

ALCANCE DE LA DEFINICIÓN DE LA COMPLEJIDAD ENFOCADA HACIA EL
ESTUDIO DE LO AMBIENTAL



PRESENTADO POR:
DIEGO FERNANDO CASAS PÉREZ
JESSICA ALEJANDRA ROMERO FAJARDO

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

DIRIGIDO POR:
WILMAR DARÍO FERNANDEZ GÓMEZ
INGENIERO CIVIL
DOCTOR EN INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2016

RESUMEN

La teoría de la complejidad se presenta como una forma diferente de entender los sistemas haciéndolos irreductibles, en donde las observaciones simplistas son dejadas a un lado para dar lugar a una visión del individuo como un subsistema y a su vez como sistema, desde la multiplicidad de componentes, la complejidad de un sistema no es dependiente de la cantidad de componentes que posea. El objetivo de este estudio consiste en realizar una investigación documental orientada hacia los estudios de lo ambiental desde la complejidad. Para este análisis, se partió de la definición e interacción entre variados conceptos de linealidad y no linealidad, predecible e impredecible, orden y desorden, reversibilidad e irreversibilidad, que suponen fluctuaciones, bifurcaciones, autoorganización a través de la temporalidad, mediante la revisión de fuentes bibliográficas y la construcción de fichas. Con la presente monografía se muestra como es abordado lo ambiental desde lo complejo desde la década de los 90's, como resultado se obtuvo un marco de referencia para visualizar los sistemas ambientales desde lo complejo. La importancia de este trabajo radica en el aporte que se puede hacer a la ciencia mediante la síntesis de información, generada por varios autores de distintas corrientes.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
2.	Marco Teórico.....	2
2.1	Sistema	2
2.1.1	Definición de sistema	2
2.2	Tipos de sistema	3
2.2.1	Sistemas abiertos	3
2.2.2	Sistemas dinámicos	3
2.2.3	Sistemas no lineales.....	4
2.2.4	Sistemas Autoorganizados	5
2.2.5	Sistemas Complejos	6
2.2.6	Sistemas Cibernéticos.....	7
2.3	Modelación de los sistemas.....	8
2.3.1	Modelo determinístico.....	10
2.3.2	Modelo probabilístico.....	10
2.3.3	Modelo de caja negra	11
2.3.4	Modelo depredador presa	12
2.3.5	Redes Neuronales	13
2.3.6	Modelación de sistemas complejos	14

2.4	Teorías Propuestas para explicar la complejidad	14
2.4.1	Teoría general de sistemas.....	14
2.4.2	Retroalimentación.	15
2.4.3	Teoría del caos.....	16
2.4.4	Estructuras Disipativas	17
2.4.5	Atractor Extraño	17
2.4.6	Emergencia	19
2.4.7	Geometría Fractal	20
2.4.8	Teoría de la catástrofe	20
2.4.9	Teoría GAIA.....	21
3.	Metodología	23
4.	Complejidad Ambiental	25
4.1	Complejidad	25
4.1.1	Complejidad ambiental.....	27
4.1.2	Stressors.....	29
5.	Aplicación de la complejidad al estudio de lo ambiental (Estudios de Caso)	30
6.	Discusión.....	38
7.	Conclusión y Recomendación.....	42
8.	Bibliografía	43

1. Introducción

El trabajo realizado se refiere a una investigación documental orientada hacia los estudios de lo ambiental desde la complejidad, este enfoque se da debido a que los sistemas biológicos son estudiados desde la física y la química como sistemas lineales, donde se omiten las complejas relaciones que se presentan los sistemas, pero posterior a un conjunto de investigaciones se ha determinado que el estudio del ambiente debe realizarse de una manera distinta. Según algunos teóricos el estudio de los sistemas, debe darse desde lo complejo, puesto que permite, realizar procesos de modelado y determinar, como pequeños cambios en un determinado factor puede llegar a representar alteraciones de una importancia considerable.

Lo anterior generó la pregunta de investigación ¿Cuál es la definición de la complejidad de lo ambiental que puede ser aplicada al estudio de casos en ecosistemas? Y de ahí, el para qué, de esta investigación, ¿cómo se puede aplicar la complejidad al estudio de lo ambiental? Dónde se busca dar una perspectiva más detallada en el análisis de relaciones en sistemas biológicos.

El objetivo general del presente documento es realizar una investigación documental orientada hacia los estudios de lo ambiental desde la complejidad. De manera específica agrupar conceptos enfocados hacia el estudio de los ecosistemas y en general del ambiente desde la complejidad, que se han propuesto desde la década de los 90's, debido a que no se presenta un concepto unificado. En segundo lugar, dar un marco de referencia para futuras investigaciones enfocadas en el estudio de los sistemas ambientales desde dicho paradigma, por último, mostrar como la complejidad se ha aplicado en algunos casos de estudio a lo ambiental.

2. Marco Teórico

2.1 Sistema

2.1.1 Definición de sistema

Uno de los conceptos principales en el estudio de la complejidad corresponde al sistema. Este puede definirse como el conjunto complejo de elementos relacionados entre sí, y a través de sus atributos (Aracil & Gordillo, 1997; Ludwig Von Bertalanffy, 1976; Bossel, 2007; Gay & Ferreras, 1999; Hall & Fagen, 1956). El elemento se entiende como el componente básico de un sistema, pueden ser objetos o procesos, físicos o abstractos y a su vez pueden ser sistemas dentro de otros o subsistemas (M. Arnold & Osorio, 1998; Gay & Ferreras, 1999; Hall & Fagen, 1956). Atributo como las propiedades o características de un elemento (M. Arnold & Osorio, 1998; Hall & Fagen, 1956). Las relaciones se definen como las conexiones entre los elementos de un sistema, que pueden ser unidireccionales o recíprocas.

2.2 Tipos de sistema

2.2.1 Sistemas abiertos

Son aquellos que presentan constatare intercambio de materia, energía e información con su ambiente, su funcionamiento y estabilidad, dependen del entorno en el que se encuentran, Prigogine (1997) planteó que en el universo solo existen sistemas abiertos (Colina, 1984; Florez Valdivia, 2015; Garcia Velarde & Fairen Le Lay, 1980; Gay & Ferreras, 1999). Cabe anotar que en ninguno de los sistemas naturales, entendidos como sistemas abiertos se presentan interacciones aisladas entre dos elementos (Galelea, 2007).

2.2.2 Sistemas dinámicos

Son sistemas cuyas dinámicas se dan por la variable tiempo, sus condiciones actuales se dan por las condiciones predecesoras, para el estudio de estos se debe determinar las condiciones para el instante de tiempo $t=0$, otra característica de estos sistemas es que cuentan con múltiples entradas y salidas. Además de almacenar energía en su estructura mediante diversos elementos que varían de sistema a sistema (Duarte, 2006; Loaiza Ramírez, 2006; Mendoza Reyes, 1998).

Ejemplo en un sistema ecológico se quiere predecir la permanencia de una población generación tras generación. Aquí la población tiene una probabilidad de existencia que se expresa

como cero cuando la población se extingue y un valor de uno cuando se tenga la población de equilibrio (si el valor es mayor a uno significa que existe sobrepoblación). Entonces el sistema presenta una alteración en su balance de materia (Devaney, 1992; Mendoza Reyes, 1998).

2.2.3 Sistemas no lineales

Son sistemas que, al ser expresados mediante ecuaciones, se evidencia como una variable afecta a otras y a sí misma, que se define como retroalimentación, el análisis de este sistema se debe dar en conjunto (Chaparro Guevara, 2006; Keesling, 1988; Mackay, 2008). Ya que estos suelen ser toda una red enmarañada de relaciones o desde el punto de vista en el que el principio de superposición no se puede aplicar al sistema (Mackay, 2008).

A continuación, se muestra una función de carácter no lineal:

$$x = f(x, u, \mu) \quad \text{Ec. 1}$$

$$y = g(x) \quad \text{Ec.2}$$

Donde x y f son vectores, μ es la variable de control, y es el resultado, y u son las entradas de control del sistema mediante retroalimentación, las soluciones de equilibrio del sistema se dan cuando este es igual a cero (Alomari & Rodanski, 2011).

Un ejemplo es lo que sucedió al meteorólogo Edward Lorenz quien al realizar pequeñas modificaciones en datos de referencia para un pronóstico meteorológico (redujo el número de decimales de las variables que tenía contempladas), su pronóstico paso de un día lluvioso a uno soleado. Según Lorenz este comportamiento se da por la no linealidad donde pequeñas modificaciones en las condiciones de partida de un modelo generan cambios considerables en los resultados finales (Galelea, 2007; Palacio Gómez & Ochoa Jaramillo, 2009; Romero, Castro, & Arias Velandia, 2009).

2.2.4 Sistemas Autoorganizados

Son sistemas en los que se evidencia autoorganización, es decir logran un autocontrol en su forma de organización, dado por los procesos de retroalimentación bien sean positivos o negativos, se caracterizan por evolucionar hacia la máxima entropía. La máxima entropía se refiere al terminación de un sistema en particular dado por el desorden molecular; es decir, la descomposición de la estructura del sistema, hasta el punto en que no se diferencia un elemento del otro (Dincer & Cengel, 2001; Fajardo Ortiz, Fernández), reorganizan su estructura y de ahí pasan al equilibrio termodinámico que se entiende como el mínimo estado de entropía o neguentropía entendida como la generación de orden de manera constante, donde el sistema automáticamente se encuentra en equilibrio (Fajardo Ortiz et al., 2015; Garcia Velarde & Fairen Le Lay, 1980; Tarride, 1995).

Los ecosistemas son un claro ejemplo de sistemas Autoorganizados, dado que estos presentan una organización jerarquizada, por la cadena trófica, en donde cada nivel desde la célula hasta comunidad se comporta como un sistema abierto y presenta interacciones entre individuos y comunidades, caracterizadas por ser no lineales (Álvarez - Buylla, Mendoza, & Vergara, 1996; Antequera Baiget, 2004; Bohórquez Arévalo, Espinosa, & Bohórquez Arévalo, 2015; Odum, 1969).

2.2.5 Sistemas Complejos

Son sistemas formados por un conjunto de elementos simples relacionados entre sí y con el entorno que muestran comportamientos dinámicos, no lineales y de autoorganización, donde las interacciones muestran propiedades con las que no cuenta el individuo por sí solo (Bar-Yam, 1997; Moriello, 2003; Ramírez, 1999).

Para el estudio de los sistemas complejos se debe definir un límite, es difícil ya que sus relaciones tienden al infinito, de modo que se deben evidenciar las propiedades de los elementos como individuo y como un todo, así determinar la estructura del sistema y enmarcar sus límites. Esto no quiere decir que los sistemas complejos se encuentren en desorden, se puede interpretar como la carencia de herramientas para su análisis, aunque con modelos computacionales se ha logrado tener aproximaciones que permiten predecir su comportamiento (Caballero, 2008; R. García, 2006).

Por ejemplo, un conjunto de hormigas que conforma un hormiguero, puede realizar actividades que la hormiga como individuo no, lo que se da por las interacciones que se presentan entre ellas (Miramontes & Federal, 2000; Solaz portolés, 2011).

Como segundo ejemplo: la determinación de hábitats de especial importancia ecosistémica de tiburones donde, se deben tener en cuenta una gamma de variables como la temperatura del agua, la salinidad, la turbiedad y distancia de los manglares de los puntos de estudio ya que estos representan un sitio de alimentación para esta especie. La revisión de estas variables permite predecir comportamientos bajo unas condiciones específicas (Yates, Heupel, Tobin, & Simpfendorfer, 2015).

2.2.6 Sistemas Cibernéticos

Son sistemas complejos, que modifican las condiciones de sus elementos, acorde a información de su entorno para mantenerse en un estado cercano al equilibrio, a lo que se le conoce como homeostasis. La capacidad de comunicación del sistema con el ambiente es primordial, ya que este indica los parámetros sobre los que el sistema se regula (Alarcón Ávila et al., 2005; Fry, 2002; Oros Méndez, 2011).

El estudio de los sistemas desde la cibernética se encarga de analizar la relación entre la máquina y el sistema natural, donde los elementos no presentan un comportamiento ideal (Abraham, 2011; Ross Ashby, 1957).

Un ejemplo de un sistema cibernético es la regulación de la temperatura en una especie que sin importar las condiciones del entorno en el que se encuentre se adapta para mantener la propia dentro de los parámetros óptimos para su sistema (Grifeu, 2014).

