

Estudios interdisciplinarios de la complejidad

Jasmidt Vera Cuenca¹

jasmidt.vera@usco.edu.co

Mauro Montealegre Cárdenas²

mmonteal@usco.edu.co

Gustavo Londoño Betancourth³

glondono@usco.edu.co

Resumen

El sistema educativo colombiano, en todos los niveles, ha sido dominado por el ejercicio de las disciplinas fragmentadas con métodos reduccionistas, descontextualizados y poco pertinentes, en contravía del ejercicio de la solución de problemas que plantean las ciencias y la cotidianidad, que para su tratamiento también requieren connaturalmente de pedagogías enfocadas desde las ciencias de la complejidad, y abordados interdisciplinariamente. Para avanzar en la superación de este problema, que es determinante para el bienestar de nuestra sociedad, nos vinculamos con las características del paradigma de la complejidad: no linealidad, resonancias, teoría del caos, creatividad generada por estructuras disipativas lejos del equilibrio y complejidad emergente.

¹Jasmidt Vera Cuenca, doctorante en Pensamiento Complejo, Multiversidad Mundo Real Edgar Morin; grupo DINUSCO, universidad Surcolombiana

²Mauro Montealegre Cárdenas, PhD en Matemática Aplicada; coordinador de la maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad, universidad Surcolombiana; grupo DINUSCO, universidad Surcolombiana.

³Gustavo Londoño Betancourth, jefe de programa Matemática Aplicada, universidad Surcolombiana; grupo DINUSCO, universidad Surcolombiana.

Introducción

En este siglo XXI el concepto de complejidad se ha integrado prácticamente en todos los ámbitos del quehacer humano y de sus organizaciones, con versiones como Pensamiento Complejo, Ciencia de la Complejidad y Sistemas complejos. En particular en el contexto educativo su intervención se conoce como el paradigma de la complejidad, debido sus enfoques y métodos para resolver problemas teóricos-prácticos de Morin (Morin, El diseño y designio complejos, 1994), Lipman (Lipman, 1998), Fullan (Fullan, 2002), Mason (Mason, 2008), Davis y Sumara (Davis & Sumara, Complexity and education: Inquiries into learning, teaching, and research, 2014) y Maldonado (Maldonado, Termonidámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales, 2011).

Estas aproximaciones, si bien están relacionados entre sí, poseen significados y matices diferentes. En particular las Ciencias de la Complejidad se caracteriza por generación de estructuras lejos del equilibrio, explicadas por los principios de indeterminación, incerteza, inestabilidad junto con la irreversibilidad de los procesos, que interviene no sólo a las Ciencias Naturales, sino también a las Ciencias Sociales, en particular en las Ciencias de la Educación.

Según Edgar Morin (Morin, 1999) el pensamiento complejo se fundamenta en siete principios básicos, considerándolos como complementarios e interdependientes:

- a. Principio sistémico u organizacional;
- b. Holográfico que incide en que las partes están dentro del todo y el todo está en cada parte;
- c. El principio retroactivo que refleja cómo una causa actúa sobre un efecto y, a su vez, éste sobre la causa;
- d. El principio recursivo que supera la noción de regulación al incluir el de auto-producción y auto-organización;
- e. El principio de autonomía y dependencia en el que expresa la autonomía de los seres humanos pero, a la vez, su dependencia con respecto al medio;

f. El principio dialógico que integra lo antagónico como complementario;

g. El principio de la reintroducción del sujeto que introduce la incertidumbre en la elaboración del conocimiento que pone en relieve que todo conocimiento es una construcción de la mente.

A continuación realizamos aproximaciones a las diversas vertientes que están construyendo este paradigma de la postmodernidad, como un resurgir del pensamiento de Heráclito, continuado por Da Vinci, Blas Pascal, Copérnico y Galileo.

