevan al relleno sanitario Los Ángeles ubicado en el corregimiento de Fortalecillas, por lo tanto no impactan directamente a la Tatacoa, sino que hacen parte del flujo de salida del sistema complejo.

En cuanto al área de cobertura vegetal, se toman como referencia los datos del 28 de septiembre de 2019 y del 10 de junio de 2020 (imagen 7). Se observa un aumento de la cobertura vegetal que coincide con la disminución de los turistas presentes en el ecosistema; por lo tanto se considera que existe correlación, pero no se puede garantizar que haya

causalidad entre estos dos agentes, ya que la cantidad y calidad de la cobertura vegetal también depende de otros factores de tipo natural como la temperatura o la lluvia.

Imagen 7. Comparativo del agente cobertura vegetal, antes y durante las medidas de contención de la Covid-19.



28 de septiembre de 2019
 Cobertura vegetal: 45377,73 ha
 Suelo descubierto: 8462,07 ha

10 de junio de 2020
 Cobertura vegetal: 46224,18 ha
 Suelo descubierto: 7935,66 ha

Modelo basado en agentes del ecosistema Desierto de la Tatacoa

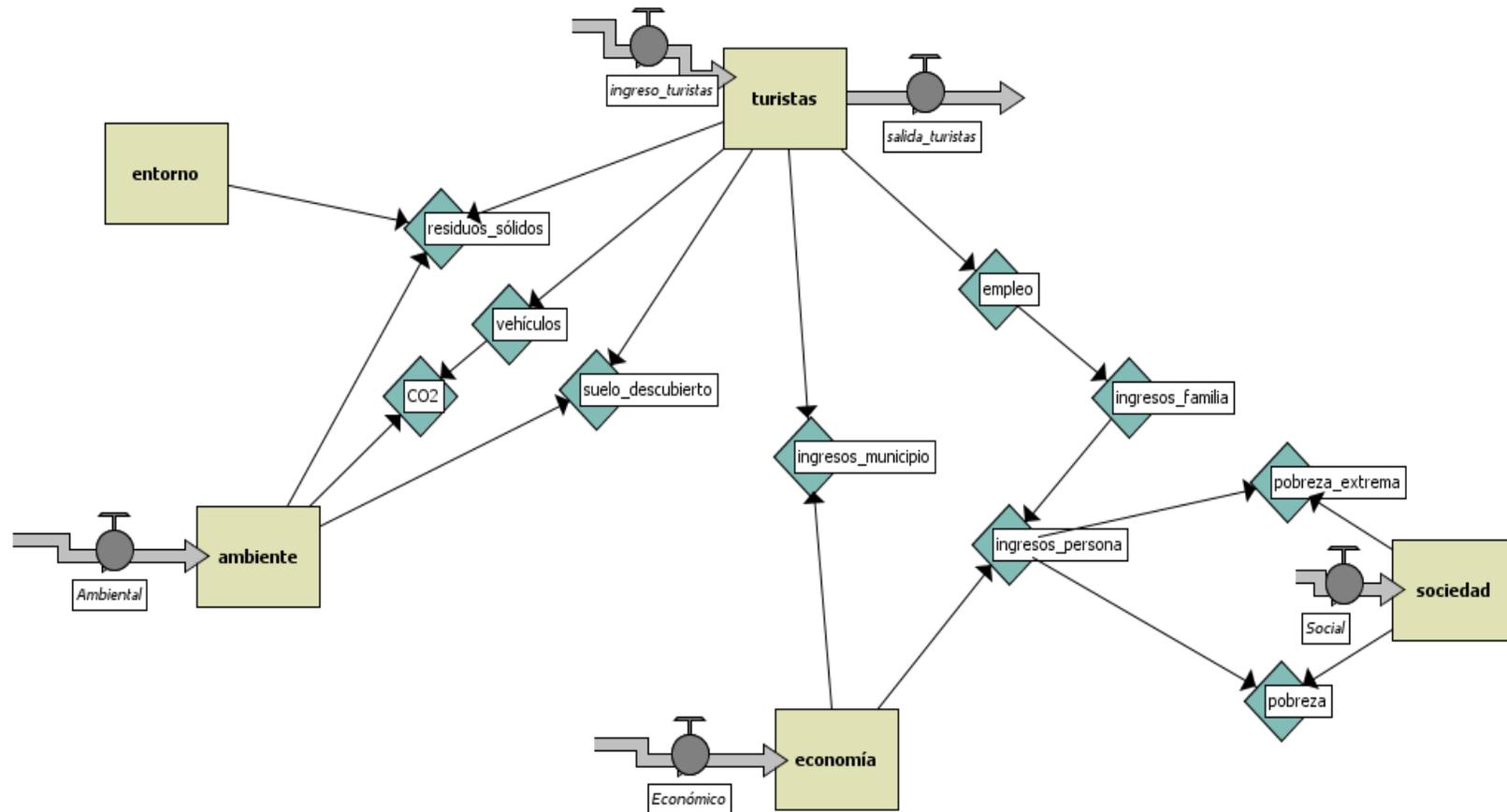
Con base en los resultados obtenidos para los agentes de los tres subsistemas (tabulados de forma grupal en el anexo D.), se determinó que la cantidad de turistas corresponde a un parámetro independiente que modela a los demás según las ecuaciones y coeficientes de correlación entre este parámetro y los otros. La información se obtuvo de *Microsoft Excel* y se presenta en la tabla 13 y en el anexo E. Estos datos son la base para la construcción del modelo en NetLogo. Los coeficientes de correlación son mayores a 0,7 lo que indica que existe una alta conexión entre los parámetros.

Tabla 13. Ecuaciones para la construcción del modelo en NetLogo.

Subsistema	Agente	Coefficiente de correlación	Ecuación
Turismo	Cantidad de turistas por mes (t)	Parámetro independiente	Parámetro independiente
	Vehículos que ingresan al ecosistema (V)	1	$V = 0,25t + 0,1254$
Economía	Ingresos económicos municipales por turismo (IEM)	0,84	$IEM = 320,42t + 774871$
	Ingresos económicos familiares por turismo (IEF)	0,94	$IEF = 19,727t + 590057$
	Ingresos económicos individuales por turismo (IEI)	0,97	$IEI = 6,7759t + 228346$
Sociedad	Empleo (E)	0,72	$E = 0,0011t + 56,759$
	Desempleo (D)	0,72	$D = -0,0011t + 43,241$
	Pobreza (P)	0,94	$P = -0,0007t + 44,689$
	pobreza extrema (PE)	0,67	$PE = -0,0007t + 27,044$
Ambiente	Generación de residuos sólidos (RS)	1	$RS = 1,26t$
	Emisiones de CO ₂	1	$CO_2 = 0,4545t + 0,2281$
	Cobertura vegetal (CV)	1	$CV = -0,0267t + 46224$
	Suelo descubierto (SD)	1	$SD = 0,0166t + 7935,7$

En el modelo propuesto, los agentes se presentan como variables en los rombos azules, los subsistemas en niveles, la dinámica está dada los flujos de entrada y salida, y las sinergias entre parámetros son los enlaces. El código del modelo se encuentra en el anexo F.

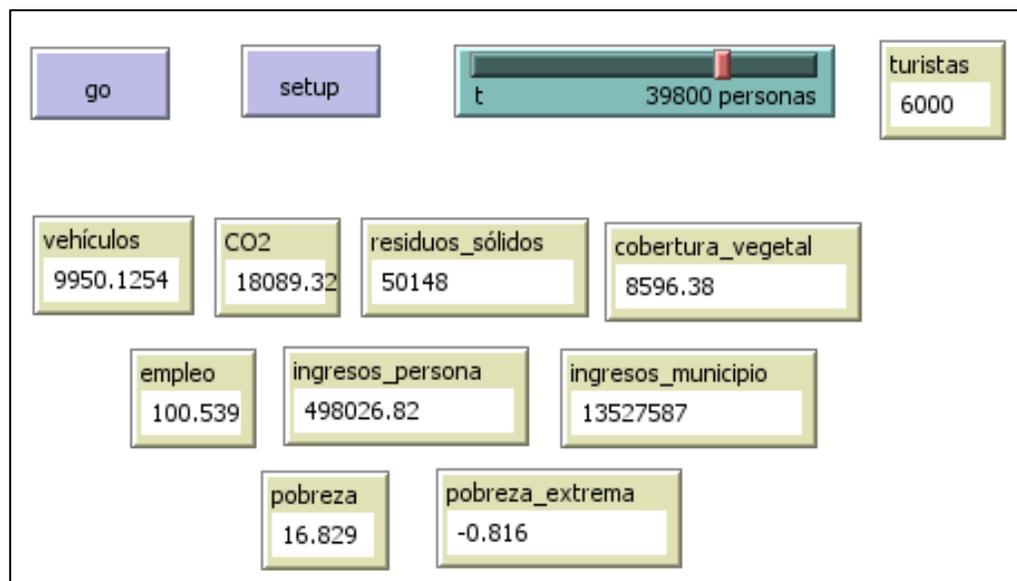
Figura 22. Modelo basado en agentes del ecosistema Desierto de la Tatacoa.



Luego de determinar los cambios en los agentes del sistema complejo, se asignó una ecuación a cada subsistema que da un valor a su flujo de entrada, con el fin de observar la dinámica con una perspectiva del ecosistema como unidad.

El agente turistas se fija por medio de un deslizador, ya que es un parámetro independiente, también se incluyeron los botones de *setup* y *go* para reiniciar el modelo y monitores que permiten ver la evolución numérica de cada agente (figura 23).

Figura 23. Botones, deslizador y monitores del modelo en NetLogo.