2.3 Modelación de los sistemas

Un modelo es una representación matemática de un sistema creado para determinar su comportamiento y observar sus dinámicas bajo unas condiciones específicas de entorno. Generalmente un sistema contiene tres componentes para su conocimiento, las entradas, el proceso y las salidas en un entorno definido. La construcción del modelo intenta encontrar las salidas del sistema a partir de formular ecuaciones y algoritmos que representen las entradas, el proceso y las salidas, depende de la información disponible será posible encontrar las salidas a través de modelos basados en datos o en la física. El modelo se construye con la formulación de un algoritmo matemático soportado en una cantidad finita de ecuaciones, por lo que es necesario conocer las relaciones que se presentan en el sistema. Así las cosas, en los modelos basados en datos se tienen tanto las entradas como las salidas y se pregunta por los procesos (relaciones) para simular salidas con otras condiciones de entrada (caja negra), por otra parte, en otra oportunidad se conocen las entradas y el proceso para encontrar las salidas (caja blanca), por último, los modelos en los cuales

se suele tener noción de las leyes físicas por la que se orienta el proceso y a su vez se puede definir algunos parámetros mediante observación, en otras palabras pueden presentar una perspectiva de caja blanca y una de caja negra simultáneamente (caja gris) (Moreno Quintana & Acuña Leiva, 2007; Naranjo, Leiva, & Cubillos, 2010). La función de un modelo es ayudar en la toma de decisiones, lo que se conoce como su función objetivo (Boccaro, 2010; Ford, 1999; Harré, Bossomaier, Gillett, & Snyder, 2011; Hema, 1994; Maldonado & Gómez Cruz, 2010). Un modelo se considera aceptable cuando las diferencias entre sus salidas y las del sistema real no son aparentes cuando se incluye el error experimental (Moncho, 2008).

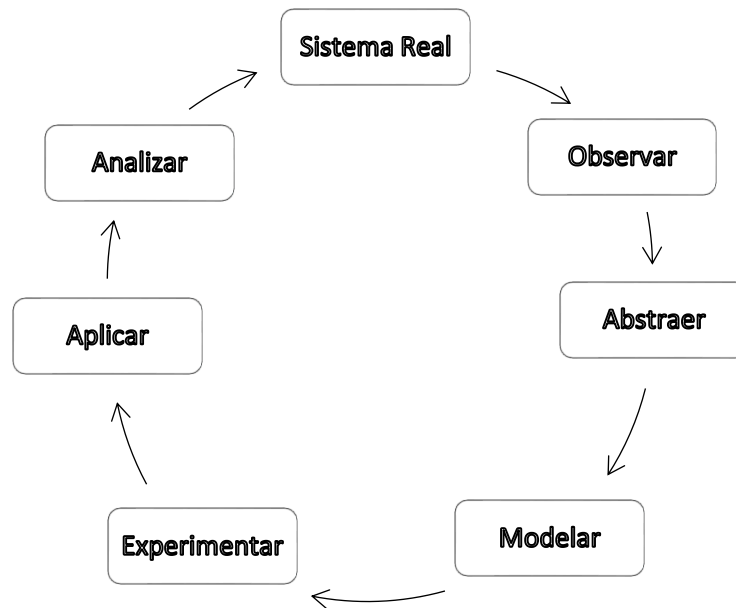


Figura 1. Explica el proceso de modelado, que inicia por la información obtenida mediante la observación del sistema real, luego se clasifica la información, se construye el modelo, se experimenta mediante el uso de pruebas, se aplica el modelo, por último, se analizan los resultados en comparación con el sistema real. Adaptado de (Izquierdo, Ordax, Santos, & Martínez, 2008; Moncho, 2008).

2.3.1 Modelo determinístico

Es un modelo que supone una certeza tanto de las características de los elementos del sistema, el comportamiento de sus variables, sus entradas y salidas; entre las que se presenta una relación directa, lo que permite analizar los impactos de los agentes externos en el sistema (Hillier, Hillier, & Lieberman, 1989; Pérez, 1994).

Por ejemplo, mediante el uso de un modelo determinístico se puede proyectar el crecimiento de un organismo en un periodo de tiempo bajo unas determinadas condiciones ambientales (Pérez, 1994).

2.3.2 Modelo probabilístico

Es un modelo matemático basado en supuestos, a diferencia de los modelos determinísticos, los modelos probabilísticos tienen en cuenta las variables del sistema como variables aleatorias. En ellas, si bien hay valores de referencia, falta certeza sobre su comportamiento y variación, por lo que se reducen sus restricciones (Hillier et al., 1989; Stevenson & Leonard, 2008). Es necesario manifestar que en la mayoría de los procesos de la naturaleza el comportamiento de los elementos dentro de un sistema tiene un comportamiento aleatorio.

Un ejemplo de un modelo probabilístico puede consistir en determinar el comportamiento de una especie ante un estímulo, la percepción de cierto elemento a través de sus sensores generará

una respuesta que en todos los casos no siempre es igual, existe una aleatoriedad en dicha respuesta, al analizar el comportamiento del individuo ante este estímulo se puede comprender el funcionamiento de su sistema nervioso y así predecir las reacciones ante diferentes estímulos (Rao, Olshausen, & Lewicki, 2002).

2.3.3 Modelo de caja negra

Es un modelo matemático que intenta predecir el comportamiento de un sistema, mediante un proceso de prueba - error a partir la correspondencia de las entradas – salidas (datos), sin conocer con certeza los procesos o relaciones entre ellas. La “caja negra” es considerada una estructura interna de un sistema, que relaciona las entradas con las salidas pero que no es directamente observable (Arahal, Soria, & Díaz, 2006; Herrera J., 2007; Puchol Moreno, 2012; Serrano de Entrambasaguas, 1976).

Por ejemplo, un agricultor al sembrar una semilla sabe qué tipo de árbol crecerá, que cuidados debe darle, sin necesidad de conocer todos los procesos que se dan dentro del sistema y aun así acorde a las condiciones climáticas, de suelo y otras, dar una predicción de cuando el árbol dará frutos.

2.3.4 Modelo depredador presa

Lotka en 1920 postula el modelo depredador presa, basado en la interacción entre dos especies que oscilan permanentemente donde uno puede ser depredador, presa o ambos cuando este se amplía (Bacaër, 2011; Gámez Cámara, 1999).

Estos ayudan a generar parámetros de comportamiento especialmente en sistemas biológicos y se caracterizan por que sus cambios son generalmente irreversibles, la creación de estos modelos se basa en un análisis del sistema desde la cibernética, lo que aumenta su precisión, estos elementos deben tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados del modelo ya que siempre tendrá un distanciamiento del sistema real (Chattopadhyay & Arino, 1999; Gilpin, 1979).

Por ejemplo, cuando se determina la abundancia de una especie de plantas a través del tiempo basado en la cantidad de individuos que se alimentan de esta, se puede evidenciar el equilibrio entre depredador y su presa o bien una explosión demográfica de alguno de los componentes (Nagle, Saff, & Snider, 2001; Neuhauser, 2004).

2.3.5 Redes Neuronales

Esquema basado en el sistema nervioso humano, que consta de múltiples unidades elementales con capacidad de procesamiento (neuronas), interconectados en paralelo que forman capas, caracterizado por presentar un algoritmo para ajustar los pesos de parámetros libres (conexiones interneuronales), que permitirán satisfacer las necesidades de desempeño acorde al problema, además las redes neuronales pueden aprender basadas en un número de patrones de entrenamiento (Experiencias) (Larranaga, Inza, & Moujahid, 1997; Matich, 2001; Salas, 2004).

Gracias a su comportamiento no lineal y adaptativo junto con un proceder en paralelo, se suelen aplicar en el procesamiento de datos experimentales de conducta compleja (Gell-Mann, 1994; Izaurieta & Saavedra, 2000; Larranaga et al., 1997).

Ejemplo: El cerebro está conformado por un conjunto de neuronas que de manera individual constituyen unidades básicas de procesamiento que al interconectarse permiten el surgimiento de la inteligencia y a su vez de la conciencia (Mendoza Reyes, 1998; Palacio Gómez & Ochoa Jaramillo, 2009).

2.3.6 Modelación de sistemas complejos

La creación de modelos complejos implica la obtención de una gran cantidad de datos sobre el sistema a estudiar, lo que en primera medida requiere una definición clara de los límites, acorde al nivel de detalle que se busca obtener. En consecuencia, es necesario conocer sus elementos y relaciones (Izquierdo et al., 2008; Zhao, Jakob, Marschner, & Bala, 2011).

Estos sistemas cuentan con una amplia gama de variables interdependientes que se comportan de manera no lineal, donde los modelos convencionales no muestran ser una representación apropiada, es necesario combinar el mayor número de elementos para su estudio junto con conocimiento empírico de los mismos dado por la observación de su comportamiento (Maldonado, 2009; Shalizi, 2005; Shukla, 2008; Xepapadeas, 2010).

2.4 Teorías Propuestas para explicar la complejidad

2.4.1 Teoría general de sistemas

Bertalanffy (1976) postula la teoría general de sistemas, que busca implementar una metodología de estudio de los sistemas complejos desde una visión integral, transversal desde las ciencias sociales hasta las exactas, que se puede aplicar a todos los sistemas bien sean naturales o artificiales, basado en la observación de cada sistema de manera específica y a su vez desde la

semejanza con otros sistemas (Bertoglio & Johansen, 1982; Hammond, 2003; Jiménez, 2014; Müller, 2013; E. A. Urban, 2003).

Afirma que los sistemas biológicos no pueden ser estudiados desde la idea del orden, que dan la física y la química clásica, ya que las comunidades biológicas son caracterizadas por el sin fin de interacciones de sus componentes, los que a su vez pueden ser considerados como un sistema. El estudio de los sistemas, especialmente aquellos relacionados con ecosistemas se debe realizar por niveles desde la célula hasta los más altos como el ecosistema, donde cada nivel específico se rige bajo leyes diferentes (Bertoglio & Johansen, 1982; Hammond, 2003; Odum, 1969; A. E. Urban, 1968).

El cambio climático, las crisis socio-económicas, hacen que el modelado de los sistemas ambientales se deba realizar desde otra perspectiva (Skyttner, 2001).

2.4.2 Retroalimentación

Wiener aportó el concepto de feedback, que muestra como las variables que componen un sistema influyen en otros componentes de dicho sistema (Munné, 2005). Se presenta en sistemas abiertos tanto naturales como sociales, permite dar una visión dinámica de los procesos llevados a cabo en los diversos niveles (Jochum & Huettmann, 2010), la retroalimentación ayuda a los sistemas a regular su comportamiento de acuerdo a sus efectos sobre las salidas del mismo desde

el control y la comunicación de los componentes para la toma de acción en los mismos (M. Arnold & Osorio, 1998; DeAngelis, Post, & Travis, 1986) este concepto se remonta desde la cibernética, donde la no-linealidad surge como base fundamental para la modelación de sistemas complejos y explica el concepto de bucle por lo tanto se abandona la linealidad entendida como la relación directa causa-efecto (Morin, 2007) que se evidencia en una mayor escala en las interacciones entre los sistemas naturales y sociales (Jochum & Huettmann, 2010).

2.4.3 Teoría del caos

Lorenz (1963) postuló la teoría del caos como una forma de estudio de los sistemas dinámicos, no lineales y complejos, sensibles a modificaciones en sus condiciones iniciales, donde pueden surgir bifurcaciones o atractores extraños, de ahí las variaciones en el comportamiento del sistema (Coppo, 2010; E. C. Rodríguez, 2012; Romanelli, 2006; Solaz portolés, 2011).

Presentan una transición de un estado ordenado a uno caótico en donde el control juega un papel fundamental para que se logre dicho cambio, puesto que permite que el sistema aunque se encuentre en aparente desorden mantenga una jerarquía (Romanelli, 2006; Sametband, 1999).

El caos es un punto intermedio entre lo estrictamente determinístico y lo aleatorio, en un sistema no representa inestabilidad, de hecho, los sistemas caóticos son estables, debido a su adaptabilidad, por ejemplo, al arrojar una piedra al río, su corriente no se ve interrumpida, en caso

de ser un sistema ordenado, en el que cada partícula tiene un rumbo fijo, este se vería afectado por la piedra (Coppo, 2010; Sanchez Santillan & Garduño Lopez, 2007).

2.4.4 Estructuras Disipativas

Es un fenómeno que se da por estructuras espacio temporales que se encuentran en sistemas abiertos, con estructura macroscópica, lejos del equilibrio, que se mantienen gracias a un proceso de intercambio de materia y energía, evolucionan de manera imprevista y constante, gracias a reacciones químicas, pasan por la mayoría de estados posibles, y de ahí se generan nuevas estructuras que poseen organización espacio temporal, sin que esto implique que no sean complejas (Hayles, 1991; Kondepudi & Prigogine, 2014; Kubiček & Marek, 1983; Miguélez, 2011; Mori & Kuramoto, 1998; Prigogine, 1977).

2.4.5 Atractor Extraño

Cuando los ecosistemas experimentan grandes cambios debido a pequeños fenómenos o cambios de alguna de sus variables independientes, se afirma la presencia de un atractor extraño (Groffman et al., 2006), generalmente la mayor problemática para definir la presencia o ausencia de un atractor extraño, es el esquema temporal en el que se realiza el análisis. Ya que, al analizar en espacios de tiempo muy pequeños estos no serán percibidos y si se realiza en amplios periodos de tiempo los cambios no serán considerados de manera apropiada. El concepto de atractor extraño se relaciona con la capacidad de recuperación de un ecosistema “resiliencia” o la homeostasis en

el caso de un individuo, que se puede considerar como un sistema (Hastings, Hom, Ellner, Turchin, & Godfray, 1989; Muradian, 2001).