2. Henry Poincaré, no linealidad y resonancias.

2.1. Relevancia de la no-linealidad.

Gracias al concepto de no-linealidad, cuya relevancia ya fue reconocida por Henry Poincaré (Poincaré, 1981), hoy tenemos el conocimiento científico para viajar a la luna y volver, para describir procesos metabólicos coordinados para mantener una célula viva, o para gestionar un ecosistema en estado de estabilidad prolongada. Del reconocimiento de la no-linealidad se sabe que el régimen dinámico complejo es favorecido por la adaptación evolutiva y la dinámica caótica.

Ha habido enormes avances metodológicos en la comprensión, predicción y control del comportamiento de los sistemas físico-químicos, con respecto a las técnicas analíticas lineales abordando los sistemas no lineales, los cuales no obedecen al principio de superposición; es lo que se observa considerando un péndulo simple versus péndulos acoplados, el diagrama de fases de la primera describe una trayectoria ordenada a través del espacio de fase, ya sea en la presencia o ausencia de fricción, mientras que el diagrama de fase de un péndulo acoplado pueden ser realmente caóticos.

2.2. Sistemas inestables y las resonancias.

El concepto de resonancia es bastante familiar en Física, pero es preciso comprender el contexto

en el cual se presenta y por el cual se le denomina resonancias de Poincaré (Poincaré, 1981); concepto que surgió de una pregunta acerca de la estabilidad del sistema solar y abrió el camino para tratar los problemas de estabilidad en sistemas dinámicos. El fondo de todo este asunto es la confrontación entre estabilidad e inestabilidad, y, consecuentemente, del límite a la predictibilidad, de saber si el universo se rige por leyes deterministas o no.

En un universo inestable tal tipo de predicción determinista es imposible y sus procesos irreversibles no pueden ser considerados como meras aproximaciones a las leyes fundamentales sino que existen realmente y son los más importantes en la naturaleza.

2.3. Sistemas Dinámicos.

Durante el siglo XX, la comunidad de los científicos que utilizan los sistemas dinámicos para modelar fenómenos naturales de la cibernética y la teoría general de sistemas ramifica esta teoría, en la actualidad una de esas corrientes es llamada teoría de sistemas dinámicos complejos, o en la versión de Dinámica de Sistemas. Los sistemas dinámicos se presentan en cuatro clases diferentes, a saber:

- a. Flujos en tiempo continuo de sistemas dinámicos autónomos;
- b. Las iteraciones, en tiempo discreto o cascadas de sistemas dinámicos discretos;
- c. Los sistemas dinámicos simbólicos;
- d. Sistemas dinámicos irreversibles.

La mayoría de sus trayectorias se acumulan en un conjunto dinámico llamado un atractor, sus fronteras pueden ser puntos en una dimensión, curvas en dos dimensiones, las superficies en tres dimensiones.

Los sistemas dinámicos modelan la evolución mediante modelos matemáticos con geometrías correspondientes con la naturaleza, como los fractales. Tales sistemas suelen tener algunos parámetros de control y coeficientes variables. Un Sistema Dinámico con controles se llama una

familia parametrizada de los sistemas dinámicos. Si los controles varían suavemente, entonces los retratos fases pueden sufrir cambios radicales, tal al evento se denomina una bifurcación. Las bifurcaciones son sin duda las características más importantes y la localización de ellos suele ser un trabajo difícil. Se podría iniciar un estudio de bifurcaciones analizando algunos casos, los ejemplos simples se dividen en tres categorías:

- a. Las bifurcaciones sutiles, en que el cambio no es inmediato y sorprendente,
- b. Las bifurcaciones catastróficas, en las que una cuenca de repente aparece o desaparece,
- c. Las bifurcaciones explosivas, donde un atractor de repente se expande o contrae.

2.4. Los sistemas dinámicos complejos.

El significado de complejo en este contexto se refieren al realismo del modelo y la no predicabilidad de las soluciones, por ejemplo, los modelos que se apoyan en redes neuronales, autómatas celulares o percolaciones, para describir biología matemática, la economía, ecología o ciencias de la atmósfera, entre otros análogos, como es descrito de H. V. Bertalanffy (Von Bertalanffy & Sutherland, 1974).