La calidad del subsistema ambiental responde a la ecuación 4, en la que se multiplica la cantidad de turistas por la suma de los valores de la generación de residuos sólidos, las emisiones de CO₂ y el área de suelo descubierto. Teniendo en cuenta que a medida que estos parámetros aumentan la calidad del ambiente disminuye, la ecuación es multiplicada por -1.

$$Calidad\ ambiental = -1 * t * (residuos\ sólidos + CO2 + suelo\ descubierto) \quad (4)$$

Por su parte, la calidad del subsistema económico está dada por los ingresos económicos municipales y personales multiplicados por los turistas, guardando una relación directamente proporcional, como se presenta en la ecuación 5.

$$\text{Calidad económica} = t * (\text{ingresos municipales} + \text{ingresos personales}) \quad (5)$$

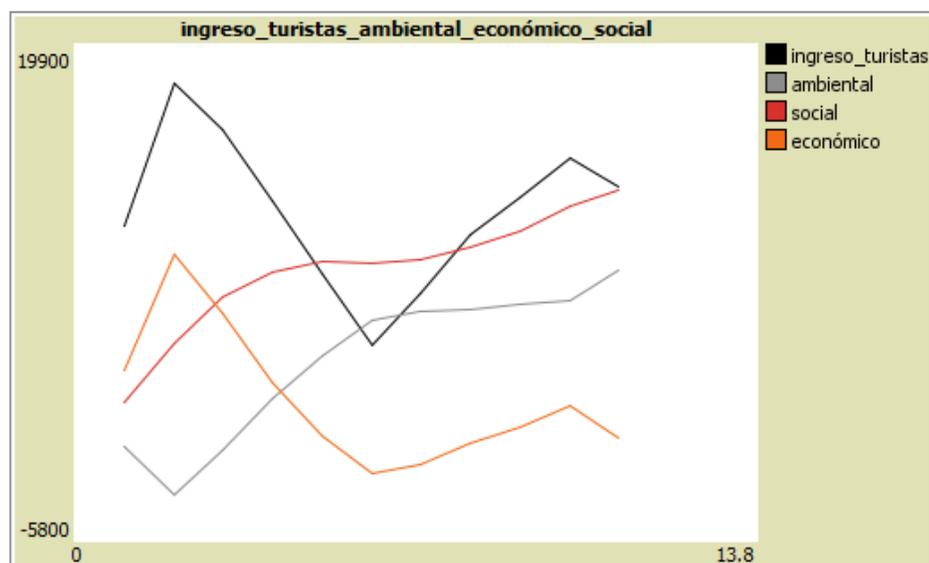
En cuanto a la calidad social, a mayores ingresos económicos personales, menor serán la pobreza y la pobreza extrema, por lo cual aumentará la calidad de vida de la población, como se muestra en la ecuación 6.

$$\text{Calidad social} = t * (\text{ingresos personales}) \quad (6)$$

Al correr el modelo se puede ajustar la cantidad de turistas por mes y observar las dinámicas de los subsistemas antes de la pandemia cuando llegaban entre 13000 y 55000 turistas, durante las medidas de confinamiento con 0 turistas y en los tres primeros meses del periodo de reactivación económica donde se registraron entre 1000 y 4100 turistas.

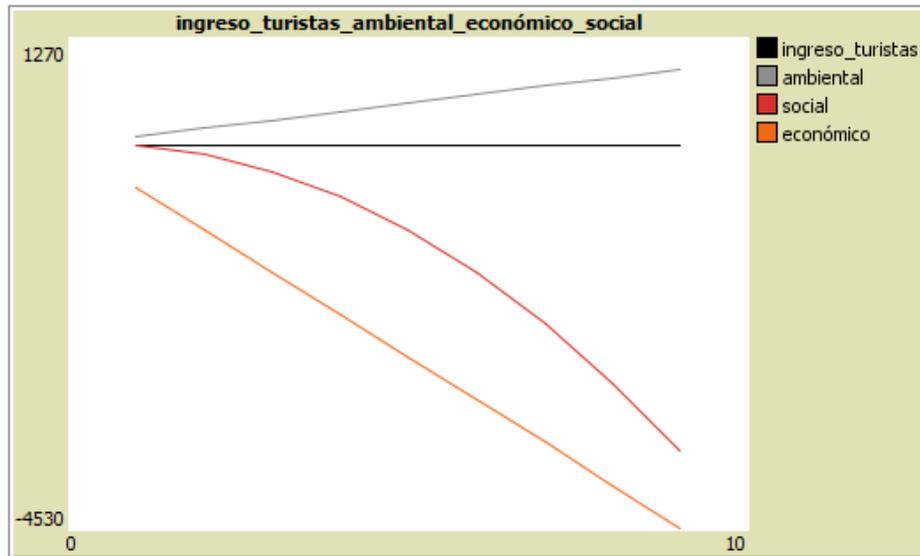
En la figura 24 se observa lo que ocurría antes de la pandemia, a mayor cantidad de turistas, mayor calidad económica y social, pero menor para el ambiente. Cuando la cantidad de turistas descienden, disminuye los ingresos económicos, mejora el ambiente y se observa resistencia al cambio en el subsistema social, lo que evidencia la capacidad adaptativa de la sociedad. Por lo cual se puede decir que esto obedece a su auto-eco-organización.

Figura 24. Dinámica del ecosistema antes de la pandemia Covid-19.



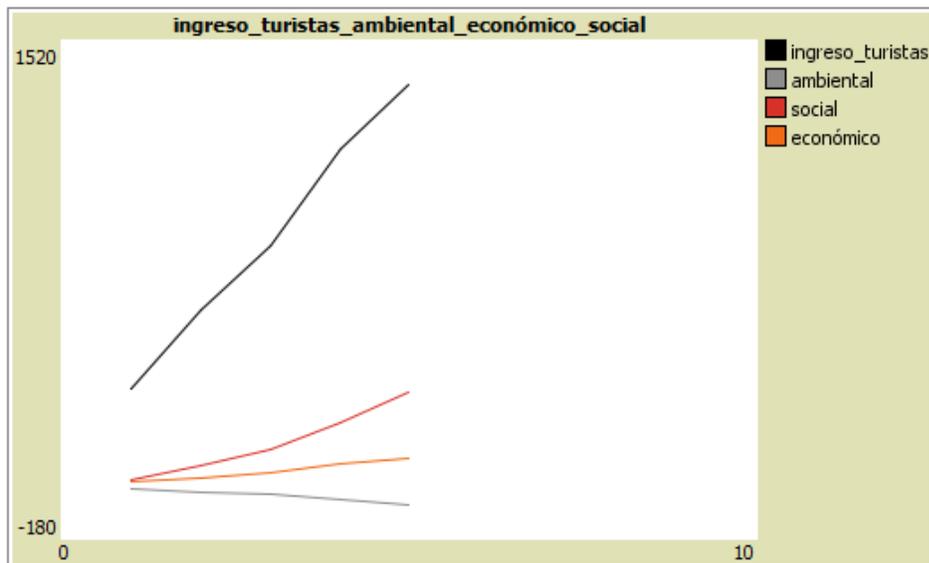
En la figura 25, se mantiene en 0 la cantidad de turistas, como ocurrió durante los meses en los que se implementaron las medidas de contención estrictas y se observa un impacto negativo socioeconómico, pero positivo para el ambiente.

Figura 25. Dinámica del ecosistema durante las medidas de contención de la pandemia Covid-19.



En la figura 26 se muestra la recuperación paulatina del sector socioeconómico, pero el ambiente declina.

Figura 26. Dinámica del ecosistema durante los primeros meses de reactivación del turismo.



De acuerdo al cambio en la tasa de turistas, la retroalimentación del sistema puede ser negativa o positiva, negativa cuando disminuye la presencia de turistas y surgen otras actividades económicas como mecanismo estabilizador de la sociedad y la economía o mejora la naturaleza, y positiva cuando aumentan los visitantes y los efectos son directamente proporcionales para la población y el ambiente; aunque mayormente perjudiciales para este último.

También se manifiesta el principio del bucle recursivo cuando el turismo influye sobre el ambiente y al mismo tiempo esa actividad económica depende de la calidad natural y paisajística, haciendo que el ecosistema se auto-eco-organice para alcanzar un equilibrio entre los dos factores.

Desde el enfoque sistémico, se lograron identificar elementos como la jerarquía al delimitar las partes y el entorno del ecosistema, relevantes para la investigación; el flujo de entrada compuesto por los turistas, sus vehículos e ingresos económicos y el de salida es decir los residuos sólidos que se depositan en otro sistema y los mismos turistas luego de realizar actividades académicas o recreativas; los demás elementos hacen parte del proceso de conversión de energía al interior del sistema.

La cantidad de turistas, máxima y mínima, representa un umbral dentro del cual puede sobrevivir el ambiente, la economía y la sociedad; ya que regula los elementos de estos subsistemas e incluso contribuye a la entropía o geneantropía no solo del sistema sino también de sus partes, según como sea el impacto que les causa. En este sentido, alcanzar la sostenibilidad significa lograr el equilibrio entre los agentes del sistema.

Los impactos de la pandemia Covid-19 en el Desierto de la Tatacoa

La Covid-19 se presenta ante el mundo como una catástrofe que ocasiona impactos sociales, económicos y ambientales, que obedecen a una dialógica entre lo positivo y negativo, entre el orden y el desorden, entre la muerte y la evolución de los sistemas complejos. En el modelo se pueden apreciar cambios significativos generando caos en el ecosistema en el ecosistema y obligándolo a desarrollar procesos adaptativos: antrópicos y naturales. En la tabla 14 se presentan los impactos de la pandemia en el ecosistema objeto de estudio, registrando su carácter positivo o negativo.

Tabla 14. Impactos de la Covid-19 en el Desierto de la Tatacoa

Subsistema	Agente	Impacto de la pandemia	Carácter
Turismo	<ul style="list-style-type: none"> Turistas Vehículos 	Disminución de los turistas y vehículos.	Positivo o negativo según su impacto sobre otros agentes.
		Fortalecimiento del turismo virtual.	Positivo
Economía	<ul style="list-style-type: none"> Ingresos económicos municipales por turismo Ingresos económicos familiares por turismo Ingresos económicos individuales por turismo 	Pérdidas económicas a nivel municipal.	Negativo
		Disminución en la disponibilidad presupuestal para la implementación de medidas de conservación.	Negativo
		Pérdidas económicas a nivel familiar y personal.	Negativo
		Cierre parcial o total de empresas.	Negativo
		Surgimiento de algunos negocios relacionados con el suministro de elementos de protección personal.	Positivo
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> Empleo Desempleo Pobreza pobreza extrema 	Aumento del desempleo.	Negativo
		Aumento de los índices de pobreza y pobreza extrema.	Negativo
		Disminución de la calidad de vida.	Negativo
		Impacto emocional sobre la persona.	Negativo
		Dificultades en las relaciones intrafamiliares.	Negativo
		Aumento de la ayuda gubernamental	Positivo
Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> Residuos sólidos Emisiones de CO₂ Cobertura vegetal 	Disminución de la contaminación por residuos sólidos.	Positivo
		Disminución de la contaminación atmosférica por CO ₂ .	Positivo
		Aumento de la cobertura vegetal	Positivo
		Aumento de la contaminación por residuos peligrosos.	Negativo

Los impactos en el turismo, la economía y la sociedad son principalmente de carácter negativo, sin embargo se observan alteraciones positivas como el fortalecimiento del turismo virtual, el surgimiento de nuevos negocios relacionados con la dotación de guantes, tapabocas y demás productos para contrarrestar la pandemia y el aumento de la ayuda gubernamental; como mecanismos de adaptación del sistema.

En cuanto al ambiente, los impactos son principalmente positivos, aunque se observó que aumentó la generación de residuos peligrosos por el uso de elementos de protección personal.