También el atractor extraño se ha tomado como una alteración en un sistema mediante un ciclo incompleto, en los sistemas naturales es poco probable que unos conjuntos de condiciones se repitan, además en ocasiones pueden presentarse varios atractores extraños de manera independiente en un mismo espacio temporal dentro del sistema (Drake, Fuller, Zimmerman, & Gamarra, 2007; Javier & Rincón, 1997).

Para representar un atractor extraño de forma gráfica se suele usar el diagrama de Feigenbaum, que muestra de manera visual como un sistema cíclico se convierte en un sistema caótico, como cada variable del sistema se modifica con respecto a las otras. El punto donde se presenta el cambio, se denomina punto de bifurcación (Fontenla, 1966; Navarro López, 2010).

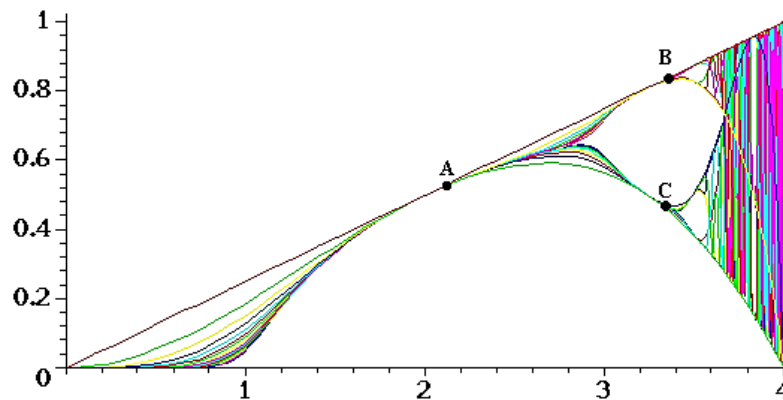


Figura 2. Gráfica de Feigenbaum. Representa el desarrollo del sistema, en donde el eje y representa el número de individuos (millares) y el eje x el tiempo (Años), las líneas de colores representan diferentes puntos de partida para el sistema, el punto A es el punto de bifurcación del sistema y los puntos B y C son los atractores extraños (González, 2016).

2.4.6 Emergencia

Las diferentes conexiones que se presentan en los sistemas complejos generan información nueva que no puede verse desde los componentes que forman dichas relaciones, para comprenderlas es necesario contemplar el tipo de interacción que se establece entre ellos, que se hace mediante el uso de una red neuronal. La información se cataloga como propiedades emergentes del sistema, que no pueden ser deducibles analizando los elementos del sistema de forma aislada por lo tanto no se puede reducir un sistema al momento de estudiarlo, ya que no se estaría contemplando todas sus propiedades (Drake et al., 2007; Fariñas Balseiro, 2010; Fontenla, 1966; Lichtenstein & Plowman, 2009; Palacio Gómez & Ochoa Jaramillo, 2009; Perozo Guédez, 2011).

Capra (2002) considera la emergencia como un fenómeno que da origen a la dinámica del desarrollo, a la evolución, al aprendizaje y a la creatividad (Munné, 2005). La emergencia es la solución al estudio de los sistemas ecológicos (Drake et al., 2007; Pastor & León, 2007).

Ejemplo: El oxígeno y el carbono como elementos independientes cuentan con unas propiedades específicas, al organizarse en cantidades y estructuras específicas se forma el azúcar el cual muestra características que sus componentes de manera individual no expresan (Alarcón Ávila et al., 2005).

Otro ejemplo son los líquenes, donde un hongo y un alga tienen una asociación simbiótica que muestra nuevas propiedades que no se dan en los individuos de manera independiente como la resistencia a condiciones climáticas extremas.

2.4.7 Geometría Fractal

Diferentes estructuras en la naturaleza concuerdan con una forma geométrica compuesta denominada fractal, es una estructura autoorganizada caracterizada por presentar una formación repetitiva con auto semejanza independiente a la escala de observación (Almeida-Filho, 2006; Fariñas Balseiro, 2010; Fontenla, 1966; Munné, 2005; Navarro López, 2010; Valdéz Cepeda & Olivares Sáenz, 1998).

Mandelbrot (1998) logró demostrar que la geometría fractal permite reflejar la geometría de los objetos reales (Munné, 1995; Pestana, 1999).

2.4.8 Teoría de la catástrofe

Thom (1974) postula la teoría de las catástrofes que es uno de los primeros intentos por comprender de forma matemática los fenómenos complejos, dado que busca describir las transiciones (Cambios) repentinos que se presentan en los sistemas sin afectar su continuidad y estabilidad. Para ello, la teoría busca bifurcaciones (Puntos críticos) que permitan evidenciar estados alternativos del sistema como respuesta a las variaciones presentadas, dando información

acerca de sus dinámicas internas. Define el universo como un elemento que se encuentra lejos del caos (V. I. Arnold, 2003; Domínguez, 2000; Espinoza, 1995; Munné, 1995; Pire, 2016; Poston & Stewart, 2014; Roopnarine, 2008; Santos, 1990).

La Teoría ha sido implementada en la descripción de brotes epidémicos inesperados, es decir en fenómenos demográficos discontinuos en la ecología, sin embargo, ha sido ampliamente aplicada de manera cuantitativa en problemas de estabilidad estructural y óptica en ciencias como la física y matemática (Poston & Stewart, 2014; Roopnarine, 2008).

2.4.9 Teoría GAIA

La teoría Gaia postula que la tierra es un sistema termodinámico abierto que obtiene su energía del sol, entendido como un macro sistema compuesto en niveles que van desde los ecosistemas hasta los sistemas celulares, los que cuentan con relaciones que tienden al infinito por lo que se infiere que lo que se haga en uno de estos niveles afectará a todo el macro sistema. Gaia se puede considerar como un sistema estable, que se autorregula y evoluciona de manera constante gracias a las modificaciones de su entorno e individuos (Arocena & Vlahussich, 1995; J. E. Lovelock, 1989; Schneider, 2004).

Por su parte Lovelock y Puig (2007) manifiestan que de acuerdo a Gaia la tierra, como mecanismo de autorregulación frente a las actividades antrópicas y la alta densidad demográfica

genera eventos atípicos (catástrofes) que buscan estabilizar las condiciones de la biota (Tendencia al equilibrio).

En tanto Volk expone que los postulados de la teoría Gaia se deben tener en cuenta para generar mecanismos que reduzcan el impacto generado por el hombre sobre su entorno (J. Lovelock & Puig, 2007; Volk, 2002).

A continuación, se muestra un esquema que relaciona las teorías expuestas anteriormente.

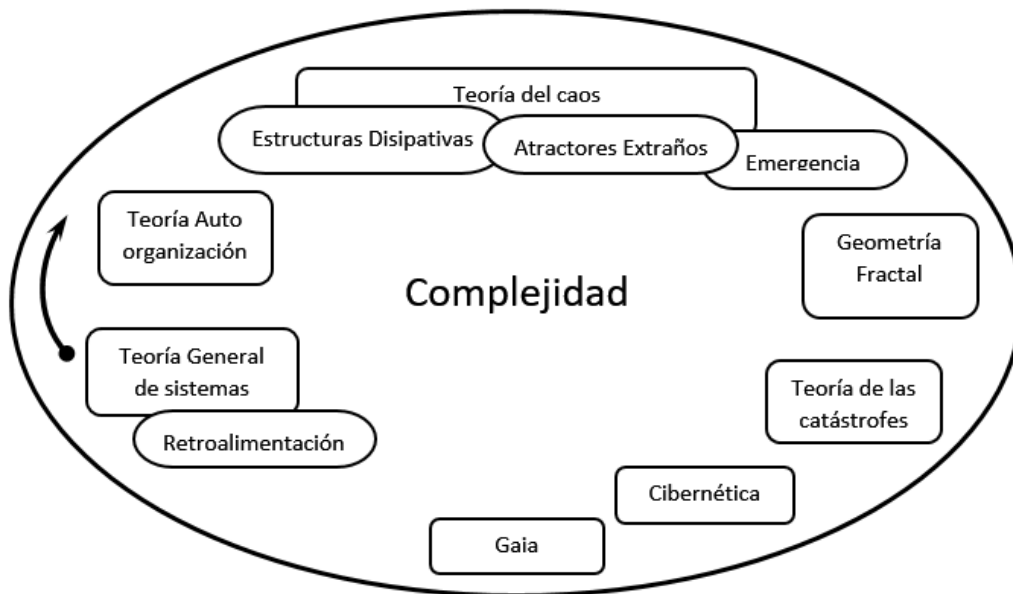


Figura 3. Articulación de Teorías. Muestra algunas teorías relacionadas con la complejidad desde 1954 a 1989, iniciando con la teoría general de sistemas hasta la teoría Gaia.

3. Metodología

Para el presente trabajo se usaron las bases de datos libres y las de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y google académico como herramienta de búsqueda, las palabras clave utilizadas fueron: sistema (abierto, dinámico, no lineal, autoorganizados, complejos, cibernéticos), elemento, relaciones, modelo (Determinístico, probabilístico, caja negra, depredador presa, red neuronal) complejidad, estudio de lo ambiental desde lo complejo, complejidad agregada, stressor, environmental stressors, retroalimentación, no linealidad, teoría del caos, teoría general de los sistemas, estructuras disipativas. Y combinaciones de los anteriores, donde el enfoque principal fueron artículos y libros de investigación.

Posterior a esta búsqueda se realizó un procesamiento de información donde se elaboraron fichas bibliográficas que son un elemento de apoyo para la redacción, incluyen las evidencias del artículo científico o lectura junto con un comentario propio. Se agruparon por tema del documento, acorde al índice detallado construido al inicio de la investigación que contenía ente otros los siguientes temas: Sistema, modelación, teorías que explican la complejidad, complejidad ambiental y aplicación de la complejidad al estudio de lo ambiental.

Al combinar las palabras clave, se escogieron por su título 1238 referencias bibliográficas, que fueron filtradas de acuerdo a su contenido de las cuales se obtuvieron 185 para el análisis final. De ellas, 74 se encontraban en idioma inglés, 2 en francés, 2 en portugués, 1 en alemán y las restantes en español. Con respecto al uso de las bases de datos 110 de las fuentes fueron de acceso

libre, 18 se tomaron de fragmentos publicados como el resumen y 66 se descargaron desde las bases de datos de la universidad.

A continuación, se muestran dos diagramas resumen de la metodología utilizada.

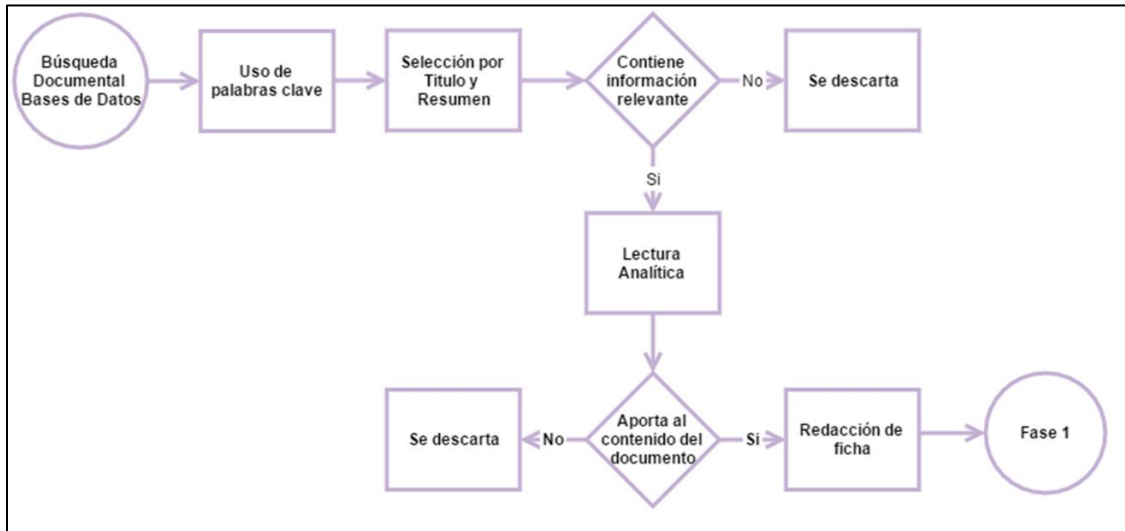


Figura 4. Proceso fase 1 metodología de trabajo donde los recuadros representan las actividades, los rombos las decisiones y las flechas el flujo del proceso.