Los sistemas dinámicos complejos, por su naturaleza de sistemas abiertos, dan cuenta de la irreversibilidad y la evolución, lo que los acerca a las ciencias humanas y da origen a un modelo de cognición más cercana a las causas físicas del modelo computacional; John Von Neumann (Von Neumann, 2012) los describe desde los siguientes aspectos:

a. Los antecedentes.

Teorías de sistemas dinámicos complejos se han elaborado desde la antigüedad, Lucrecio discípulo de Epicuro, anticipó una *teoría del todo*, que se desarrolló sobre la base de sus postulados acerca de la existencia de átomos y vacío, representando la idea de que el todo es infinito; en un esfuerzo por armonizar el dinamismo atómico, cuyos acoplamientos le permiten explicar tanto la vida como las libertades humanas, así como la idea

de selección natural, anticipando a Darwin en la definición del "*concepto de evolución*".

El poeta Paul Valery contribuyó también a la teoría de los sistemas dinámicos, como resalta el matemático Rene Thom (René, 1983), al descubrir la audaz relación entre *ciencia y arte* que Valery pudo construir dejando un legado solo comparable al de Leonardo, Goethe o Pascal.

b. Resonancias y emergencias sistémicas.

Como lo mencionamos arriba, partiendo de una pregunta acerca de la estabilidad del sistema solar, Henri Poincaré abrió el camino para tratar los problemas de inestabilidad de sistemas dinámicos complejos invalidando de la metáfora del demonio de Laplace, "*es capaz de predecir el futuro siempre que conozca el estado presente del universo con el suficiente grado de precisión*", y entrego un universo inestable, donde la predicción determinista es imposible. En efecto, el universo en el cual vivimos realmente es un universo inestable, irreversible y, por tanto, asociado la flecha de tiempo. Es de sentido común que el pasado no puede disolverse como si no hubiera existido, sino que determina irreversiblemente el presente que estamos viviendo.

c. Sistemas dinámicos y la teoría cognitiva.

Entre los años ochenta y principios de los noventa, existían sólo dos grandes posturas respecto a la cognición: una era la simbólica computacional basada en la linealidad y reversibilidad de los procesos, la otra más reciente era la conexionista en la que el procesamiento es paralelo y el símbolo es reemplazado por la representación.

Una de las mayores críticas hacia la postura dinamicista de la cognición es respecto a la construcción de modelos, si bien en otras áreas los modelos dinámicos pueden ser eficientes, al momento de modelar la cognición caen en la ambigüedad de denominar modelos claramente conexionistas como ejemplos de

sistemas dinámicos alejados del conexionismo y simbolismo, es lo que Kuhn señala como la existencia de "*un grado de inconmensurabilidad entre los distintos modelos y de lo problemático que resulta llevar el principio de la acumulación más allá de un determinado campo*" (Kuhn, 2013). Es así que el forzar la aparición de un modelo que tenga relación con estructuras ya dadas y ser cuestionada por tener similitudes con esas estructuras, se verifica que: "*La ciencia normal conduce sólo, en último análisis, al reconocimiento de anomalías y crisis*" (Kuhn, 2013).

3. Sistemas disipativos

El término *estructura disipativa* busca representar la asociación de las ideas de orden con la disipación de energía y de materia que evolucionan hacia el desorden, y se convierten lejos del equilibrio en una fuente de nuevo orden.

3.1. Ilya Prigogine: entre ciencias naturales y ciencias sociales.

Las *estructuras disipativas* constituyen la aparición de estructuras coherentes, auto-organizadas en sistemas alejados del equilibrio. Se asocian a Ilya Prigogine, quien recibió el Premio Nobel de Química por su gran contribución a la acertada extensión de la teoría termodinámica a sistemas alejados del equilibrio, que sólo pueden existir en conjunción con su entorno.