Posibles escenarios futuros

En la evolución de las ciencias tradicionales hacia paradigmas revolucionarios, los estudios en complejidad se inclinan, ya no hacia los hechos concretos, sino hacia las posibilidades. Es por ello, que en este trabajo se proponen dos escenarios posibles de las dinámicas del ecosistema Desierto de la Tatacoa, uno con la reactivación del turismo y el otro si no se volviera a desarrollar esa actividad.

Cuando se reactive el turismo en el Desierto de la Tatacoa se espera que mejoren las condiciones de vida de las personas, ya que aumentarán los ingresos económicos y abrirán nuevamente la mayoría de las empresas que han cerrado. Es posible que se presente un efecto rebote, en el cual luego de mucho tiempo sin poder practicar actividades turísticas, el número de visitantes aumente incluso hasta superar las cifras máximas de ese umbral en años anteriores. Se espera que los factores naturales del ecosistema vuelvan al estado que tenían antes de la pandemia e incluso presenten un retroceso por las actividades antrópicas que tomarán más fuerza.

Hipotéticamente, es posible que las actividades de turismo no se reactivarán por el efecto de la pandemia Covid-19 o de otras catástrofes con impacto similar, en ese escenario las actividades económicas de los operadores turísticos y demás personal de este sector, migrarían hacia la ganadería caprina, la agricultura o la prestación de otros servicios. Por su parte, el ambiente mejoraría su condición adaptándose y buscando su equilibrio dinámico natural.

Conclusiones

La presente investigación desarrollada en el Desierto de la Tatacoa, permitió evidenciar que los impactos de la Covid-19 en la economía y la sociedad son principalmente de carácter negativo: pérdidas económicas, cierre parcial o total de empresas, aumento del desempleo, disminución de la calidad de vida, entre otras; sin embargo hay alteraciones positivas como el fortalecimiento del turismo virtual, el surgimiento de nuevos negocios relacionados con la dotación de guantes, tapabocas y demás productos para contrarrestar la pandemia y el aumento de la ayuda gubernamental; como mecanismos de adaptación del sistema. En cuanto al ambiente, los impactos son principalmente positivos, aunque se observó un aumento en la generación de residuos peligrosos por el uso de elementos de protección personal.

Estos comportamientos se asemejan a lo ocurrido en otros ecosistemas como se evidenció en la revisión bibliográfica, por lo tanto se puede decir que los impactos de la pandemia se manifiestan con patrones del efecto mariposa conectando lugares geográficamente lejanos (mundo pequeño) y con auto-similitud a diferentes escalas, desde globales hasta locales.

A partir del procesamiento de imágenes del satélite de observación terrestre estadounidense Landsat 8, se logró establecer que la cobertura vegetal en el Desierto de la Tatacoa antes de la pandemia era de 45377,73 ha y aumentó a 46224,18 ha durante el tiempo en el cual no se realizaron actividades turísticas; de manera inversa, el área de suelo descubierto disminuyó de 8462,07 ha a 7935.66 ha. Esto permite inferir que en el ecosistema se dio una dinámica de recuperación del suelo, cuando disminuyó la presión ejercida por las actividades antrópicas en el lugar. Sin embargo, es importante aclarar que los cambios también pudieron obedecer a otros factores de tipo natural, como la temperatura o la lluvia. Por lo cual no se puede afirmar que la calidad y cantidad de cobertura vegetal esté estrictamente regulada por la presencia de turistas en el lugar.

En cuanto a la dinámica social, del diagrama de árbol elaborado con Weka sobre la calidad de vida, se puede inferir que si durante las medidas de contención la vida de la

población fue buena, también lo será después; si fue regular, mejorará y si fue muy mala será mala después; esto representa una característica adaptativa de la sociedad, que se evidencia además al conjugarla con la escolaridad de la población en el diagrama de redes propuesto en Gephi, del que se deduce que las personas con menor capacidad adaptativa ante una catástrofe como la pandemia, son las de escolaridad primaria, es decir el grupo de encuestados con el nivel de educación más bajo.

Por su parte, la economía presentó una transformación directamente proporcional al turismo, cuando el número de visitantes bajó a cero, los ingresos económicos municipales y familiares, por este concepto, se redujeron drásticamente; en algunos hogares el único ingreso se dio por las ayudas del gobierno, ya que no podían laborar. Así mismo, a partir del mes de octubre de 2020 cuando se dio la reactivación del turismo, empezó la paulatina recuperación del sector.

El modelo basado en agentes diseñado en el *software* NetLogo, está compuesto por los subsistemas turismo, sociedad, economía y ambiente, conformados a su vez por agentes que presentan sinergia entre sí. El subsistema turismo está compuesto por dos agentes que al mismo tiempo hacen parte del flujo de entrada y salida del ecosistema: 1) los turistas, quienes influyen en la generación de residuos sólidos que en su mayoría pasan a hacer parte del entorno del sistema, ya que se llevan a un relleno sanitario externo, en la cobertura vegetal, en los ingresos económicos municipales e individuales y en la tasa de empleo, 2) los vehículos que tienen una relación causal sobre la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂.

También se puede decir que existe una relación directa entre los ingresos económicos y las tasas de pobreza y pobreza extrema, que a su vez repercuten sobre la calidad de vida de las personas, en términos de capacidad para cubrir las necesidades básicas, las relaciones interpersonales en la familia y los sentimientos individuales frente a la catástrofe. En este sentido, el 45,2% de los encuestados informó que la relación con su pareja era peor que antes de la pandemia. Por su parte, el 33,3% de los encuestados manifestó que el mayor sentimiento que le despierta la pandemia es la incertidumbre, frente a un 14,3% que señaló

una actitud positiva. El modelo permitió ver estas relaciones entre agentes que al principio no se lograron observar en la visita de campo.

El trabajo permitió además proponer proyecciones del ecosistema en dos posibles escenarios futuros: 1) Cuando se reactive completamente el turismo, se espera que los agentes se comporten como lo hacían antes de la pandemia e incluso se presente un efecto rebote en los impactos, ya que luego del periodo de tiempo de confinamiento, se cree que las personas empezarán a realizarán las actividades turísticas con más fuerza, es decir se manifestará la entropía del sistema que ha sido contenida por la pandemia. Entonces cuando aumenten los turistas, aumentarán los residuos sólidos, las emisiones de gases de efecto invernadero y el área de suelo descubierto, afectando al ambiente; pero aumentará el empleo, los ingresos económicos y por ende mejorará la calidad de vida de las familias que dependen del turismo; 2) si no volvieron los visitantes, las actividades económicas de las personas que se dedican al turismo migrarían hacia la ganadería caprina, la agricultura o la prestación de otros servicios y el ambiente buscaría su equilibrio dinámico natural. En todo caso se proponen transformaciones adaptativas de los agentes, los subsistemas y el sistema complejo en su totalidad.

El paradigma de la complejidad ofrece una serie de herramientas, principios, teorías, tecnologías de punta y ciencias que ayudaron a construir un modelo basado en agentes del ecosistema para explicar los impactos de forma interdisciplinar, integrando elementos del pensamiento complejo, el enfoque sistémico y las ciencias de la complejidad.

En el ecosistema se manifiestan los principios del pensamiento complejo, ya que se logró alcanzar un conocimiento tanto de sus partes como del todo de forma hologramática, sin caer en el reduccionismo o el holismo. Investigar desde la complejidad es un reto que implica el cambio de pensamiento clásico hacia uno revolucionario, hacia uno que integre lógicas no clásicas para entender la realidad y sus posibilidades.

Abordar al sistema complejo, desde el enfoque sistémico ayudó a definir los atributos, características y jerarquías relevantes para la investigación, delimitando lo que era relevante para la investigación de lo que no.

En este sentido, las ciencias de la complejidad aportaron rigor al trabajo, ya que de una u otra forma la termodinámica del no equilibrio, la teoría del caos, la geometría de fractales, las catástrofes, las lógicas no clásicas y la ciencia de redes, se manifiestan en el problema y ayudan a entenderlo, ya sea como globalidad o desde sus manifestaciones a nivel local.

La estrategia metodológica empleada incluyó diferentes fases para la recolección de información y su procesamiento, que fueron muy útiles para entender el problema y colocar a prueba las hipótesis. Se emplearon algunas herramientas de programación computacional como *Qgis* para el procesamiento de imágenes satelitales que permitieron establecer el cambio en la cobertura vegetal, *Weka* para elaborar el diagrama de árbol con el que se explica la dinámica de la calidad de vida de la población, *Gephi* para construir el diagrama de redes que permite ver la capacidad adaptativa de la sociedad y por último, *NetLogo* para integrar todos los elementos en un modelo del ecosistema.

Esta investigación es innovadora y representa una herramienta metodológica para la toma de decisiones gubernamentales y la preparación ante próximas catástrofes como la que se está viviendo actualmente, no solo en este ecosistema objeto de estudio sino también en otros alrededor del mundo.

Recomendaciones

En el paradigma de la complejidad tienen cabida diversas disciplinas que permiten comprender y proponer soluciones a problemas, fenómenos y situaciones de diversa índole que presentan complejidad creciente; en este sentido, la estrategia metodológica propuesta puede ser empleada para entender los impactos ocasionados por distintas catástrofes en diversos lugares.

En cuanto al procesamiento de imágenes satelitales, se recomienda filtrar los archivos con una nubosidad mínima, antes de descargarlos; ya que los resultados de cobertura vegetal cuando la nubosidad es alta se alejan de la realidad, generando errores en los datos.

Sobre la construcción de modelos basados en agentes, se recomienda indagar inicialmente sobre la disponibilidad de la información secundaria, la facilidad para obtener los datos y la disponibilidad de las herramientas necesarias para ello o en caso tal, la facilidad para estimar los datos a partir de otros ya existentes.

Asimismo, se hace una cordial invitación a los estudiantes de la Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad de la universidad Surcolombiana y a otros investigadores con interés en el tema, a escudriñar la realidad que desean estudiar y abrir la mente a las posibilidades, a fin de integrar lo divergente, entrelazar las disciplinas y observar emergencias, que desde la mirada clásica sería imposible.