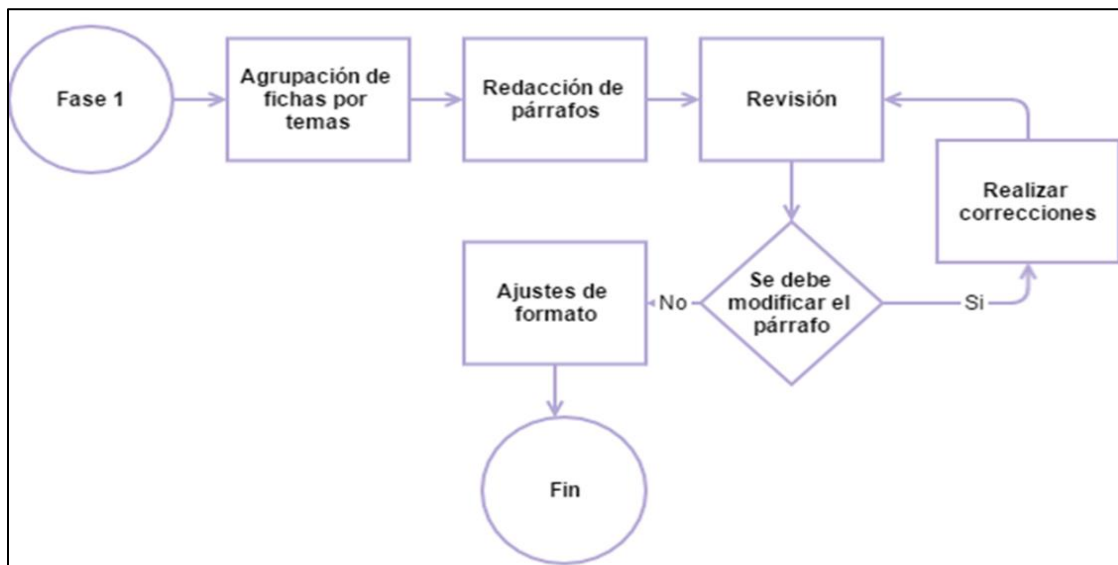


Figura 5. Proceso fase 2 metodología de trabajo.

4. Complejidad Ambiental

4.1 Complejidad

Morín (1997) postula la complejidad como un paradigma para el estudio de los fenómenos en la naturaleza (desde el punto de vista del observador), que en muchos casos son impredecibles y presentan una dinámica no lineal, en donde a mayor número de interacciones más complejo es el sistema. No obstante, se considera que la aparición de propiedades emergentes hace que un sistema sea caracterizado como complejo (Arana, 2006; Bonchev & Rouvray, 2005; Brandão, 2008; Capra & Sempau, 1998; Eschenhagen, 2007; M. V. García, 2011; Leff & Funtowicz, 2000; Levin, 2005).

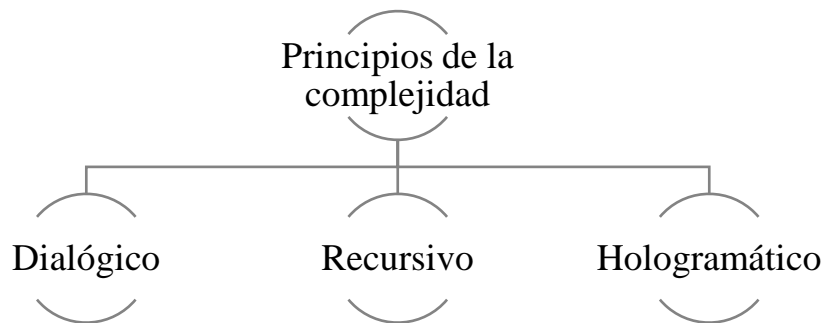


Figura 6. Principios de la complejidad. Muestra los tres principios de la complejidad, donde lo dialógico tiene en cuenta las interacciones entre elementos opuestos de forma complementaria, lo recursivo, cada sistema crea sus propias relaciones causa efecto, por último, lo hologramático, que indica que el todo es más que la suma de sus partes. Adaptado de (Arana, 2006; Palacio Gómez & Ochoa Jaramillo, 2009; Reynoso, 2007).

La complejidad está entre lo predecible y lo totalmente caótico, busca entender las fuerzas que organizan los sistemas abiertos, a través del tiempo y el espacio, donde los efectos a largo plazo forman parte de la complejidad del sistema por lo que no se pueden predecir, mediante perspectivas causa efecto de la linealidad (Aguado, 2007; Bailey & Pagels, 1991; Green, Hastings, & Arzberger, 2005; Jiménez, 2014).

Levin (2005) postula que no se puede definir la complejidad puesto que considera que la definición de complejo varía de sistema a sistema dependiendo de sus características individuales.

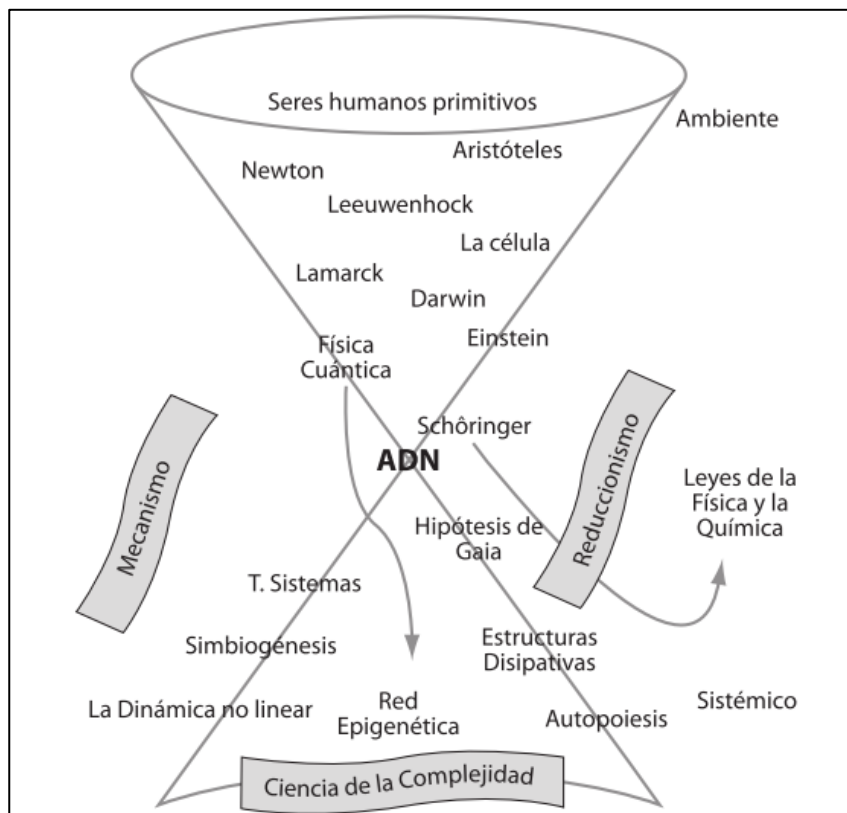


Figura 7. Cono Complejidad. Se puede observar algunas teorías y descubrimientos importantes para el estudio de los seres vivos. El cono presenta tres niveles, en donde la parte superior se encuentra el ambiente que rodea al hombre, en el medio están las leyes de la física y la química junto con el ADN que marco nuevas pautas para el desarrollo de la biología y al final se observan la teoría sistémica, la dinámica no lineal, las estructuras disipativas y la complejidad (Chalmers, 2000; Herrero Uribe, 2008). Tomado de (Herrero Uribe, 2008).

4.1.1 Complejidad ambiental

Nace como respuesta a la necesidad de comprender los sistemas biológicos y sociales de una manera detallada, puesto que los modelos clásicos no representan los sistemas a largo del tiempo de manera precisa y sólo fijan en condiciones de equilibrio, la complejidad muestra detalles no conocidos de sistemas físicos como los ecosistemas (Aguado, 2007; Bascompte & Solé, 1995; Eschenhagen, 2007).

La complejidad ambiental se puede entender como una política de conocimiento que busca apreciar las dinámicas en los sistemas y así comprender las riquezas en las interacciones de los ecosistemas, donde lo ambiental sobrepasa lo biótico y lo físico, involucra el sistema cultural, por lo tanto, su estudio debe ser transdisciplinar (Aitken & An, 2012; Bash, 2015; Ungar & Strand, 2005).

Aunque los sistemas ambientales tienden a ser caóticos y complejos los seres vivos que los componen pueden ser autopoieticos, entiéndase autopoietico (hacer por sí mismo) como la capacidad de un individuo o sistema de producir de manera constante sus componentes sin necesidad de recurrir a la autoorganización como un mecanismo para llegar al equilibrio (Maturana & Varela, 2004; M. Rodríguez & Torres, 2003).

Los sistemas ecológicos presentan complejidad espacio temporal y su estudio desde esta perspectiva ayuda a entender los rumbos que toman las problemáticas ambientales desde lo local a lo global (estudio multiescala) (Auger, Charles, Viala, & Poggiale, 2000; Bascompte & Solé, 1995; Eschenhagen, 2007).

El estudio de los sistemas ambientales donde se relacionan humanos y ecosistemas, cuentan con un amplio número de relaciones y pocas variables de control, deben ser analizados desde modelos complejos ya que la simplicidad ignora variables relacionadas con niveles inferiores, que pueden aportar información importante al momento de predecir el comportamiento de un sistema complejo (Green et al., 2005; Holling, 2001).

Uno de los retos más relevantes al momento de estudiar sistemas complejos, es convertir la información adquirida en modelos matemáticos, que permitan reflejar que ocurre en el sistema, por lo tanto se debe reducir el sistema a su mínima expresión sin omitir variables de alta importancia y saber cuáles pueden ser ignoradas sin dejar atrás la complejidad del modelo (ser tan sencillo como sea posible sin perder la complejidad), lo que facilitará su análisis y procesamiento ya que modelos de alta complejidad con datos irrelevantes pueden representar consumo innecesario de recursos como tiempo de trabajo en los equipos y uso de software con mayor capacidad (Green et al., 2005; Holling, 2001; Philip, 1999) .

Cabe mencionar, que las nuevas herramientas de la informática permiten procesar la cantidad de datos que se generan a partir del estudio de los sistemas complejos. Cuando el modelo sea más cercano a la realidad mayor será su complejidad, aunque se debe tener en cuenta que es inevitable la impredecibilidad en sistemas que estudian la relación entre el ser humano y los ecosistemas. Así como los sistemas complejos cuentan con un comportamiento dinámico y de constante cambio los modelos que lo describen deben orientarse por la misma conducta (Holling, 2001).

Por último, si la complejidad no se relaciona con modelos matemáticos se convierte más en una metáfora que en una teoría de estudio de los ecosistemas (Proctor & Larson, 2005).

4.1.2 Stressors

Los stressors se definen como una alteración en el equilibrio del sistema, que puede ser: eutrofización, extinción de especies y demás impactos a un ecosistema. Dichas alteraciones son provocadas actividades humanas, lo que genera consigo problemáticas a los sistemas ambientales (Manson, 2001), pueden ser causa de alteraciones en cuerpos de agua, cambios en la dispersión de los contaminantes en un determinado ecosistema, que modifican el hábitat de un individuo (Johnson & Vanjonack, 1976). Sin embargo, los stressors solo se estudian en situaciones donde los factores de estrés afectan a una comunidad humana y en la mayoría de los casos, se busca ver que tan susceptibles son los organismos a soportar o a tener un proceso de adaptación, antes de realizar un estudio que proponga medidas que mitiguen la problemática.

5. Aplicación de la complejidad al estudio de lo ambiental (Estudios de Caso)

Simulación computacional mundo de las margaritas

Lovelock y Watson (1983) desarrollaron una simulación computacional llamada el mundo de las margaritas, consistía en un planeta que orbitaba alrededor de un sol habitado únicamente por margaritas blancas y negra, ambas se reproducen buena manera a la misma temperatura, sin embargo cuando la temperatura es baja las margaritas negras predominan ya que absorben la radiación manteniendo la temperatura del planeta , por el contrario si se aumenta la temperatura del planeta predominan las margaritas blancas que reflejan la radiación. El experimento fue más eficiente al aumentar la biodiversidad. La simulación demostró la importancia de la variedad de especies en un planeta como mecanismo de regulación (E. C. Rodríguez, 2012).

Complejidad, resiliencia y memoria. Aportes para la comprensión de un proceso integral de restauración ecológica en la Sierra de Santa Martha

Proyecto ubicado en México en la Sierra de Santa Martha, Estado de Veracruz, (reserva Natural) donde se utilizó la complejidad como herramienta para encontrar la mejor alternativa. Aquí, el ecosistema se entiende como algo más que un conjunto de especies en un medio abiótico, para la siembra de árboles para la comunidad (técnica de nucleación de Anderson). Dada la disminución del nivel freático en la zona descrita se redujo la disponibilidad de agua en los acuíferos y para retener el líquido fue necesario por un lado plantar árboles de ciertas especies y por otro lado organizar a la comunidad para contribuir en el proceso de restauración (Mamone & Guadarrama, 2016).

Análisis de la conectividad del paisaje espacio-temporal.

Luego de un incendio en Carolina del sur (California) en el 2003, que afectó 29.000 Ha, los encargados de manejo de fauna, buscaron como el evento afectó las especies de la zona a partir del análisis de fragmentación del ecosistema local, mediante el uso de datos obtenidos a través de la teledetección. Primero se determinó la ubicación de los parches del ecosistema, luego se evaluaron las características morfológicas y de comportamiento de cada especie, lo que permitió la recolección de información para determinar las medidas de manejo y recuperación del área afectada por el evento atípico (Green et al., 2005).

La ramificación dinámica de colonias trasplantadas de los corales amenazados *Acropora cervicornis*: morfogénesis, la complejidad y el modelado.