En efecto, Ilya Prigogine en uno de sus más célebres libros, *¿Tan sólo una ilusión?*, que consta de una antología de diez ensayos elaborados entre 1972 y 1982, en los que el autor habla con especial ahínco sobre este nuevo estado de la materia, las estructuras disipativas, asegurando que con estos novedosos conceptos se abre un «*nuevo diálogo entre el hombre y la naturaleza*» (Prigogine I. , 1993). Estas estructuras ordenadas son esencialmente las siguientes: se desarrollan muy lejos del equilibrio, es decir, son fenómenos fuertemente irreversibles, por tanto, fuertemente disipativos de energía o materia. A causa de esta fuerte disipación, que tienen que compensar para poder mantenerse, estas estructuras sólo aparecen

en sistemas que intercambian materia y/o energía con su entorno, es decir, en sistemas abiertos. Evidentemente, la descripción de estas estructuras para sistemas aislados se explica por el Segundo Principio de la Termodinámica por la paradoja de un «*diablillo de Maxwell*». Pero esta evidencia y el entendimiento del segundo principio de la termodinámica como crecimiento de la entropía han tardado muchos años en imponerse.

Un buen ejemplo de sistema auto-organizado es el llamado oscilador no lineal de Van der Pol, para el que el coeficiente de rozamiento depende de la amplitud de oscilación, de tal manera que cuando ésta es menor que la unidad, el oscilador está amplificado y absorbe energía, y cuando es mayor que la unidad está amortiguado y disipa energía. El balance total absorción-disipación durante un período es nulo, con lo que el sistema empieza a oscilar espontáneamente, sosteniéndose y estabilizándose, es un continuo balance entre absorción y disipación de energía. Tal oscilador procede del estudio de circuitos electrotécnicos y ha sido por muchos años el paradigma en la teoría matemática de los fenómenos no lineales.

El problema de la emergencia es que su aparición tiene que ver con el grado de apertura del sistema y, en esa medida, muchas veces es indeterminable, no obstante está regido por las leyes de la complejidad. Es una forma de pensar la ciencia, un cambio de paradigma que I. Prigogine define como la física del no equilibrio y sus postulados principales son:

a. Los procesos irreversibles, asociados a la flecha de tiempo, son tan reales como los procesos reversibles descritos por las leyes tradicionales de la física.

b. Los procesos irreversibles desempeñan un papel constructivo en la naturaleza.

c. Así, la irreversibilidad crea nuevas formas de coherencia.

3.2. Humberto Maturana y Francisco Varela: El paradigma autopoiético.

Nuestra propia estructura generaba restricciones para el tipo de observaciones que éramos capaces de hacer. Esta estructura incluyó desde restricciones impuestas por nuestra propia corporalidad hasta restricciones impuestas por el lenguaje, su estructura gramatical, las limitaciones del proceso representacional, los intereses culturales específicos. Invaluable fue la contribución de dos neurobiólogos chilenos: Humberto Maturana y Francisco Varela quienes, interesados particularmente en la auto-organización de los seres vivos, desarrollaron el concepto de autopoiesis⁴.

La célula puede entenderse como un sistema dinámico ya que la capacidad de una célula de cambiar en el espacio y en el tiempo es crucial para la supervivencia y para la reproducción, de hecho, las características dinámicas de una célula están implícitas en la topología de las redes de la proteína que son la base de la fisiología de la célula.

Dentro de la Teoría de Sistemas Dinámicos Complejos el modelo Autopoiético es de gran importancia y da apertura de nuevos campos del conocimiento, para comprender los sistemas que viven como entidades relativamente autónomas y auto-organizadas. Estos sistemas crean, dentro de ciertas constricciones sus propias condiciones de existencia, un dominio y entornos de significación y determinación específico. Estos sistemas existen sólo en virtud de un entorno, como extensión externa y resultado de secuencias de acción, como el contexto construido y seleccionado por el propio sistema para su desarrollo y devenir futuro posible, (Maturana H. , La pedagogía de la esperanza, 2007).

La auto-organización consiste en la propiedad de los sistemas vivos de evolucionar hacia relaciones continuadas en el tiempo, construyendo una regularidad estadística. Mediante un cerramiento operacional, que es un bucle, los

⁴Entendida como la organización de los seres vivos.

sistemas organizan una complejidad interna, su propio frente interior, reduciendo y simplificando la complejidad externa, que es siempre mayor. Las formas se generan precisamente desde esta operatoria, desde una *relacionalidad* constituyente, por ejemplo, la membrana celular es el primer cerramiento orgánico del que tenemos noticia. A la vez que delimita un espacio interno, tiene aperturas constantes con el exterior que ha creado, para el intercambio químico y biológico. El bucle es la operación necesaria para la constitución del endodermo y el ectodermo, base inicial de la constitución morfológica del embrión.