Referencias Bibliográficas

- Adhanom Ghebreyesus, T. (11 de febrero de 2020). *Solidaridad mundial, colaboración y medidas urgentes necesarias para derrotar al brote del nuevo coronavirus*. Recuperado el 19 de agosto de 2020, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/commentaries/detail/global-solidarity-collaboration-and-urgent-action-needed-to-defeat-the-new-coronavirus-outbreak>
- Agudelo Patiño, L. (2010). *La ciudad sostenible. Dependencia ecológica y relaciones regionales; un estudio de caso en el área metropolitana de Medellín, Colombia*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Aguilera Ontiveros, A., & Posada Calvo, M. (2017). *Introducción al modelado basado en agentes. Una aproximación desde NetLogo* (primera edición ed.). San Luis de Potosí. Recuperado el 16 de enero de 2021
- Alarcón Holguín, J. (2020). *Equipos de protección para coronavirus Covid-19 y su impacto ambiental en Playita Mía, Manta*. Jipijapa, Manabí, Ecuador: Universidad Estatal del Sur de Manabí. Recuperado el 23 de noviembre de 2020
- Al-Majdalawi Álvarez, A. (2005). Matemáticas en la vida cotidiana. Fractales. *Curso*. Recuperado el 23 de diciembre de 2020, de [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20\(Amir%202006\).pdf](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20(Amir%202006).pdf)
- Arnold C., M., & Rodríguez M., D. (1990). Crisis y cambio en la ciencia social contemporánea. *Revista Estudios Sociales*(65). Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Arnold Cathalifaud, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría Genral de Sistemas. *Cinta de Moebio Revista Epistemológica de Ciencias Sociales*(3), 40-49. Recuperado el 26 de 12 de 2020, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10100306>

- Banco Mundial. (08 de junio de 2020). *Impactos proyectados sobre la pobreza del COVID-19 (coronavirus)*. Recuperado el 12 de septiembre de 2020, de The World Bank: <https://www.worldbank.org/en/topic/poverty/brief/projected-poverty-impacts-of-COVID-19>
- Barrio, E. (2016). *Lógicas no clásicas: inconsistencias sin trivialidad*. Universidad de Buenos Aires.
- BBC NEWS. (06 de abril de 2020). *Coronavirus: cómo las medidas contra la pandemia están causando que la Tierra vibre menos*. Recuperado el 01 de octubre de 2020, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52177361>
- Bertalanffy, L. (1956). The Theory of Open Systems. *General System Yearbook*.
- Bertalanffy, L. (1968). *Teoría General de los Sistemas, fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. (J. Almela, Trad.)
- Bonet Morón, J., Ricciulli Marín, D., Pérez Valbuena, G., Galvis Aponte, L., Haddad, E., Araújo, I., & Perobelli, F. (mayo de 2020). Impacto Económico Regional del Covid-19 en Colombia: un análisis insumo-producto. (C. d.-B. República, Ed.) *Documentos de trabajo sobre economía regional y urbana*(288), 34.
- Borunda, A. (26 de mayo de 2020). *La disminución de las emisiones de carbono, por las restricciones de COVID-19, no apaciguará el cambio climático*. Recuperado el 1 de octubre de 2020, de National Geographic: <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2020/05/disminucion-de-las-emisiones-de-carbono-no-apaciguara-el-cambio-climatico>
- Briceño, J., Cañizales, B., Rivas, Y., Lobo, H., Moreno, E., Velásquez, I., & Ruzza, I. (enero-junio de 2010). La holística y su articulación con la generación de teorías. *Educere La Revista Venezolana de Educación*, 14(48), 73-83. Recuperado el 23 de diciembre de 2020
- CAMS. (17 de marzo de 2020). *La información sobre la calidad del aire confirma la reducción de los niveles de actividad debido al bloqueo en Italia*. Recuperado el 19

de septiembre de 2020, de Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus:
<https://atmosphere.copernicus.eu/air-quality-information-confirms-reduced-activity-levels-due-lockdown-italy>

Carballo, E., Monterroza, L., & López Tobar, R. (2020). Impacto Social del Covid-19 en el Salvador. En U. A. Ana (Ed.), *Narraciones de Impacto del Covid-19 en el Salvador Testimonios y perspectivas* (primera ed., pág. 290). El Salvador: UNASA. doi:978-99961-335-7-2

Castaldo Suau, B. (2012). *De los paradigmas arcaicos a la Teoría Gneral de Sistemas, aplicación al análisis, creación y enseñanza del diseño*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado el 26 de diciembre de 2020

Cebeiro, M., & Watzlanick, P. (1998). *La construcción del universo, conceptos introductorios sobre epistemología, constructivismo y pensamiento sistémico*. Barcelona, España: Herder S.A. Recuperado el 17 de diciembre de 2020

CREA. (2020). *Cómo la contaminación del aire empeora la pandemia de COVID-19*. Recuperado el 24 de septiembre de 2020, de Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio: <https://energyandcleanair.org/publications/how-air-pollution-worsens-the-covid-19-pandemic/>

Da Conceição de Almeida, M. (2014). Un estado del arte de las ciencias de la complejidad. 1ra Parte. *Visión Docente Con-Ciencia*(72), 14-20. Recuperado el 11 de diciembre de 2020

Da Conceição de Almeida, M. (2014). Un estado del arte de las ciencias de la complejidad. 2da Parte. *Visión Docente Con-Ciencia*, 21-27. Recuperado el 11 de diciembre de 2020

Daily, G. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington DC, Estados Unidos: Island Press.

DANE. (2020). *Principales indicadores del mercado laboral - agosto de 2020*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado el 01 de octubre de 2020

Earth Observing System. (s.f.). Recuperado el 06 de 01 de 2021, de Acerca del Landsat 8: <https://eos.com/es/landsat-8/>

ECDC. (01 de octubre de 2020). *Download today's data on the geographic distribution of COVID-19 cases worldwide*. Recuperado el 09 de septiembre de 2020, de European Centre for Disease Prevention and Control: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/download-todays-data-geographic-distribution-covid-19-cases-worldwide>

El espectador. (16 de mayo de 2014). *¿Sabes cuánta basura generas en un día? El espectador*. Recuperado el 12 de enero de 2020

Elizalde Prada, Ó. (enero de 2013). Aproximación a las ciencias de la complejidad. *Revista de la Universidad de la Salle*, 45-66. Recuperado el 14 de diciembre de 2020

Eljarrat, E. (05 de mayo de 2020). *Daños colaterales de la COVID-19: el resurgir del plástico*. Recuperado el 01 de octubre de 2020, de The Conversation, Academic rigor, journalistic flair: <https://theconversation.com/danos-colaterales-de-la-covid-19-el-resurgir-del-plastico-137803>

Espinoza, M. (1995). René Thom: e la teoría de catástrofes a la metafísica. *La filosofía de los científicos*, 321-348. Recuperado el 23 de diciembre de 2020

Estrada García, A. (2020). Los principios de la complejidad y su aporte al proceso de enseñanza. *Ensaio: aval.*, 28(109), 1012-1032. Recuperado el 21 de diciembre de 2020

Evans, S. (09 de abril de 2020). *Análisis: el coronavirus provocará la mayor caída anual en las emisiones de CO2*. Recuperado el 15 de septiembre de 2020, de CarbonBrief Clear on Climate: <https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-set-to-cause-largest-ever-annual-fall-in-co2-emissions>

- Félix Mendoza, Á., & García Reinoso, N. (enro-junio de 2020). Estudio de pérdidas y estrategias de reactivación para el sector turístico por crisis sanitaria Covid-19 en el destino Manta - Ecuador. *Revista Internacional de Turismo, Empresa y Territorio*, 4(1), 79 - 103. doi:10.21071/riturem.v4i1.12743
- Flórez, A., & Thomas, J. (1993). La Teoría General de Sistemas. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 4(1-2), 111-137. Recuperado el 26 de diciembre de 2020
- Galvis Arias, N. (03 de agosto de 2020). La pobreza en Colombia antes y después de la COVID-19. *Razón Pública para saber en serio lo que pasa en Colombia*. Recuperado el 01 de octubre de 2020, de <https://razonpublica.com/la-pobreza-colombia-despues-la-covid-19/>
- Ganzález, J. (marzo de 2009). La teoría de la complejidad. (U. N. Colombia, Ed.) *DYNA*, 76(157), 243-245. Recuperado el 20 de diciembre de 2020
- García Olivares, A. (1999). La evolución de la complejidad. *Empiria revista ed metodología de ciencias sociales*(2), 93-128. doi: <https://doi.org/10.5944/empiria.2.1999.712>
- García Vázquez, J., & Sancho Caparrini, F. (2016). *Netlogo, una herramienta de modelado*. Recuperado el 30 de noviembre de 2020
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos, conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria* (primera edición ed.). Barcelona, España: Editorial Gedisa S.A. Recuperado el 10 de diciembre de 2020
- Gell-Man, M. (1995). *El quark y el jaguar, aventuras en lo simple y lo complejo* (primera edición ed.). (A. García, & R. Pastor, Trads.) Barcelona, España: Tusquets Editores, S.A. Recuperado el 10 de diciembre de 2020
- Giraldo Uribe, J. J., Sánchez Muñoz, M., & Ruíz Agudelo, H. (08 de junio de 2020). Propuesta de indicadores ambientales para un turismo sostenible en el desierto de la Tatacoa, Huila, Colombia. *Semestre Económico*, 23(54), 239-261. doi:<https://doi.org/10.22395/seec.v23n54a12>

- Godoy, F. (2008). El desorden Organizado. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, IX(18-19), 63-83. Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Gössling, S., Scott, D., & Hall, C. (27 de abril de 2020). Pandemics, tourism and global change: a rapid assessment of COVID-19. *Journal of Sustainable Tourism*. doi:<https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1758708>
- Grande, I., & Abascal, E. (2005). *Análisis de encuestas*. Madrid, España: ESIC Editorial. Recuperado el 05 de 01 de 2020
- Herrera Romero, A. (2014). *Ecosistemas Estratégicos Análisis crítico del concepto Fundamentos conceptuales para formalizar la aplicación de la noción de*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Hurtado Carmona, D. (2011). *Teoría General de Sistemas, un enfoque hacia la ingeniería de sistemas* (segunda edición ed.). Recuperado el 26 de diciembre de 2020
- IEA. (2020). *Global Energy Review, the impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions*. París, Francia: International Energy Agency. Recuperado el 5 de agosto de 2020, de <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- Kuhn, T. (1971). *La estructura de las revoluciones* (Primera edición en español ed.). (A. Contin, Trad.) México: University of Chicago Press. Recuperado el 17 de diciembre de 2020
- LA FM. (17 de febrero de 2020). *Desierto de la Tatacoa se ha visto afectado por contaminación lumínica*. Obtenido de <https://www.lafm.com.co/colombia/desierto-de-la-tatacoa-se-ha-visto-afectado-por-contaminacion-luminica>
- Liévano Martínez, F., & Londoño, J. (enero-junio de 2012). El pensamiento sistémico como herramienta metodológica para la resolución de problemas. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*(8), 43-65. Recuperado el 25 de diciembre de 2020