Este proyecto busca comprender el desarrollo de la especie *Acropora cervicornis*, bajo diferentes condiciones ambientales, para su trasplante como iniciativa de manejo y conservación en dos arrecifes de Puerto Rico, se usaron dos índices para evaluar la complejidad de la colonia, la relación de bifurcación Horton-Strahler y el índice de ramificación Carrillo-Mendoza, se concluyó que el último índice implementado se ajustaba mejor a la dinámica de ramificación de esta especie y demuestra su ventaja como herramienta para predecir su productividad (Mercado-Molina, Ruiz-Diaz, & Sabat, 2016).

La medición de la complejidad para inferir cambios en la dinámica de los sistemas ecológicos bajo estrés

El objetivo del presente caso es entender el patrón de comportamiento de los datos ecológicos producto de las transiciones en sistemas ambientales (stressors), por lo que propone el uso de complejidad de Kolmogorov como medida de aleatoriedad para inferir cambios en la estabilidad de un ecosistema al descomponerlo por el método de bloques. Identifica los cambios en la complejidad de las series de tiempo y espacio, a través de la observación de patrones y el conocimiento de los puntos de inflexión, luego del análisis de las series de datos obtenidas, se sugiere que la complejidad puede ayudar a evaluar los cambios en la dinámica de los ecosistemas en amplios espacios temporales. (Dakos & Soler-Toscano, 2016).

Comparación de escalas múltiples de los índices de complejidad topográfica en relación con la riqueza de especies de plantas

En China se realizó un estudio que buscaba relacionar la riqueza de especies del género *Rhododendron* con la complejidad topográfica, entendida como la alta variabilidad en el relieve de un terreno, que se calcula a través del análisis de 5 variables: desviación estándar de la elevación, rango de elevación, la desviación estándar de la pendiente, la rugosidad, y la desviación estándar de curvatura. Como resultado se encontró una relación directa entre la complejidad topográfica y la presencia de las especies del género *Rhododendron* para finalizar sugiere replicar esta metodología al estudio de riqueza a escalas continental y global (Yu et al., 2015).

La complejidad del hábitat, la dispersión y meta poblaciones: estudio macroscópico de un sistema depredador-presa

Los autores postulan que puede haber una relación entre la interacción depredador presa y la complejidad del hábitat, mediante la evaluación de dos parches ecológicos separados, uno con el método Rosenzweig-MacArthur que permite estudiar la densidad del depredador y el punto de equilibrio respecto al número de individuos presa, el segundo por el método el Holling Tipo II que estudia el comportamiento del modelo depredador presa cuando hay una saturación del depredador y por ende el tiempo de búsqueda de la presa aumenta. Al finalizar el estudio se demostró cambios en la interacción depredador-presa, relacionados con la complejidad del hábitat, donde a mayor grado de complejidad la densidad de la presa presenta disminución de rendimiento y frente a un aumento en la dispersión de las poblaciones se evidencia estabilidad en el modelo (Jana & Bairagi, 2014).

¿Estados insulares del Caribe en una panarquía socio-ecológica? Teoría de la complejidad, la adaptabilidad y los sistemas de conocimientos ambientales

Luego de una catástrofe natural causada por el Huracán Iván en Granada un estado insular en el Caribe presentó una crisis política a causa de este fenómeno, los autores proponen cambiar el modelo de desarrollo a la panarquía definida como el proceso de racionalizar los cambios en la naturaleza, apoyados en los modelos de conocimiento híbrido (combinación de modelos de vida artificial) y las bases estructurales de la complejidad, de esta forma, lograr aumentar la

adaptabilidad de sus entornos frente al cambio socio-ecológico que se va a presentar a causa del cambio climático(Holdschlag & Ratter, 2016).

La complejidad del hábitat, el cambio ambiental y la personalidad: Una perspectiva tropical

El estudio se realizó en selvas tropicales, que han sido afectadas por la actividad antropogénica y busca determina la relación entre la disminución en los individuos de una especie y su personalidad, para esto planteó tres escenarios, primero independientemente de la personalidad, el impacto es demasiado intenso y la población se extingue, segundo los individuos con personalidades proactivas buscan otro habitat, mientras que los reactivos (tímidos), se mantienen en el medio degradado por último, los individuos con personalidades reactivas buscan otros hábitats y los proactivos se adaptan al cambio en el entorno. A través del análisis de los escenarios logro mostrar una relación entre el comportamiento de una especie y su capacidad de adaptación (Pamela Delarue, Kerr, & Lee Rymer, 2015).

Medidas de complejidad espacio-ecológicos en GRASS GIS

Los autores proponen la implementación de la teledetección como una herramienta de modelización de complejidad espacial, a través del uso de datos de sensores remotos, procesados por el software de uso libre GRASS GIS y el análisis de estadísticas basadas en la teoría de información común, entropía de Boltzman o Shannon-Weaver, uniformidad de Pielou y el dominio

inverso de Simpson, para la construcción de modelos hidrológicos, detección del cambio climático y determinación del uso y cobertura del suelo(Rocchini et al., 2015).

Un marco para examinar las dimensiones y características de complejidad inherente dentro de megaproyectos ferroviarios

El estudio busca enmarcar como compleja la toma de decisiones relacionadas con la implementación del megaproyecto ferroviario que va a componer la gran red de transporte del reino unido (proyecto High Speed 2), debido a la gran cantidad de variables ambientales, sociales y políticas, que se deben tener en cuenta. Plantea la construcción de un modelo soportado en proyectos preexistentes que van desde lo sencillo a lo complejo, como herramienta para la toma de decisiones. Cabe anotar que la complejidad se usará para analizar todos los aspectos relacionados con el ciclo de vida del proyecto (Chapman, 2016).

El tránsito de los mejillones nativos a exóticos: La complejidad aumentada del hábitat y sus relaciones en los efectos de las relaciones de la fauna

El proyecto evalúa mediante el método de la cadena y cinta como la introducción de una especie invasora *Limnoperna securis*, afecta la complejidad del entorno de una especie nativa *Mytilus galloprovincialis*, en dos Rias de Galicia. Concluye que se presenta un cambio en la estabilidad de la macro fauna a partir de alteraciones en las relaciones tróficas causadas por la expansión de la especie invasora (Gestoso et al., 2013)

Los cambios en la complejidad del comportamiento de los delfines nariz de botella a lo largo de un gradiente de ambientes afectados por factores antropogénicos en las aguas costeras del sur de Australia: implicaciones para las estrategias de conservación y gestión

Mediante un estudio de la complejidad en los patrones de comportamiento de los delfines nariz de botella, se encontró una relación directa entre las alteraciones en los tiempos de buceo de la especie (debido a la generación de estrés) y la presencia de actividades antrópicas como el uso de barcos de motor, el buceo y el turismo en las aguas costeras al sur de Australia (Cribb & Seuront, 2016).

Complejidad apropiada para la predicción de la geomorfología del estuario y la costa a escalas medias y pequeñas.

El problema que plantea el artículo es la selección de un modelo más adecuado para la predicción de los cambios en el relieve de las zonas costeras, que puede ser mecanicista o complejo. Luego del análisis de las ventajas y desventajas de cada uno, se concluye que este fenómeno se debe modelar desde una perspectiva, que se encuentre en un punto intermedio entre lo mecanicista y lo complejo a lo que se le conoce como complejidad apropiada (French et al., 2016).

Análisis Paisaje Energía: Una propuesta para medir la complejidad al interior de procesos de sistemas agro ecológicos

La problemática de estudio es el dilema entre el aumento de la intensidad de uso del suelo para satisfacer la creciente demanda de productos agrícolas y la pérdida de biodiversidad, por consiguiente, plantea la necesidad de encontrar un punto de equilibrio entre estos dos postulados. Para eso se debe estudiar la riqueza de especies que se da en los diferentes patrones de uso del suelo, acorde al impacto generado por la agricultura. Se postula un modelo que analice tanto la energía del paisaje (complejidad de sus bucles de energía) como la información contenida en toda la red de flujo, con el fin de relacionar los datos obtenidos con la estructura funcional del paisaje (Marull, Font, Padró, Tello, & Panazzolo, 2016).

6. Discusión.

Los sistemas naturales al ser abordados desde la complejidad pueden entregar explicaciones más cercanas a la realidad, puesto que la física y la química clásica no permiten un entendimiento suficiente de las relaciones causa-efecto que se dan en los sistemas complejos, a decir verdad, una causa puede tener varios efectos y esos efectos a su vez convertirse en causa de otros fenómenos (Lorenz (1963), Capra (1998), Bertalanffy (1976), Prigogine (1977), Morín (1994), Munné (1995), Sanjuán (2007), y Obregón (2016)). En contraste, Schrödinger (1944) postula que los sistemas vivos deben ser estudiados desde la física, Phillips (1969) argumenta que los fundamentos de las teorías relacionadas con la no linealidad contra los análisis mecanicistas clásicos son escasos. En el entendido que la aproximación mecanicista estudia los fenómenos desde la física y la química clásica. Además Ruelle (1990) plantea que el uso de metodologías creadas a partir del caos y aplicadas al estudio de sistemas, se dan por lo novedosas y no por las bases científicas que las soportan.

En la particularidad de los sistemas ambientales autores como Bascompte & Solé (1995), Zellmer (2006), Aguado (2007), Eschenhagen (2007) y Larsen (2016), consideran que deben ser estudiados desde la complejidad, puesto que este tipo de análisis brinda herramientas para entender los ecosistemas desde la transdisciplinariedad, en este caso no solo se tiene en cuenta el componente meramente biológico, sino también las interacciones con diversos componentes como el cultural. Para su análisis se toman en cuenta características de los ecosistemas (entradas) y sus mecanismos de relación (procesos) en los que se pueden encontrar múltiples interacciones (tendientes al infinito), bucles de retroalimentación, propiedades emergentes, autoorganización y

autopoiesis, que dan como resultado un modelo más cercano a la realidad. En consecuencia, esa diversidad de parámetros y relaciones no alcanzan a ser analizados en profundidad desde la física y la química clásica.

Anderson (1999), Holling (2001) y Green (2005) afirman que la complejidad en los sistemas ambientales no permite generalizar patrones de comportamiento dado que implica un menor entendimiento del sistema. Por ejemplo, entre ecosistemas similares en espacios geográficos diferentes, un mismo impacto puede producir un resultado diferente, de ahí se infiere que, para cada caso de estudio se deben analizar de forma particular las interacciones entre el impacto y el sistema. Cabe aclarar que en el proceso de estudio se pueden simular patrones de comportamiento basados en información previa de sistemas similares, adaptándolos a cada caso en particular.

La ventaja de esta perspectiva es que los impactos ambientales causados por una obra proyecto o actividad pueden predecirse de una manera más precisa, así tomar medidas para su prevención y mitigación, por consiguiente, reducir el número de veces que se deba compensar y corregir. No obstante, obtener información más precisa analizarla y generar un modelo, representará un aumento de los costos del proyecto en su etapa de formulación. Para determinar la viabilidad de llevar a cabo el estudio de un proyecto desde la complejidad, se debe realizar un análisis costo beneficio de manera específica.

Por su parte, Proctor (2005), Izquierdo (2008), Shaliza (2005) Xepapadeas (2010) y Hatcher (2004) García Callejas (2016) afirman que los sistemas deben estudiarse contemplando una mayor cantidad de variables que permitan realizar simulaciones con un menor margen de error, lo que a la postre indica lo inadecuado de generalizar patrones de comportamiento. Por tal razón, se deben tener en cuenta las propiedades emergentes de los sistemas, y como resultado se obtendrá un modelo que se ajuste mejor a realidad. Aumentar el nivel de detalle puede convertirse en una problemática al momento de estudiar el sistema, ya que, si no se delimitan bien los alcances del modelo al construir, surgen interacciones de poca relevancia entre componentes aislados del sistema que pueden alterar los resultados de la simulación.

En contraste, Hampel (1961), Monod (1970), Nagel (1998), Brigandt (2006) y Sokal & Bricmont (2009) , postulan que todos los sistemas presentan derivabilidad de correspondencia y aunque un elemento en niveles inferiores tenga cambios en su componente estructural , los niveles superiores no se verán afectados. Además, plantean que los experimentos de laboratorio muestran una representación de la realidad con un alto nivel de confianza, por lo tanto, se pueden hacer comparaciones entre lo observado en el laboratorio y los fenómenos que se presentan en la naturaleza.

La investigación realizada muestra un patrón de aplicación de la complejidad en Latino América, enfocada al análisis de las relaciones culturales, que expone un conflicto entre las ciencias naturales y las sociales, donde el hombre es una especie alejada de los ecosistemas por la plataforma tecnológica, cuyos conflictos ambientales son generados por una alteración en el

equilibrio de su sistema social, de ahí postula la cultura como una causa y solución de los conflictos ambientales(Noguera De Echeverri, 2007), en este contexto se pueden encontrar múltiples referencias que dan aportes valiosos para el estudio de la complejidad, sin embargo, son escasos los postulados referentes a la modelación de sistemas ambientales desde la complejidad, con el análisis de casos se logró dar una muestra de las ventajas del uso de modelos complejos aplicados al estudio de ecosistemas en y a los impactos generados por causas antrópicas. Se propone comenzar a estudiar los sistemas ambientales Latino Americanos desde la complejidad, ya que las dinámicas de los ecosistemas tropicales son un claro ejemplo de lo que se entiende como sistemas complejos. El análisis desde múltiples puntos de vista permite a través de la retroalimentación, construir una red de conocimiento que ayude a dar un manejo apropiado a las actividades humanas, para esto se debe tener en cuenta los ámbitos social, natural y económico. En consecuencia, llegar a una aproximación del concepto de desarrollo sostenible.

7. Conclusión y Recomendación

La investigación documental realizada puede ser usada como marco de referencia en futuras investigaciones que busquen estudiar lo ambiental desde lo complejo, puesto que compila conceptos y teorías claves que permiten consolidar una definición de complejidad y complejidad ambiental. A partir de la revisión documental se logra inferir que el auge del estudio de sistemas complejos se da en la década de los 90's, sin embargo, las teorías precursoras de la complejidad se dan en los años 60. Cabe resaltar la importancia de apoyar la definición dada de complejidad ambiental a partir de la presentación de casos de estudio, ya que evidencia la aplicabilidad del concepto al análisis de sistemas ambientales. Si bien se demuestra que la complejidad es una herramienta útil para el modelado de fenómenos, la implementación de tecnologías apropiadas, el ordenamiento del territorio y la evaluación de impacto ambiental, se debe tener en cuenta la delimitación de las variables de estudio.

Por último, se recomienda la creación de metodologías para la evaluación de impactos ambientales desde la complejidad que se adapten a las condiciones particulares de cada sistema a estudiar, es necesario aplicar modelos que permitan la inclusión de variables culturales, a partir de la asignación de valores numéricos que se ajusten a las condiciones propias de cada sistema y profundizar la revisión de autores Latino Americanos, para tener un horizonte más amplio de la complejidad ambiental en el contexto local.

8. Bibliografía

- Abraham, R. H. (2011). The Genesis of Complexity. *World Futures : The Journal of New Paradigm Research*, 67(November 2014), 380–394.
<http://doi.org/10.1080/02604027.2011.585915>
- Aguado, J. M. (2007). Complejidad y pensamiento sistémico. *Cultura Verde Ecología, Cultura Y Comunicación*, 155–171.
- Aitken, S. C., & An, L. (2012). Figured worlds: Environmental complexity and affective ecologies in Fanjingshan, China. *Ecological Modelling*, 229, 5–15.
<http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.024>
- Alarcón Ávila, E., de la Mora Basáñez, C. R., García Vega, V. A., Gutiérrez Juárez, R., Jiménez Velasco, M. G., León Fernández de Lara, Y., ... Vargas Martínez, H. S. (2005). Introducción a la Cibernética. Primera Parte. In *Memoria del seminario de Robótica del INAOE* (p. 26).
- Almeida-Filho, N. (2006). Complexity and Trans-disciplinary in the Collective Health Field: Concepts Evaluation and Applications. *Salud Colectiva*, 2(2), 123–146.
- Alomari, M. M., & Rodanski, B. S. (2011). Control of Hopf bifurcation and chaos as applied to multimachine system. In J.A. Tenreiro Machado (Ed.), *Nonlinear Science and Complexity* (pp. 37–48). Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-90-481-9884-9_4

Álvarez - Buylla, E., Mendoza, L., & Vergara, F. (1996). Orden y caos en biología. *Revista de La Universidad de México.*, 58–64.

Antequera Baiget, J. (2004). El potencial de sostenibilidad de los asentamientos humanos. In *El potencial de sostenibilidad de los asentamientos humanos* (p. 356). Retrieved from http://arquiciudad.comoj.com/Archivos.Net/Fase I/Sistemas/Antequera.Sist/Cap1_Sist.pdf

Aracil, J., & Gordillo, F. (1997). *Dinamica de Sistemas*. Madrid: Alianza universidad textos.

Arahal, M., Soria, M., & Díaz, F. (2006). *Técnicas de predicción con aplicaciones en ingeniería*. Sevilla: Universidad de Sevilla . Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=6XPwOImLISEC&oi=fnd&pg=PA19&dq=T%C3%A9nicas+de+predicci%C3%B3n+con+aplicaciones+en+ingenier%C3%ADa&ots=PBFOEvTOWb&sig=uOlrdTeh4TE9drpK5Ym1YPEofcw>

Arana, A. (2006). REPRESENTANDO LA COMPLEJIDAD AMBIENTAL : DOS ESTUDIOS DE CASO. *Investigación Y Postgrado*, 22(1), 13–58. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2474593>

Arnold, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta Moebio*, 3, 40–49.

Arnold, V. I. (2003). *Catastrophe theory*. Springer Science & Businnes Media. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GQoQyqia45gC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Catastrophe+Theory&ots=JGjogG_GYV&sig=z69uhijiyokbbSjEPOL6Nv3uwNg

Arocena, R., & Vlahussich, M. (1995). I La problemática del ambiente. In *Ciencias, técnicas y sociedad* (pp. 17–20). Montevideo: Ediciones Trilce.

- Auger, P., Charles, S., Viala, M., & Poggiale, J. C. (2000). Aggregation and emergence in ecological modelling: Integration of ecological levels. *Ecological Modelling*, 127(1), 11–20. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00201-X](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00201-X)
- Bacaër, N. (2011). Lotka, Volterra and the predator–prey system (1920–1926). In *A Short History of Mathematical Population Dynamics* (pp. 71–76). London: Springer London. http://doi.org/10.1007/978-0-85729-115-8_13
- Bailey, M., & Pagels, M. (1991). Measuring the overhead in conservative parallel simulations of multicomputer programs. *Proceedings of the 23rd Conference on Winter*. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=304331>
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. <http://doi.org/10.1063/1.168724>
- Bascompte, J., & Solé, R. V. (1995). Rethinking complexity: modelling spatiotemporal dynamics in ecology. *Trends in Ecology & Evolution*. Elsevier Current Trends. [http://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89134-X](http://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89134-X)
- Bash, E. (2015). ciencia, enfoque sistémico y complejidad ambiental. *PhD Proposal, 1*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bertalanffy, L., & Almela, J. (1976). Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones. In *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones* (Revisada, p. 366). Mexico: Fondo de cultura económica. Retrieved from [http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&B1=Buscar&formato=1&cantidad=50&expresion=Bertalanffy, Ludwig von,](http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&B1=Buscar&formato=1&cantidad=50&expresion=Bertalanffy,Ludwig%20von)

- Bertalanffy, L. Von. (1976). Teoría general de los sistemas. In George Braziller Inc. (Ed.), *Teoría General de Sistemas: fundamentos, desarrollo y aplicaciones* (pp. 1–37). New York.
- Bertoglio, O., & Johansen, O. (1982). Enfoque de los sistemas. In *Introducción a la teoría general de sistemas* (pp. 17–32). Mexico: Limusa. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=4bVvTLvHVzMC&oi=fnd&pg=PA13&dq=Introducci%C3%B3n+a+la+teor%C3%ADa+general+de+sistemas&ots=Ri20EXvnd8&sig=EuhiNisxVQmOag3gSC-OV82tR6E>
- Boccaro, N. (2010). *Modeling complex systems* (2, ilustra ed.). Illinois: Springer Science & Business Media, 2010. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=boUorPmcbKMC&oi=fnd&pg=PR1&dq=modeling+complex+systems+&ots=QnpDeiW9Zs&sig=SGcqZlvxmSq8WILVaZmei6Wz4IU>
- Bock, G., Goode, J., & Novartis Foundation. (1998). Reductionism and antireductionism. In *The limits of reductionism in biology*. (p. 228). United Kingdom: J. Wiley.
- Bohórquez Arévalo, L. E., Espinosa, A., & Bohórquez Arévalo, L. E. (2015). Theoretical approaches to managing complexity in organizations: A comparative analysis. *Estudios Gerenciales*, 31, 20–29. <http://doi.org/10.1016/j.estger.2014.10.001>
- Bonchev, D., & Rouvray, D. H. (2005). *Complexity in chemistry, biology, and ecology*. Springer.
- Bossel, H. (2007). *Systems and Models: Complexity, Dynamics, Evolution, Sustainability*. Norderstedt: Books on demand GmbH. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=_cX1ZRWNuGUC&lpg=PP1&dq=Systems and Models: Complexity, Dynamics, Evolution,

Sustainability&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q=Systems and Models: Complexity, Dynamics, Evolution, Sustainability&f=false

Brandão, G. (2008). Luhmann y la Complejidad: una introducción transdisciplinar. *Revista Mad: Revista Del Magister En Análisis Sistémico Aplicado a La Sociedad*, (19), 7. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3658515>

Brigandt, I. (2006). Philosophical issues in experimental biology. *Biology and Philosophy*. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/R341144V27W63150.pdf>

Caballero, L. (2008). *La búsqueda del comienzo. El pensamiento complejo en biología*. CopIt ArXives.

Capra, F., & Sempau, D. (1998). *La trama de la vida. Chemistry & ...* Barcelona: Anagrama. <http://doi.org/N.D>

Chalmers, A. F. (2000). *¿Qué es la cosa llamada ciencia? Siglo XXI editores (Tercera)*. Madrid, España: Siglo ventiuono editoresS.A. Retrieved from <https://ulagos.files.wordpress.com/2012/03/libro-que-es-esa-cosa-llamada-ciencia.pdf>

Chaparro Guevara, G. (2006). NO LINEALIDAD, COMPLEJIDAD Y SISTEMAS SOCIALES
*. *REVISTA ANTROPOLOGÍA Y SOCIOLOGÍA VIRAJES*, 10, 197–219.

Chapman, R. J. (2016). A framework for examining the dimensions and characteristics of complexity inherent within rail megaprojects. *International Journal of Project Management*, 34(6), 937–956. <http://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.05.001>

Chattopadhyay, J., & Arino, O. (1999). A predator-prey model with disease in the prey. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 36(6), 747–766. <http://doi.org/10.1016/S0362->

546X(98)00126-6

- Colina, F. (1984). Crítica de Libros. *Rev. Asoc. Esp. Neuropsiquiatría. Rev. Asoc. Esp. Neuropsiquiatría*, 10.
- Coppo, J. A. (2010). Teoría del caos y método científico. *Revista Veterinaria*, 21(2), 157–167.
- Cribb, N., & Seuront, L. (2016). Changes in the behavioural complexity of bottlenose dolphins along a gradient of anthropogenically-impacted environments in South Australian coastal waters: Implications for conservation and management strategies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 482, 118–127. <http://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.03.020>
- Dakos, V., & Soler-Toscano, F. (2016). Measuring complexity to infer changes in the dynamics of ecological systems under stress. *Ecological Complexity*. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2016.08.005>
- DeAngelis, D. L., Post, W. M., & Travis, C. C. (1986). Introduction. In *Positive Feedback in Natural Systems* (pp. 1–14). Springer. http://doi.org/10.1007/978-3-642-82625-2_1
- Devaney, R. L. (1992). *A first course in chaotic dynamicla systems theory and experiment*. Perseus Books Publishing L.L.C.
- Dincer, I., & Cengel, Y. A. (2001). Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. *Entropy*, 3(3), 116–149. <http://doi.org/10.3390/e3030116>
- Domínguez, E. (2000). Teoría de catástrofes. *Números*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2316588&orden=271641&info=link>
- Drake, J. A., Fuller, M., Zimmerman, C. R., & Gamarra, J. G. P. (2007). Emergence in ecological systems. In *From Energetics to Ecosystems: The Dynamics and Structure of Ecological*

Systems (pp. 157–183). http://doi.org/10.1007/978-1-4020-5337-5_8

Duarte, O. (2006). *Análisis De Sistemas Dinámicos Lineales*. Universidad Nacional de Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Eberle, R. A., Kaplan, D., & Montague, R. (1961). Hempel and Oppenheim on Explanation. *Philosophy of Science*, 28(4), 418–428. <http://doi.org/10.2307/185484>

Eschenhagen, M. L. (2007). Diversas consideraciones y aproximaciones a la noción de complejidad ambiental. *Gestión Y Desarrollo*, 10(4), 83–94.

Espinoza, M. (1995). René Thom: de la teoría de catástrofes a la metafísica. Retrieved from <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/27305>

Fajardo Ortiz, G., Fernández Ortega, M. Á., Ortiz Montalvo, A., & Olivares Santos, R. A. (2015). CIRUGÍA y CIRUJANOS La dimensión del paradigma de la complejidad en los sistemas de salud. *Cirugía Y Cirujanos*, 83(1), 81–86. <http://doi.org/10.1016/j.circir.2014.03.001>

Fariñas Balseiro, F. (2010). Caos: una breve revisión conceptual. *Encuentros Multidisciplinares*, 34, 1–9. Retrieved from [http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan?34/Fernando Fariñas Balseiro.pdf](http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan?34/Fernando+Fariñas+Balseiro.pdf)

Florez Valdivia, B. (2015). *COMPLEJIDAD Y TRANSDISCIPLINARIEDAD: HACIA UNA NUEVA RACIONALIDAD*. Universidad Veracruzana.