- Lozano Chaguay, L., Lozano Chaguay, S., & Robledo Galeas, R. (10 de septiembre de 2020). Desempleo en tiempos de Covid-19: efectos socioeconómicos en el entorno familiar. *Journal of Science and research. Revista de Ciencia e Investigación*, 5(4), 187-197. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.4110532>
- Maass, M. (2003). Principios generales sobre manejo de ecosistemas. En O. Sánchez, E. Vega, E. Peters, O. Monroy-Vilchis, & Ó. Sánchez (Ed.), *Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México* (págs. 117-136). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Mahler, D. G., Lakner, C., Castañeda Aguilar, R. A., & Wu, H. (08 de junio de 2020). *Estimaciones actualizadas del impacto de la COVID-19 (coronavirus) en la pobreza mundial*. Recuperado el 12 de septiembre de 2020, de Banco Mundial Blogs: <https://blogs.worldbank.org/es/datos/estimaciones-actualizadas-del-impacto-del-coronavirus-en-la-pobreza>
- Maldonado, C. (2003). Marco teórico del trabajo de Ciencias de la Complejidad y siete tesis sobre la Complejidad. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 4(9), 139-154. Recuperado el 15 de diciembre de 2020
- Maldonado, C. (2014). ¿Qué es un sistema complejo? *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 14(29), 71-93. Recuperado el 25 de diciembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/414/41438646004.pdf>
- Maldonado, C. (2016). Pensar la complejidad con la ayuda de las lógicas no-clásicas. En L. G. Rodríguez Zoya (Ed.), *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina: desafíos, contribuciones y compromisos para abordar los problemas complejos del siglo XXI* (págs. 83-98). Comunidad Editora Latinoamericana. Recuperado el 23 de diciembre de 2020
- Maldonado, C. (2017). *Pensar: lógicas no clásicas*. Bogotá, Colombia: Universidad El Bosque. Recuperado el 24 de diciembre de 2020

- Maldonado, C., & Gómez Cruz, N. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad del Rosario. Recuperado el 10 de enero de 2020
- Maldonado, C., & Gómez Cruz, N. (2011). *El mundo de las Ciencias de la Complejidad una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*. Bogotá, Colombia: Universidad del Rosario. Recuperado el 14 de diciembre de 2020
- Marca Colombia. (s.f.). *Conoce el impacto ambiental positivo que deja la cuarentena en Colombia*. Recuperado el 02 de octubre de 2020, de <https://www.colombia.co/covid-19/conoce-el-impacto-ambiental-positivo-que-deja-la-cuarentena-en-colombia/>
- Miceli, J. (junio de 2006). La ciencia de las redes. *evista hispana para el análisis de redes sociales*. Recuperado el 15 de 01 de 2021
- Mojica Perilla, M. (2009). Dos versiones de la epidemiología social: Entre el centro y la periferia. *Revista MedUNAB*. Recuperado el 23 de diciembre de 2020
- Molina, J. (2004). La ciencia de las redes. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*(11), 36-42. Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Morillo, Á. (16 de agosto de 2020). Los impactos ambientales, la otra cara de la violencia en Colombia durante la pandemia. *Vida Nueva Digital*. Recuperado el 02 de octubre de 2020, de <https://www.vidanuevadigital.com/2020/08/16/los-impactos-ambientales-la-otra-cara-de-la-violencia-en-colombia-durante-la-pandemia/>
- Morin, E. (1982). *Ciencia con conciencia*. Barcelona, España: Anthropos. Recuperado el 21 de diciembre de 2020
- Morin, E. (1986). *El método I, la naturaleza de la naturaleza* (sexta edición ed.). (A. Sánchez, & D. Sánchez García, Trads.) Madrid, España: Cátedra (Grupo Anaya S.A.).
- Morin, E. (1994). *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, España: Gedisa editorial. Recuperado el 17 de diciembre de 2020

- Morin, E. (1999). *La cabeza bien puesta, repensar la reforma, reformar el pensamiento*. Buenos Aires, República Argentina: Ediciones nueva visión. Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Morin, E. (febrero de 2004). La epistemología de la complejidad. *Gazeta de Antropología*. Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de <http://hdl.handle.net/10481/7253>
- NASA en español. (03 de marzo de 2020). *Satélites Confirman la Disminución del Dióxido de Nitrógeno Sobre China*. Recuperado el 19 de septiembre de 2020, de <https://www.lanasa.net/noticias/nuestro-planeta/satelites-confirman-la-disminucion-del-dioxido-de-nitrogeno-sobre-china>
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Losifidis, C., . . . Agha, R. (17 de April de 2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International Journal of Surgery*, 185-193. doi:10.1016/j.ijssu.2020.04.018
- Noticias caracol. (06 de julio de 2020). *Guías del desierto de la Tatacoa claman por ayuda: llevan más de 100 días sin sustento*. Recuperado el 02 de octubre de 2020, de <https://noticias.caracoltv.com/colombia/guias-del-desierto-de-la-tatacoa-claman-por-ayuda-llevar-mas-100-dias-sin-sustento>
- NU. CEPAL. (2020). *El desafío social en tiempos del COVID-19*. Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. ECLAC. Recuperado el 12 de septiembre de 2020
- Nuño Ballesteros, J. (2004). René Thom: no solo catástrofes. *La gaceta de la RSME*, 7(2), 503-514. Recuperado el 23 de diciembre de 2020
- OIT. (2020a). *El COVID-19 y el mundo del trabajo: repercusiones y respuestas*. Organización Internacional de Trabajo. Recuperado el 12 de septiembre de 2020, de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/briefingnote/wcms_739158.pdf

- OIT. (2020b). *La Covid-19 y el mundo del trabajo. Quinta edición. Estimaciones actualizadas y análisis*. Organización Internacional del Trabajo. Recuperado el 18 de septiembre de 2020
- Olaya Amaya, A., Sánchez Ramírez, M., & Tovar, A. (noviembre de 2000). Directrices para la zonificación, uso y manejo del desierto de La Tatacoa. *Revista Entornos*(12), 27-46. Recuperado el 24 de noviembre de 2020
- Olaya Amaya, A., Sánchez Ramírez, M., & Tovar, A. (2001). Propuesta básica de un área de manejo especial para el Desierto de La Tatacoa. En M. S. Alfredo Olaya Amaya (Ed.), *La Tatacoa: Ecosistema Estratégico de Colombia* (primera edición ed., pág. 158). Universidad Surcolombiana. Recuperado el 24 de noviembre de 2020
- OMS. (2003). *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. Informe de consenso científico, Organización Mundial de la Salud, Bonn, Germany. Recuperado el 19 de septiembre de 2020
- OMS. (7 de marzo de 2020a). *Declaración de la OMS tras superarse los 100000 casos de COVID-19*. Recuperado el 19 de agosto de 2020, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/detail/07-03-2020-who-statement-on-cases-of-covid-19-surpassing-100-000>
- OMS. (29 de junio de 2020b). *Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19*. Recuperado el 18 de agosto de 2020, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/detail/29-06-2020-covidtimeline#>
- OMS. (2020c). *Brote de enfermedad por coronavirus (COVID-19): orientaciones para el público*. Recuperado el 23 de agosto de 2020, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>
- OMT. (29 de julio de 2020). *El impacto de la Covid-19 en el turismo mundial queda patente en los datos de la OMT sobre el coste de la parálisis*. Recuperado el 08 de septiembre de 2020, de Organización Mundial del Turismo: <https://www.unwto.org/es/news/el->

impacto-de-la-covid-19-en-el-turismo-mundial-queda-patente-en-los-datos-de-la-
omt-sobre-el-coste-de-la-paralisis

- ONU. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado el 16 de 01 de 2021, de <https://undocs.org/es/A/42/427>
- Ortiz Palma, N., & Mayor Polanía, R. (2013). Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de la Tatacoa. Periodo: 1075 a 1993. *Revista Ingeniería y Región*(10), 149-158. Recuperado el 24 de noviembre de 2020
- Oyague, E., Yaja, A., & Franco, P. (29 de junio de 2020). Efectos ambientales del confinamiento debido a la pandemia de COVID-19: evaluación conceptual y análisis de datos empíricos en Tacna, marzo-abril 2020. *Ciencia & Desarrollo*, 19(26), 02-19. doi:doi.org/10.33326/26176033.2020.26.901
- Pita Merino, L. (2014). *Implementación de un modelo dinámico simplificado y análisis de la Sostenibilidad sobre el caso del turismo en las Islas Galápagos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76323/Pita%20Merino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Portafolio Verde. (2014). *Ordenamiento ecoturístico, en el cual se incluya determinar la capacidad de carga real, física, de manejo y efectiva del PNR la Tatacoa y su área de influencia*. Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. Recuperado el 9 de enero de 2020
- Puentes Ruíz, J., & Esguerra Cabrera, M. (2018). *Sostenibilidad ambiental del turismo en el Distrito Regional de Manejo Integrado la Tatacoa, municipio de Villavieja, departamento del Huila*. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales. Recuperado el 23 de noviembre de 2020
- RAE. (2014). *Diccionario de la lengua española* (23° ed.). Real Academia Española. Recuperado el 14 de diciembre de 2020

Ramis Anadalia, R., & Sotolongo Codina, P. (octubre-diciembre de 2009). Aportes del pensamiento y las ciencias de la complejidad al estudio de los determinantes de la salud. *Revista Cubana Salud Pública*, 35(4), 65-77. Recuperado el 23 de diciembre de 2020

Revista Dinero. (31 de julio de 2020). *Pobreza en Colombia aumentará al 38% de la población en 2020*. Recuperado el 02 de octubre de 2020, de <https://www.dinero.com/economia/articulo/impacto-del-coronavirus-en-la-pobreza-de-colombia/294221>

Revista Semana. (30 de junio de 2020a). En mayo, el desempleo en Colombia llegó a 21,4 por ciento. Recuperado el 01 de octubre de 2020, de <https://www.semana.com/nacion/articulo/coronavirus-cifra-de-desempleo-de-colombia-en-mayo-de-2020--noticias-hoy/682892/>

Revista Semana. (13 de octubre de 2020b). Hogares en Colombia superan la pobreza extrema con \$549.400 al mes. Obtenido de [https://www.semana.com/economia/articulo/cuanto-dinero-debe-ingresar-a-un-hogar-para-dejar-de-ser-pobre-en-colombia/303268/#:~:text=Hogares%20en%20Colombia%20superan%20la%20pobreza%20extrema%20con%20\\$549.400%20al%20mes,-Seg%C3%BAAn%20el%20m%C3%A1s&text=P](https://www.semana.com/economia/articulo/cuanto-dinero-debe-ingresar-a-un-hogar-para-dejar-de-ser-pobre-en-colombia/303268/#:~:text=Hogares%20en%20Colombia%20superan%20la%20pobreza%20extrema%20con%20$549.400%20al%20mes,-Seg%C3%BAAn%20el%20m%C3%A1s&text=P)

Rincón, M. (2017). El origen del concepto ecosistema. *Revista Bio-grafía. Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 342-350. Recuperado el 25 de diciembre de 2020

Rojas Marín, C., Pérez Gómez, U., & Fernández Méndez, F. (enero - junio de 2019). Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de la Tatacoa, Colombia. *Cuadernos de geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 134-151. doi:10.15446/rcdg.v28n1.63130

Romanelli, L. (noviembre-diciembre de 2006). Teoría del caos en los sistemas biológicos. *Revista Argentina de Cardiología*, 74(6), 478-482. Recuperado el 10 de diciembre de 2020

- RTVE. (06 de septiembre de 2020). *El mapa mundial del coronavirus: más de 26,9 millones de casos y más de 880.000 muertos en todo el mundo*. Recuperado el 07 de septiembre de 2020, de Radiotelevisión Española: <https://www.rtve.es/noticias/20200906/mapa-mundial-del-coronavirus/1998143.shtml>
- Sánchez Villena, A., & De La Fuente Figuerola, V. (julio de 2020). COVID-19: cuarentena, aislamiento, distanciamiento social y confinamiento, ¿son lo mismo? *Anales de Pediatría*, 93(1), 73-74. doi:10.1016/j.anpedi.2020.05.001
- Sastre, M. (s.f.). *Un paso por la geometría. Geometría Fractal*. (U. P. Madrid, Ed.) Recuperado el 23 de diciembre de 2020, de <https://underpost.net/ir/pdf/artificial/Geometria%20Fractal.pdf>
- Tansley, A. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 284-307. Recuperado el 25 de diciembre de 2020
- Tarride, M. (marzo-junio de 1995). Complejidad y Sistemas Complejos. *Manguinhos*, II(1), 46-66. Recuperado el 15 de diciembre de 2020
- Thieriot, H. (2020). *Weather-correction of air pollution – Application to COVID-19*. Centre for Research on Energy and Clean Air, Wuhan, China. Recuperado el 12 de septiembre de 2020, de Centre for Research on Energy and Clean Air: <https://energyandcleanair.org/weather-correction-of-air-pollution-application-to-covid-19/>
- Valdez Cepeda, R., & Olivares Sáenz, E. (julio-septiembre de 1998). Geometría fractal en la ciencia del suelo. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 277-288. Recuperado el 15 de DICIEMBRE de 2020
- Villamil Mendoza, L. (2008). La noción de obstáculo epistemológico en Gastón Bachelard. *Revista de estudios literarios*. Recuperado el 17 de diciembre de 2020, de <http://www.ucm.es/info/especulo/numero38/obstepis.html>

Villegas González, P., Triviño León, N., Escobar Vargas, J., Obregón Neira, N., González Méndez, M., González Salazar, R., & Flórez Flórez, M. (15 de mayo de 2016). Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana. *Revista Ingeniería*, 21(3), 391-410. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.3.a09>

Viniegra Velázquez, L. (2014). El reduccionismo científico y el control de las conciencias. Parte I. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 71(4), 252-257. Recuperado el 25 de diciembre de 2020

WHO. (2020). *Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*. World Health Organization, Republic of China. Recuperado el 18 de agosto de 2020

Anexos

Anexo A: matriz del problema

Causas	Síntomas	Consecuencias	Pronóstico	Pregunta problema
Pandemia Covid-19 SARS-CoV-2 (Síndrome Respiratorio Agudo Severo Coronavirus 2,	Medidas de restricción del contacto físico y de higiene, para contener el virus,	Impactos sociales, económicos y ambientales a nivel mundial, nacional y local,	Pérdidas sociales y económicas , ganancias ambientales ,	¿Qué efectos ha tenido el aislamiento, el confinamiento y el distanciamiento social, decretados a raíz de la pandemia Covid-19, sobre el ecosistema Desierto de La Tatacoa a nivel social, económico y ambiental?
Interacción entre múltiples variables,	Información incompleta o desconocida,	Complejidad del problema,	Dificultad para comprender el ecosistema, Se requiere un análisis sistémico,	¿Qué información aporta un modelo del ecosistema a esta investigación?, ¿cuáles principios de la complejidad y los sistemas se manifiestan en el ecosistema objeto de estudio y de qué manera?
Desconocimiento local de la evolución de las medidas de contención y sus impactos a futuro,	Incertidumbre sobre el futuro del ecosistema,	Afecta la toma de decisiones y la planeación frente a las actividades turísticas,	Turismo desmedido en el futuro,	¿Qué ocurrirá con el ecosistema cuando se levante la medida de aislamiento humano? y ¿qué ocurriría con el ecosistema si no se volvieran a practicar allí actividades turísticas de ningún tipo?
Contraposición desconocida en la relación hombre – naturaleza,	Aprovechamiento desmedido de los recursos naturales,	Desequilibrio en el ecosistema,	Pérdida de recursos naturales,	¿Es posible que un evento negativo para la sociedad sea positivo para el ambiente? y ¿viceversa?

Anexo B: cronograma de actividades

Año	2020																												2021							
Mes	Junio				Julio					Agosto				Septiembre				Octubre					Noviembre				Diciembre					Enero				
Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	
Actividad																																				
Planteamiento del problema de investigación																																				
Revisión bibliográfica de antecedentes																																				
Justificación																																				
Revisión bibliográfica: fundamentos Teóricos																																				
Planteamiento de los objetivos de la investigación																																				
Planteamiento de hipótesis																																				
Descripción de la metodología																																				

Vigilada Mineducación



Año	2020																									2021									
	Mes	Junio				Julio					Agosto				Septiembre				Octubre					Noviembre				Diciembre					Enero		
Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4
Actividad																																			
Trabajo de campo																																			
Análisis y discusión de resultados																																			
Conclusiones																																			
Introducción																																			
Resumen																																			
Revisión final																																			
Sustentación																																			

Vigilada Mineducación

Anexo C: encuesta

**Encuesta sobre el impacto socio-económico de la Covid-19 en el ecosistema
Desierto de La Tatacoa**

Estimado Villaviejo(a), el presente cuestionario tiene como finalidad recolectar datos importantes sobre los impactos socio-económicos, causados por las medidas de contención de la pandemia Covid-19 a la población del municipio de Villavieja que depende directa e indirectamente del turismo en este ecosistema Desierto de La Tatacoa; como parte del trabajo de campo de la tesis “Modelo del ecosistema Desierto de La Tatacoa bajo los impactos de la pandemia Covid-19” de la Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la complejidad de la Universidad Surcolombiana, La información suministrada tiene fines netamente académicos,

Género:	Femenino	Masculino	Indeterminado	Otro, ¿cuál?
Edad:				
Nivel educativo alcanzado:				

En los ítems 1 al 10, marque con una “X” la respuesta que más se ajuste a su realidad,

- ¿Cuál era su situación laboral antes de la pandemia Covid-19?
 - Estudiante ____
 - Trabajador independiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Trabajador dependiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Desempleado
 - Otro ____ ¿Cuál? _____
- ¿Cuál fue su situación laboral durante el tiempo de aislamiento?
 - Estudiante ____
 - Trabajador independiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Trabajador dependiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Desempleado
 - Otro ____ ¿Cuál? _____
- ¿Cuál es su situación laboral actual?
 - Estudiante ____
 - Trabajador independiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Trabajador dependiente ____ ¿Cuál ocupación? _____
 - Desempleado
 - Otro ____ ¿Cuál? _____
- En una escala de 1 a 10, ¿qué tanto afectaron, su vida, las medidas de contención del coronavirus? 1=nada 10=extremadamente,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

5. Desde el coronavirus, ¿la calidad de los siguientes aspectos de su vida ha experimentado más o menos dificultades?

Aspecto	Peor antes	que	Igual antes	que	Mejor antes	que	No aplica
Situación de vivienda							
Acceso al trabajo							
Alimentación							
Vestimenta							
Ingresos económicos							
Apoyo del gobierno							
Situación de salud							
Relación con su pareja							
Relación con sus hijos							

6. En una escala de 1 a 10, ¿Cómo calificaría su calidad de vida antes de la pandemia? 1=terrible 10=excelente,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

7. En una escala de 1 a 10, ¿Cómo calificaría su calidad durante las medidas de contención del virus? 1=terrible 10=excelente,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

8. En una escala de 1 a 10, ¿Cómo calificaría su calidad actualmente? 1=terrible 10=excelente,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

9. ¿Cuál es el principal sentimiento que le genera la pandemia?

- Incertidumbre _____
- Miedo _____
- Actitud positiva _____
- Necesidad de solidaridad _____
- Estrés _____
- Desánimo-Depresión _____
- Impotencia _____
- Tristeza _____
- Otro _____ ¿Cuál? _____

10. ¿Cuál es su principal temor en relación de la pandemia?

- Contagiarse y contagiar a otros _____
- Fallecimiento de parientes o amigos _____

- Pérdidas económicas _____
- Otro _____ ¿Cuál? _____

En los ítems 11 a la 14, por favor, responda,

11. ¿Cuántas personas conforman su familia? _____

12. ¿Cuánto era el ingreso económico mensual de su familia antes de la pandemia Covid-19?

13. ¿Cuánto era el ingreso económico mensual de su familia durante el tiempo de aislamiento? _____

14. ¿Cuánto es el ingreso económico mensual de su familia actualmente?

¡Muchas gracias por su colaboración!

Anexo D: datos agrupados empleados en la propuesta del modelo del sistema complejo.

Datos mensuales

Mes	Turistas		Vehículos		Ingresos económicos municipales (\$)		Generación de residuos sólidos (Kg)		Emisiones de Dióxido de Carbono	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Enero	54800	24800	13700	6200	7805000	35873500	69048	31248	24909	11273
Febrero	13888	13888	3472	3472	3692000	11227500	17499	17499	6313	6313
Marzo	25248	5248	6312	1312	12605500	3033600	31812	6612	11476	2385
Abril	34968	0	8742	0	20799500	0	44060	0	15895	0
Mayo	19840	0	4960	0	6024000	0	24998	0	9018	0
Junio	33480	0	8370	0	14459500	0	42185	0	15218	0
Julio	42904	0	10726	0	11121000	0	54059	0	19502	0
Agosto	35712	0	8928	0	18936500	0	44997	0	16233	0
Septiembre	14880	0	3720	0	6890000	0	18749	0	6764	0
Octubre	41200	830	10300	208	13871500	230000	51912	1046	18727	378
Noviembre	47728	954	11932	239	11719500	580000	60137	1202	21695	435
Diciembre	39928	3250	9982	813	16196000	1020000	50309	4095	18149	1478

Vigilada Mineducación

Datos según la época: antes de la pandemia, durante las medidas de contención del virus, tiempo de reactivación del turismo.