Fontenla, J. L. (1966). La Complejidad en la Biología. *COCUYO*, 13, 53. Retrieved from http://www.caribbeanahigroup.org/pdf/cocuyo/cocuyo_13_2003.pdf#page=49

Ford, A. (1999). *Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Systems* (1st ed., Vol. 1). United States: Islander press. Retrieved from

<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=E2KFeyGP4aQC&oi=fnd&pg=PR9&dq=modeling+the+environment+an+introduction+to+system+dynamics+modeling+of+environmental+systems&ots=s4ACRwtt5w&sig=wxvKPX7OvtXZMWopNQE0CKkAWTo>

French, J., Payo, A., Murray, B., Orford, J., Eliot, M., & Cowell, P. (2016). Appropriate complexity for the prediction of coastal and estuarine geomorphic behaviour at decadal to centennial scales. *Geomorphology*, 256, 3–16.
<http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.005>

Fry, R. L. (2002). The engineering of cybernetic systems. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 617, pp. 497–528). AIP. <http://doi.org/10.1063/1.1477068>

Galelea, J. (2007). El Paradigma de la Complejidad. *Revista Portuguesa de Filosofia*, 63, 407–426. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40419522>

Gámez Cámara, M. (1999). *MODELO DEPREDADOR-PRESA. APLICACIONES AL CONTROL BIOLÓGICO*. Universidad de Almería .

García, M. V. (2011). La Dialéctica de la complejidad en las organizaciones. *Revista de Psicología GEPU*, 2, 121–137.

García, R. (2006). Sistemas complejos, 1–200. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

García Velarde, M., & Fairen Le Lay, V. (1980). ESTRUCTURAS DISIPATIVAS ALGUNAS NOCIONES BÁSICAS. *El Basilisco*, 8–13.

García-Callejas, D., & Araújo, M. B. (2016). The effects of model and data complexity on predictions from species distributions models. *Ecological Modelling*, 326, 4–12.
<http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.002>

- Gay, A., & Ferreras, M. A. (1999). Capítulo V. Los Sistemas y El Enfoque Sistémico. In *Temas para Educación Tecnológica* (pp. 63–76). Córdoba: La obra.
- Gell-Mann, M. (1994). Complex Adaptive Systems. *SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XIX, XIX*, 17–45. http://doi.org/10.1007/3-540-26869-3_16
- Gestoso, I., Arenas, F., Rubal, M., Veiga, P., Peña, M., & Olabarria, C. (2013). Shifts from native to non-indigenous mussels: Enhanced habitat complexity and its effects on faunal assemblages. *Marine Environmental Research*, 90, 85–95. <http://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.05.015>
- Gilpin, M. (1979). Spiral chaos in a predator-prey model. *The American Naturalist*, 113, 306–308. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2460209>
- González, J. (2016). Mapas Iterativos y Caos.
- Green, J., Hastings, A., & Arzberger, P. (2005). Complexity in ecology and conservation: mathematical, statistical, and computational challenges. Retrieved from <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/55/6/501.short>
- Grifeu, A. (2014). *Pioneros de la tecnología digital: Ideas visionarias del mundo tecnológico actual* (1st ed.). Barcelona: UOC.
- Groffman, P. M., Baron, J. S., Blett, T., Gold, A. J., Goodman, I., Gunderson, L. H., ... Wiens, J. (2006). Ecological Thresholds: The Key to Successful Environmental Management or an Important Concept with No Practical Application? *Ecosystems*, 9(1), 1–13. <http://doi.org/10.1007/s10021-003-0142-z>
- Hall, A. D., & Fagen, R. E. (1956). Definition of a system. *General System*, 1(1), 18–28.

- Hammond, D. (2003). Ludwing Von Bertalanffy. In *The Science of Synthesis: Exploring the Social Implications of General Systems Theory* (1st ed., pp. 1–312). Colorado: University press of Colorado. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=TBvjCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=The+Science+of+Synthesis:+Exploring+the+Social+Implications+of+General+...+Escrito+por+Deborah+Hammond&ots=Ifj9vSVMtl&sig=r26v8-eRnmUWzW_eyaFO3-OBb5A
- Harré, M. S., Bossomaier, T., Gillett, A., & Snyder, A. (2011). The aggregate complexity of decisions in the game of Go. *Eur. Phys. J. B*. <http://doi.org/10.1140/epjb/e2011-10905-8>
- Hastings, A., Hom, C. L., Ellner, S., Turchin, P., & Godfray, H. C. J. (1989). Chaos in Ecology: Is Mother Nature a Strange Attractor? *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(1993), 160. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hatcher, M., & Tofts, C. (2004). Reductionism isn't functional. *Hewlett-Packard Technical Reports*. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/39156588/02e7e5224854007290000000.pdf>
- Hayles, N. (1991). Chaos and order: Complex dynamics in literature and science. In Katherine Hayles (Ed.), . Chicago and London : University of Chicago Press. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=iSkwMTXDSRcC&oi=fnd&pg=PP7&dq=Chaos+and+Order:+Complex+Dynamics+in+Literature+and+Science&ots=J30a6MpXBv&sig=KMoZM7hdmsx8AB159rckhvT0Brs>
- Hema, R. (1994). *Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling*. New York. Florida.
- Herrera J., R. (2007). Sistema lo sistémico en el pensamiento contemporaneo. *Ingeniería*, 17(11–

26).

Herrero Uribe, L. (2008). Del mecanicismo a la complejidad en la biología. *Revista de Biología Tropical*, 56(1), 399–407.

Hillier, F., Hillier, G., & Lieberman, G. (1989). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=092091>

Holdschlag, A., & Ratter, B. M. W. (2016). Caribbean island states in a social-ecological panarchy? Complexity theory, adaptability and environmental knowledge systems. *Anthropocene*, 13, 80–93. <http://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.03.002>

Holling, C. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390–405. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s10021-001-0101-5>

Izaurieta, F., & Saavedra, C. (2000). Redes neuronales artificiales. *Departamento de Física, Universidad de*. Retrieved from http://www.academia.edu/download/36957207/Redes_neuronales.pdf

Izquierdo, L. R., Ordax, J. M. G., Santos, J. I., & Martínez, R. D. O. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, 0(16), 85–112.

Jana, D., & Bairagi, N. (2014). Habitat complexity, dispersal and metapopulations: Macroscopic study of a predator-prey system. *Ecological Complexity*, 17(1), 131–139.

<http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.11.006>

Javier, F., & Rincón, M. (1997). EL ORDEN EN EL CAOS: UNA AMPLIACIÓN DEL MECANICISMO.

Jiménez, R. G. (2014). Teoría General De Sistemas Y Complejidad, 1–14.

Jochum, K., & Huettmann, F. (2010). Spatial Information Management in Wildlife Ecology: Adding Spatially Explicit Behaviour Data to the Equation? In *Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife Conservation* (pp. 175–191). Tokyo: Springer Japan.
http://doi.org/10.1007/978-4-431-87771-4_10

Johnson, H., & Vanjonack, W. (1976). Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals. *Journal of Dairy Science*, 59(9), 1603–1617. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203027684413X>

Keesling, J. (1988). Positive Feedback in Natural Systems (Donald L. DeAngelis, Wilfred M. Post, and Curtis C. Travis). *SIAM Review*, 30(2), 332–335. <http://doi.org/10.1137/1030072>

Kondepudi, D., & Prigogine, I. (2014). *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. (John Wiley & Sons, Ed.) (2nd ed.). Wiley. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=SPU8BQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA187&dq=MODERN+THERMODYNAMICS&ots=psMBm-pZCM&sig=iL3zFavdQcPYYgmo31AQcBy8Rjk>

Kubíček, M., & Marek, M. (1983). *Computational Methods in Bifurcation Theory and Dissipative Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-85957-1>

- Larranaga, P., Inza, I., & Moujahid, A. (1997). Tema 8. Redes Neuronales. *Redes Neuronales, U. Del P. Vasco*. Retrieved from <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t8neuronales.pdf>
- Larsen, L. G., Eppinga, M. B., Passalacqua, P., Getz, W. M., Rose, K. A., & Liang, M. (2016). Appropriate complexity landscape modeling. *Earth-Science Reviews, 160*, 111–130. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.016>
- Leff, E., & Funtowicz, silvio O. (2000). *La complejidad ambiental*. (2000 Siglo XXI, Ed.) (Ilustrada). Siglo xxi.
- Levin, S. a. (2005). Self-organization and the Emergence of Complexity in Ecological Systems. *BioScience, 55*(12), 1075. [http://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[1075:SATEOC\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[1075:SATEOC]2.0.CO;2)
- Lichtenstein, B. B., & Plowman, D. A. (2009). The leadership of emergence: A complex systems leadership theory of emergence at successive organizational levels. *Leadership Quarterly, 20*(4), 617–630. <http://doi.org/10.1016/j.leaqua.2009.04.006>
- Loaiza Ramírez, M. (2006). *Diseño y simulación de un criptosistema caótico para comunicaciones seguras*. Universidad de las Américas Puebla.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences, 20*(2), 130–141. [http://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)
- Lovelock, J. E. (1989). Geophysiology, the science of Gaia. *Reviews of Geophysics, 27*(2), 215. <http://doi.org/10.1029/RG027i002p00215>
- Lovelock, J., & Puig, M. (2007). *La venganza de la tierra: la teoría de Gaia y el futuro de la*

- humanidad*. Buenos Aires: Planeta. Retrieved from http://www.academia.edu/download/46044332/La_venganza_de_la_tierra_de_James_Lovelock.pdf
- Mackay, R. S. (2008). Nonlinearity in Complexity Science. *Publishing Ltd and London Mathematical Society*, 21, 273–281. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/21/12/T03/meta>
- Maldonado, C. E. (2009). Ingeniería de sistemas complejos Panorama y oportunidades. *Conferencias de La Tercera Asamblea de La Red Cartagena de Ingeniería, Colombia, Noviembre de 2009*, 1–12.
- Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. A. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos* (No. 0124–8219). Bogotá.
- Mamone, A., & Guadarrama, C. (2016). Complejidad, resiliencia y memoria. Aportes para la comprensión de un proceso integral de restauración ecológica en la Sierra de Santa Martha. *Proceedings Proceedings from* Retrieved from <http://www.global-diversity.org/wp-content/uploads/2016/02/PachecoAlejandraRoblesCarlos-COMBIOSERVE-ResilienciaVeracruzMexico.pdf>
- Manson, S. M. (2001). Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum*, 32(3), 405–414. [http://doi.org/10.1016/S0016-7185\(00\)00035-X](http://doi.org/10.1016/S0016-7185(00)00035-X)
- Marull, J., Font, C., Padró, R., Tello, E., & Panazzolo, A. (2016). Energy–Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agroecosystem processes (Barcelona Metropolitan Region, 1860–2000). *Ecological Indicators*, 66, 30–46. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.015>

- Matich, D. J. (2001). Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones. *Historia*, 55. Retrieved from <ftp://decsai.ugr.es/pub/usuarios/castro/Material-Redes-Neuronales/Libros/matich-redesneuronales.pdf>
- Maturana, H. R., & Varela, F. J. (2004). *De máquinas y seres vivos : autopoiesis : la organización de lo vivo*. Editorial Universitaria, Grupo Editorial Lumen.
- Mendoza Reyes, M. A. (1998). *Dinámica de las Neuronas de Integración y Disparo*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mercado-Molina, A. E., Ruiz-Diaz, C. P., & Sabat, A. M. (2016). Branching dynamics of transplanted colonies of the threatened coral *Acropora cervicornis*: Morphogenesis, complexity, and modeling. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 482, 134–141. <http://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.05.004>
- Miguélez, M. M. (2011). Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad. *Opción*, 27(65).
- Miramontes, O., & Federal, D. (2000). Orden y caos en la organización social de las hormigas, 32–40.
- Moncho, A. C. (2008). *MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS COMPLEJOS*. Publicaciones de la universitat de valencia.
- Monod, J. (1970). . *El azar y la necesidad*. Buenos Aires: Hyspamerica.
- Moreno Quintana, V., & Acuña Leiva, G. (2007). Estimación De Parámetros Utilizando Modelos De Caja Gris Con Redes Neuronales De Base Radial.
- Mori, H., & Kuramoto, Y. (1998). A Representative Example of Dissipative Structure. In *Dissipative Structures and Chaos* (pp. 5–20). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

http://doi.org/10.1007/978-3-642-80376-5_2

Moriello, S. (2003). Sistemas complejos, caos y vida artificial. *Red Científica*. Retrieved from www.pensamientocomplejo.com.ar

Morin, E. (1997). *Introducción al pensamiento complejo*. Valladolid. Barcelona: Gedisa. Retrieved from http://www.psi.uba.ar/academica/carrerasdegrado/psicologia/sitios_catedras/electivas/067_p_sico_preventiva/cursada/bibliografia/morin_introduccion_al_pensamiento_complejo.pdf

Morin, E. (2007). Complejidad Restringida y Complejidad Generalizada. *Praxis*, 38(38), 107–119.

Müller, K. (2013). Zur Kritik des Bertalanffy- Programms. In *Allgemeine Systemtheorie : Geschichte, Methodologie und sozialwissenschaftliche Heuristik eines Wissenschaftsprogramms* (pp. 243–252).