Época	Turistas (promedio mensual)	Ingresos económicos promedio mensual municipales (\$)			Ingresos económicos promedio mensual por familia (\$)			Ingresos económicos promedio mensual por individuo (\$)			Empleo (%)	Desempleo (%)	Pobreza (%)	Pobreza extrema (%)	Calidad de vida					Cobertura Vegetal (ha)	Suelo descubierto (ha)
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio					Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		
Antes de la pandemia	31662	3692000	35873500	12950306	350000	3000000	1209762	112500	1000000	441746	90,5	9,5	23,8	4,8	23,8	47,6	28,6	0	0	45378	8463
Durante las medidas de contención	0	0	0	0	0	1200000	502857	0	1200000	208028	45	55	47,6	35,7	0	4,8	23,8	38,1	33,3	46224	7936
Reactivación del turismo	1678	230000	1200000	610000	170000	1800000	715238	60000	1200000	261170	71	29	40,5	16,7	4,8	23,8	26,2	38,1	7,1	Sin dato	Sin dato

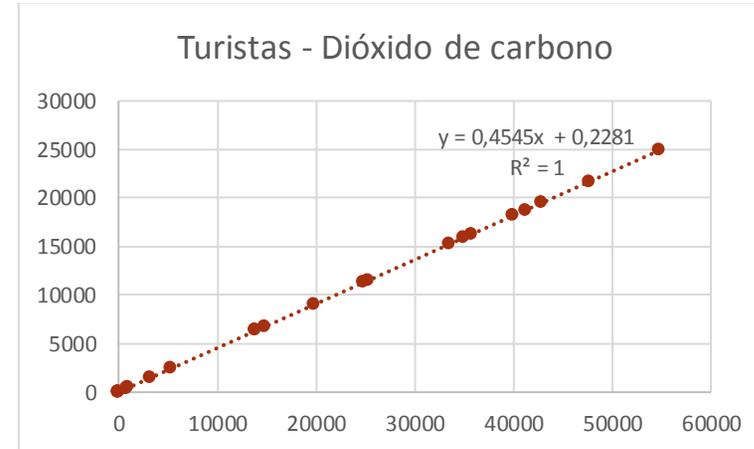
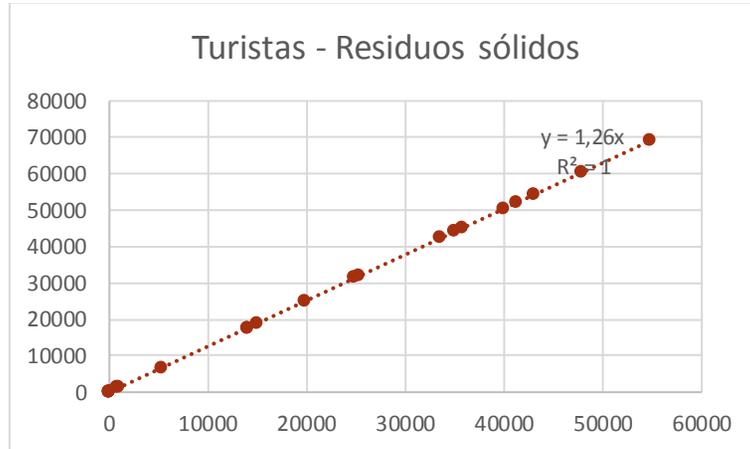
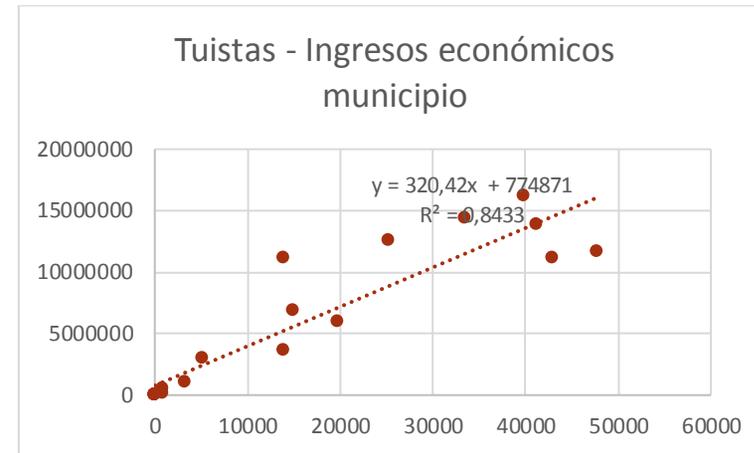
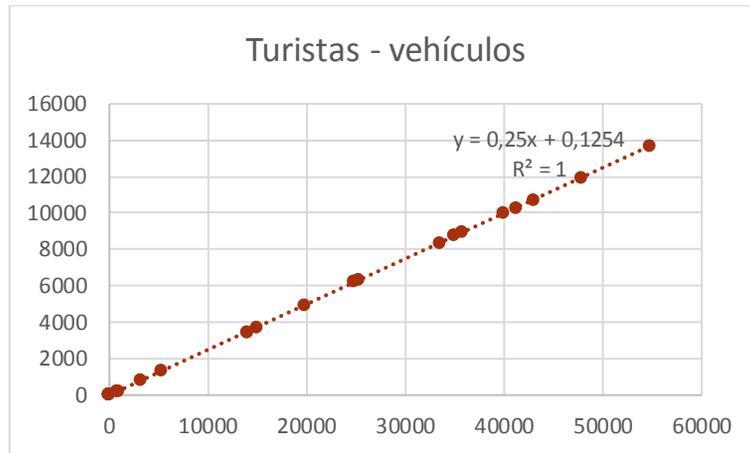
Datos de los impactos sobre las emociones y algunos aspectos de la vida social ocasionados por la Civid-19.

Sentimientos que despierta la pandemia en la sociedad (%)		Temor frente a la pandemia (%)	
Incertidumbre	33,3	Pérdidas económicas	38,1
Miedo	21,4	Fallecimiento de parientes o amigos	35,7
Actitud positiva	14,3	Contagiarse y contagiar a otros	26,2
Estrés	14,3		
Desánimo - depresión	7,1		
Tristeza	7,1		
Impotencia	2,4		

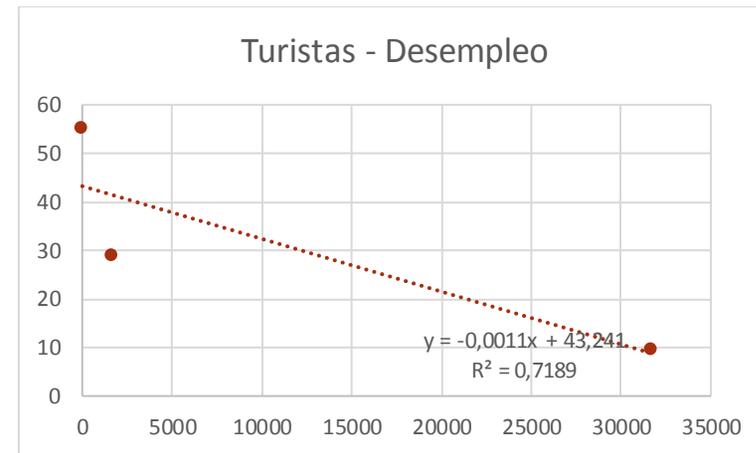
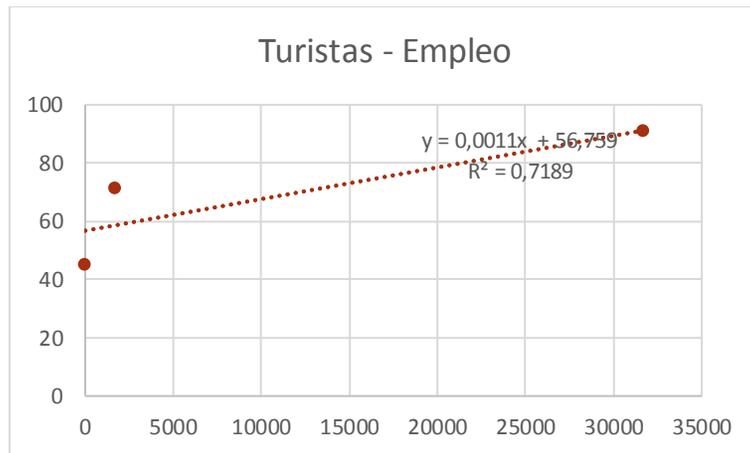
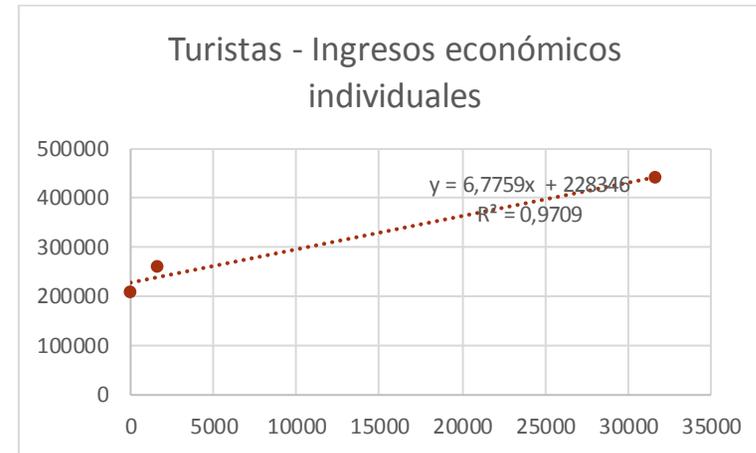
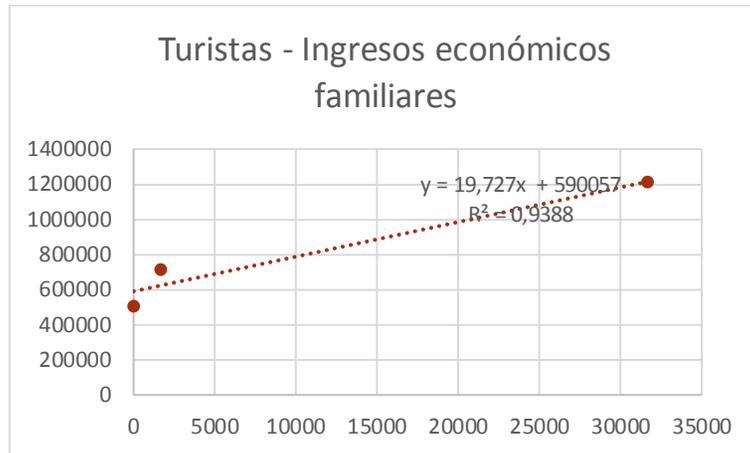
Aspecto de la vida	Peor que antes (%)	Mejor que antes (%)	Igual que antes (%)	No aplica (%)
Situación de vivienda	26,2	0	69	4,8
Acceso al trabajo	69	0	31	0
Alimentación	61,9	2,4	35,7	0
Vestimenta	31	0	69,9	0
Ingresos económicos	85,7	0	14,3	0
Apoyo del gobierno	31	42,9	26,2	0
Situación de salud	14,3	0	85,7	0
Relación con su pareja	45,2	0	40,5	14,3
Relación con sus hijos	33,3	0	45,2	21,4

Vigilada Mineducación

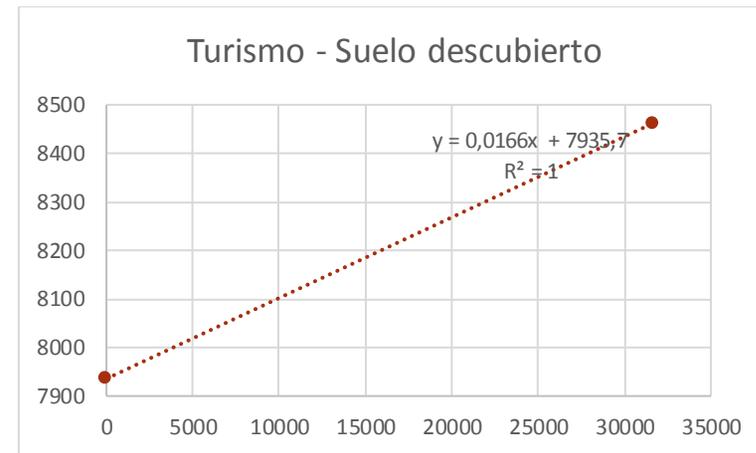
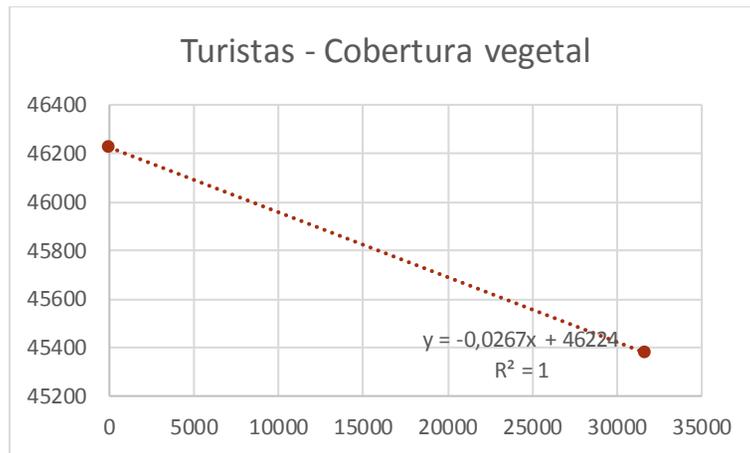
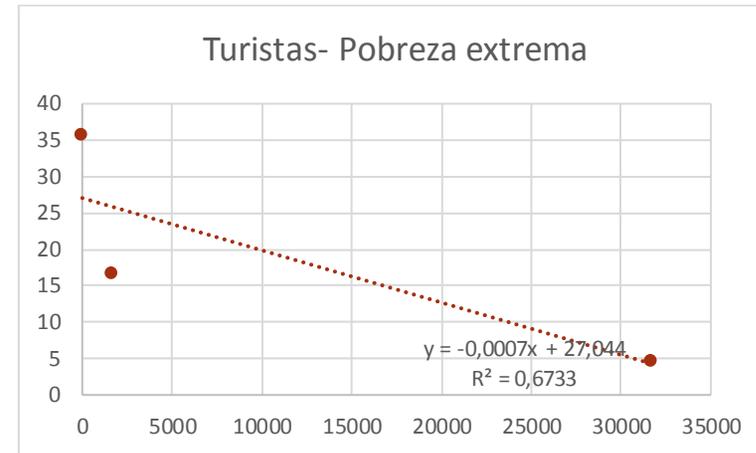
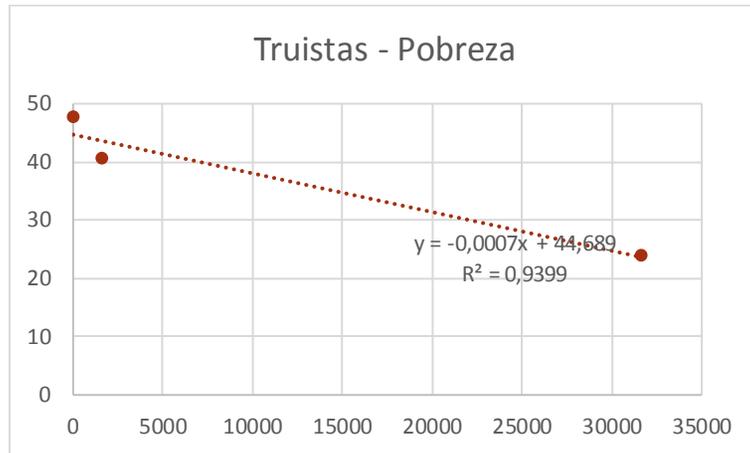
Anexo E: Gráficas de correlación de los agentes sociales, económicos y ambientales, respecto al parámetro de turistas.



Vigilada Mineduc



Vigilada Mineducación



Vigilada Mineducación



Anexo F: código del modelo basado en agentes propuesto para el ecosistema Desierto de la Tatacoa en el software NetLogo.

Código del modelador de sistemas dinámicos

```

;; System dynamics model globals
globals [
  ;; stock values
  ambiente
  economía
  sociedad
  turistas
  entorno
  ;; size of each step, see SYSTEM-DYNAMICS-GO
  dt
]

;; Initializes the system dynamics model.
;; Call this in your model's SETUP procedure.
to system-dynamics-setup
  reset-ticks
  set dt 1.0
  ;; initialize stock values
  set ambiente 0
  set economía 0
  set sociedad 0
  set turistas 6000
  set entorno residuos_sólidos * 0.9
end

;; Step through the system dynamics model by performing next iteration of Euler's method.
;; Call this in your model's GO procedure.
to system-dynamics-go

  ;; compute variable and flow values once per step
  let local-vehículos vehículos
  let local-CO2 CO2
  let local-residuos_sólidos residuos_sólidos
  let local-ingresos_municipio ingresos_municipio
  let local-ingresos_persona ingresos_persona
  let local-pobreza pobreza
  let local-pobreza_extrema pobreza_extrema
  let local-suelo_descubierto suelo_descubierto
  let local-empleo empleo
  let local-ingresos_familia ingresos_familia
  let local-ingreso_turistas ingreso_turistas
  let local-Económico Económico
  let local-salida_turistas salida_turistas
  let local-Ambiental Ambiental
  let local-Social Social

  ;; update stock values
  ;; use temporary variables so order of computation doesn't affect result.
  let new-ambiente ( ambiente + local-Ambiental )
  let new-economía ( economía + local-Económico )
  let new-sociedad ( sociedad + local-Social )
  let new-turistas max( list 0 ( turistas + local-ingreso_turistas - local-salida_turistas ) )
  let new-entorno ( entorno )
  set ambiente new-ambiente
  set economía new-economía
  set sociedad new-sociedad
  set turistas new-turistas
  set entorno new-entorno

```



```

    tick-advance dt
end

;; Report value of flow
to-report ingreso_turistas
  report ( t
    ) * dt
end

;; Report value of flow
to-report Económico
  report ( ( ( ( t * ( ingresos_municipio + ingresos_persona ) ) - 15000 ) / 100000000 ) ) - 500 * ticks
    ) * dt
end

;; Report value of flow
to-report salida_turistas
  report ( a - 0.8 * t
    ) * dt
end

;; Report value of flow
to-report Ambiental
  report ( ( ( -1 * t * abs ( residuos_sólidos + CO2 + suelo_descubierto ) ) / 1000000 ) + 1000 * ticks
    ) * dt
end

;; Report value of flow
to-report Social
  report ( ( t * ( ingresos_persona ) / 1000000 ) - 100 * ticks
    ) * dt
end

;; Report value of variable
to-report vehículos
  report 0.25 * t + 0.1254
end

;; Report value of variable
to-report CO2
  report 0.4545 * t + 0.2281
end

;; Report value of variable
to-report residuos_sólidos
  report 1.26 * t
end

;; Report value of variable
to-report ingresos_municipio
  report 320.42 * t + 774871
end

```



```

;; Report value of variable
to-report ingresos_persona
  report 6.7759 * t + 228346
end

;; Report value of variable
to-report pobreza
  report -1 * 0.0007 * t + 44.689
end

;; Report value of variable
to-report pobreza_extrema
  report -1 * 0.0007 * t + 27.044
end

;; Report value of variable
to-report suelo_descubierto
  report 0.0166 * t + 7935.7
end

;; Report value of variable
to-report empleo
  report 0.0011 * t + 56.759
end

;; Report value of variable
to-report ingresos_familia
  report 19.727 * t + 590057
end

;; Plot the current state of the system dynamics model's stocks
;; Call this procedure in your plot's update commands.
to system-dynamics-do-plot
  if plot-pen-exists? "ambiente" [
    set-current-plot-pen "ambiente"
    plotxy ticks ambiente
  ]
  if plot-pen-exists? "economía" [
    set-current-plot-pen "economía"
    plotxy ticks economía
  ]
  if plot-pen-exists? "sociedad" [
    set-current-plot-pen "sociedad"
    plotxy ticks sociedad
  ]
  if plot-pen-exists? "turistas" [
    set-current-plot-pen "turistas"
    plotxy ticks turistas
  ]
  if plot-pen-exists? "entorno" [
    set-current-plot-pen "entorno"
    plotxy ticks entorno
  ]
end

```

Código en pantalla principal de NetLogo

```
globals[a]
to setup
  ca
  system-dynamics-setup
end
to go
  set a random turistas / 2
  system-dynamics-go
  system-dynamics-dododo-plot
end
to system-dynamics-dododo-plot
  if plot-pen-exists? "ingreso_turistas" [
    set-current-plot-pen "ingreso_turistas"
    plotxy ticks ingreso_turistas
  ]
  if plot-pen-exists? "ambiental" [
    set-current-plot-pen "ambiental"
    plotxy ticks ambiental
  ]
  if plot-pen-exists? "social" [
    set-current-plot-pen "social"
    plotxy ticks sociedad
  ]
  if plot-pen-exists? "económico" [
    set-current-plot-pen "económico"
    plotxy ticks económico
  ]
end
```