Munné, F. (1995). Las teorías de la complejidad y sus implicaciones en las ciencias del comportamiento. *Revista Interamericana de Psicología*, 1(29), 1–12. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Munné, F. (2005). ¿Qué es la complejidad? *Encuentros de Psicología Social*, 2–3. Retrieved from <http://www.teoriadacomplexidade.com.br/textos/teoriadacomplexidade/QueEsLaComplejidad.pdf>

Muradian, R. (2001). Ecological thresholds: a survey. *Ecological Economics*, 38, 7–24. Retrieved from www.elsevier.com/locate/ecocon

Nagle, R., Saff, E., & Snider, A. (2001). *Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera* (3rd ed.). Mexico: Pearson Educación. Retrieved from

https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=b5H99FCGe_EC&oi=fnd&pg=PA6&dq=Ecuaciones+diferenciales+y+problemas+con+valores+en+la+frontera&ots=DsIB4dLMtp&sig=s5_RhrImLfclft5ZXNaqxVBIEC8

Naranjo, F., Leiva, G., & Cubillos, F. (2010). APRENDIZAJE INDIRECTO CON RETROPROPAGACIÓN EN MODELO NEURONAL DE CAJA GRIS: APLICACIÓN A FERMENTACIÓN EN SUSTRATO. *Informatik.uni-Hamburg.de*. Retrieved from http://www2.informatik.uni-hamburg.de/~cruznaranjo/07_FCruz_et_al_2006_Brazil.pdf

Navarro López, E. M. (2010). La Naturaleza, Las Matemáticas, La Ingeniería Y El Caos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 18(1), 5–7. <http://doi.org/10.4067/S0718-33052010000100001>

Neuhauser, C. (2004). *Matemáticas para ciencias* (2nd ed.). Madrid: Pearson Education. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=APIw178ltvgC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Matem%C3%A1ticas+para+ciencias&ots=pY8NaIQDDD&sig=EI9Ci0THcdsEXBh4ECz7UwdviFk>

Noguera De Echeverri, A. P. (2007). Complejidad ambiental : propuestas éticas emergentes del pensamiento ambiental latinoamericano. *Gestión Y Ambiente*, 10(1), 5–30. Retrieved from <http://search.proquest.com/openview/251a6c6de541583f120170fa655c382d/1?pq-origsite=gscholar>

Obregón-neira, N. (2016). Sistemas Complejos , Geofísica e Ingeniería. *Pontificia Universidad Javeriana*, 1–4.

Odum, E. (1969). The strategy of ecosystem development. *Sustainability: Sustainability*, 1, 58–74.

- Oros Méndez, L. A. (2011). *LA SUBJETIVIDAD MEDIÁTICA ANTE UN CONTEXTO ISOMORFO EN LOS PROCESOS DE FORMACIÓN UNIVERSAL DEL INDIVIDUO, A TRAVÉS DE AMBIENTES VIRTUALES EN LAS INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO*. Centro de estudios universitarios de baja California.
- Palacio Gómez, C. A., & Ochoa Jaramillo, F. (2009). Complejidad : una introducción Complexity : an introduction. *Ciência & Saúde Coletiva*, 831–836.
- Pamela Delarue, E. M., Kerr, S. E., & Lee Rymer, T. (2015). Habitat complexity, environmental change and personality: A tropical perspective. *Behavioural Processes*. <http://doi.org/10.1016/j.beproc.2015.09.006>
- Pastor, J., & León, A. (2007). Complejidad y Psicología Social de las Organizaciones. *Psicothema*, 19, 212–217.
- Pérez, H. (1994). Generalización de un modelo determinístico para el análisis del crecimiento de organismos vivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28552>
- Perozo Guédez, N. (2011). *Modelado Multiagente Para Sistemas Emergentes Y Auto-Organizados*. LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Y LA UNIVERSIDAD PAUL SABATIER. Retrieved from <http://www.ing.ula.ve/~oteran/tesisPerozo.pdf>
- Pestana, J. V. (1999). FRACTALIDAD Y COMPORTAMIENTO PSICOSOCIAL. In *FRACTALIDAD Y COMPORTAMIENTO PSICOSOCIAL* (pp. 1–23).
- Philip, A. (1999). Complexity theory and organization science. *Organization Science*, 10(3), 216–

232. http://doi.org/10.1207/s15327000em0101_2

Phillips, D. (1969). Systems theory—a discredited philosophy. *Abacus*. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-6281.1969.tb00157.x/abstract>

Pire, B. (2016). Encyclopædia Universalis [en ligne]. Retrieved September 24, 2016, from <http://www.universalis.fr/encyclopedie/stabilite-structurelle-et-morphogenese/>

Poston, T., & Stewart, I. (2014). *Catastrophe theory and its applications*. New York: Dover Publication . Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lvDMAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Catastrophe+Theory+and+its+applications&ots=bJhpEOivw2&sig=acCJD7XotjOA7FbHhaTbW4nHw3A>

Prigogine, I. (1977). TIME, STRUCTURE AND FLUCTUATIONS. In *TIME, STRUCTURE AND FLUCTUATIONS*.

Prigogine, I., & Stengers, I. (1997). *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia*. España: Alianza Editorial.

Proctor, J., & Larson, B. (2005). Ecology, complexity, and metaphor. *BioScience*. Retrieved from <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/55/12/1065.short>

Puchol Moreno, L. (2012). *Dirección y gestión de recursos humanos. 7a edic.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=ZlgZPthdssQC&oi=fnd&pg=PR17&dq=dir eccion+y+gestion+de+recursos+humanos+7a+edicion&ots=v-44tCaIHf&sig=-K9QCRsfTFOxOqm12mQWqBTsvCU>

- Ramírez, S. (1999). *Perspectivas en las teorías de sistemas*. UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades.
- Rao, R., Olshausen, B., & Lewicki, M. (2002). Probabilistic models of the brain: Perception and neural function. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=mzBlvComcqwC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Probabilistic+Models+of+the+Brain:+Perception+and+Neural+Function&ots=rnY8Bezwwi&sig=s3R1UI_3_R0Vxi1i3lExHoub_e8
- Reynoso, C. (2007). Edgar Morin y la complejidad: elementos para una crítica. *Universidad de Buenos Aires*. Retrieved from <http://carlosreynoso.com.ar/archivos/carlos-reynoso-edgar-morin-y-la-complejidad-elementos-para-una-critica-2008.pdf>
- Rocchini, D., Petras, V., Petrasova, A., Chemin, Y., Ricotta, C., Frigeri, A., ... Neteler, M. (2015). Spatio-ecological complexity measures in GRASS GIS. *Computers and Geosciences*. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.006>
- Rodríguez, E. C. (2012). Gaia: de la ecología clásica a la ecología profunda. *Revista Colombiana de Bioética*, 7(2), 34–51.
- Rodríguez, M., & Torres, N. (2003). Autopoiesis, the unity of a difference: Luhmann and Maturana. *Sociologías*. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-45222003000100005&script=sci_arttext&tlng=eses
- Romanelli, L. (2006). Teoría del caos en los sistemas biológicos. *Revista Argentina de Cardiología*, 74(30), 478–482. <http://doi.org/10.4067/S0718-09342002005100014>
- Romero, R. F., Castro, J., & Arias Velandia, N. (2009). Comunicación , lenguaje y educación : una

- mirada desde las teorías de la complejidad Communication , language and education : a look from the theories of complexity. *Folios*, 25–38.
- Roopnarine, P. D. (2008). Catastrophe Theory. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 531–536). <http://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00146-4>
- Ross Ashby, W. (1957). *An introduction to cybernetics* (Second). London: Champan & Hall LTD. <http://doi.org/10.2307/3006723>
- Ruelle, D. (1990). The Claude Bernard Lecture, 1989. Deterministic Chaos: The Science and the Fiction. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 427(1873), 241–248. <http://doi.org/10.1098/rspa.1990.0010>
- Salas, R. (2004). Redes Neuronales Artificiales. *Universidad de Valparaiso. Departamento de*. Retrieved from http://www.academia.edu/download/37429671/Redes_Neuronales_Artificiales.pdf
- Sametband, M. J. (1999). *Título : ENTRE EL ORDEN Y EL CAOS. LA COMPLEJIDAD*. México: Fondo De Cultura Económica.
- Sanchez Santillan, N., & Garduño Lopez, R. (2007). El clima, la ecología y el caos desde la perspectiva de la teoría general de sistemas. *Ingeniería Investigación Y Tecnología VIII*, 8(3), 183–195.
- Sanjuán, M. A. F. (2007). La física al encuentro de la complejidad. *Arbor Ciencia Pensamiento Y Cultura*, 889–898.
- Santos, L. (1990). Teoría de las catástrofes. *Política Y Sociedad*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=154310&orden=1&info=link>

- Schneider, S. H. (2004). Clarifying GAIA: Regulation with or without natural regulation. In *Scientists debate Gaia : the next century* (p. 377). USA: MIT Press.
- Schrödinger, E. (1944). *what is life?* (1st ed.). USA: Cambridge University Press.
- Serrano de Entrambasaguas, G. (1976). *Bases de datos (una concepción de sistemas de información)*. España: Servicio de publicaciones del ministerio de educación y ciencia. Retrieved from [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=G1IBCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=Bases+de+datos+\(una+concepci%C3%B3n+de+sistemas+de+informaci%C3%B3n\)&ots=nIt6m1BXN7&sig=htju9jZxnOoaAvqKds3lBVfCxU](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=G1IBCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=Bases+de+datos+(una+concepci%C3%B3n+de+sistemas+de+informaci%C3%B3n)&ots=nIt6m1BXN7&sig=htju9jZxnOoaAvqKds3lBVfCxU)
- Shalizi, C. (2005). *Modeling Complex Systems. Physics Today* (Vol. 58). <http://doi.org/10.1063/1.1897528>
- Shukla, P. (2008). Towards a common thread in Complexity: an accuracy-based approach. *Journal of Physics: Mathematican and Theorical*, 1–18. <http://doi.org/10.1088/1751-8113/41/30/304023>
- Skyttner, L. (2001). the future of systems theory. In *General Systems Theory: Ideas & Applications* (p. 425). Singapore: World Scientific. Retrieved from http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789812384850_fmatter
- Sokal, A. (2009). *Más allá de las imposturas intelectuales. Ciencia, filosofía y cultura*. Retrieved from http://www.academia.edu/download/42719643/Prats__J._2019._Mas_alla_de_las_imposturas_intelectuales.pdf

- Solaz portolés, J. J. (2011). UN POCO MÁS SOBRE LA TEORÍA DEL CAOS Y LOS FRACTALES. *ALEPH ZERO COMPRENDAMOS*, 17–19. Retrieved from <http://www.comprendamos.org/alephzero/62/aleph62.pdf#page=17>
- Stevenson, M., & Leonard, R. (2008). Introduccion a la Teoria de la Probabilidad. *Australian and New Zealand Journal of*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14434318.2008.11432793>
- Tarride, M. (1995). Complejidad y sistemas complejos. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/%0D/hcsm/v2n1/a04v2n1.pdf>
- Thom, R. (1974). Stabilité structurelle et morphogenese. *Poetics*, 10(C), 7–19. [http://doi.org/10.1016/0304-422X\(74\)90010-2](http://doi.org/10.1016/0304-422X(74)90010-2)
- Ungar, P., & Strand, R. (2005). Complejidad: una reflexión desde la ciencia de la conservación. *Nómadas*, (22), 36–46.
- Urban, A. E. (1968). Orígenes de la teoría de sistemas.
- Urban, E. A. (2003). *AO REDOR DOS SISTEMAS*. Universidade Federal do Paraná. Retrieved from <http://www.inf.ufpr.br/urban/Anteriores/2014-2/LeiturasRecomendadas/TeoriaDeSistemas/TS-AUrban-dissertacao.pdf>
- Valdéz Cepeda, R. D., & Olivares Sáenz, E. (1998). Geometría fractal en la ciencia del suelo. *Terra*, 16(3), 277–288.
- Volk, T. (2002). Toward a Future for Gaia Theory. *Climatic Change*, 52(4), 423–430. <http://doi.org/10.1023/A:1014218227825>
- Xepapadeas, A. (2010). Modeling complex systems. *Agricultural Economics*, 41(SUPPL. 1), 181–

191. <http://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2010.00499.x>

Yates, P. M., Heupel, M. R., Tobin, A. J., & Simpfendorfer, C. A. (2015). Ecological drivers of shark distributions along a tropical coastline. *PLoS ONE*, *10*(4), 1–18. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0121346>

Yu, F., Wang, T., Groen, T. A., Skidmore, A. K., Yang, X., Geng, Y., & Ma, K. (2015). Multi-scale comparison of topographic complexity indices in relation to plant species richness. *Ecological Complexity*, *22*, 93–101. <http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2015.02.007>

Zellmer, A. J., Allen, T. F. H., & Kesseboehmer, K. (2006). The nature of ecological complexity: A protocol for building the narrative. *Ecological Complexity*, *3*(3), 171–182. <http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2006.06.002>

Zhao, S., Jakob, W., Marschner, S., & Bala, K. (2011). Building volumetric appearance models of fabric using micro CT imaging. In *ACM SIGGRAPH 2011 papers on - SIGGRAPH '11* (p. 1). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/1964921.1964939>