Como los fractales, esto es los patrones geométricos que se repiten a distintas escalas, el propio sistema puede replicarse dentro de sí mismo, esto es autocopiarse. El sistema puede constituirse como un entorno para sí mismo, el todo puede replicarse en la parte. Existe la posibilidad de que cada elemento del sistema incorpore la totalidad, de modo que pueda existir un movimiento inverso de desdoblamiento por el que el todo se reconstruya desde la parte. La replicación recreativa dentro del sistema es un hecho que puede observarse muy a menudo también en la administración del poder y el control de las instituciones y organizaciones. Las culturas organizacionales se explican, se reinventan a sí mismas continuamente. Los sistemas autopoieticos pueden auto-contemplarse, aunque no de forma completa, actuar sobre sí mismos y monitorizarse gracias a su recursividad.

Una de las posibilidades de la recursividad es la reflexividad. La particularidad de los sistemas socioculturales es que pueden y son accesibles a sí mismos por medio de la comunicación y el discurso. La reflexividad, la auto-descripción, la interpretación, permiten manejar las diferencias entre sistema y entorno de varias maneras y desde distintas perspectivas, y han de ser incluidas en la medida en que son constitutivas de los propios procesos que las producen.

3.3. La cibernética de segundo orden.

El interés de los cibernetas por diseñar máquinas, se expandió para incluir un nuevo objetivo, entender "máquinas" o sistemas, (Wiener, 1985) que nosotros formamos como integrantes de sistemas sociales, es decir, sistemas auto-organizadores, no necesariamente vivientes, por ejemplo: estrellas, remolinos; aunque los sistemas vivientes son auto-organizadores por antonomasia. El interés por los sistemas auto-organizadores conduce a una atención cada vez mayor sobre dos nociones: *la de autonomía*, el hecho de estar estos sistemas regidos por sus propias leyes, y la de *auto-referencia*, una operación lógica por la cual una operación se toma a sí misma como objeto, como sucede por ejemplo cuando hablamos del lenguaje, pensamos el pensamiento, o somos conscientes de nuestra conciencia, (Von Foerster, Las semillas de la cibernética: obras escogidas, 2006).

Surgen así las nociones centrales de la cibernética de segundo orden, aprender a desaprender: *circularidad, información, retroalimentación, meta, regulación*; así como nociones conexas que habían sido incorporadas a la red conceptual de esta disciplina: orden, organización, azar, ruido; las cuales comenzaron a usarse para la comprensión de sistemas auto-organizadores, biológicos y sociales, con especial atención a su autonomía y a los fenómenos de auto-referencia implicados.

El efecto de la inclusión del sujeto observador y el desvío de la atención de las nociones a los usuarios transformó a la cibernética en una epistemología, una disciplina que tenía algo que decir no solamente sobre la estructura ontológica de la realidad sino sobre el conocimiento de esa realidad, sus límites y posibilidades, sus dificultades y condicionamientos. (Von Foerster, Mead, & Teuber, 1951), siendo conceptos de segundo orden aquellos que, como mencionamos anteriormente, tienen capacidad autorreferencial y autológica. La cibernética se volvía sobre sí misma y usaba sus conceptos para ver a los usuarios de dichos conceptos y la relación que a través de esos conceptos establecían con su entorno.

3.4. Sistemas emergentes

Steven Johnson (Johnson & Ferré, 2003) llama *Sistemas emergentes* aquellos que surgen por inteligencia compartida que explican los isomorfismos entre las organizaciones comunitarias de vida urbana de las grandes ciudades y la que comparten las comunidades de las hormigas, las cuales sirven de modelos para nuevos algoritmos computacionales para resolver esta nueva clase de problemas de *inteligencia compartida*.

3.5. Sistemas adaptativos complejos.

John Hillend Holland, (Holland, 2004) se preguntó cómo logra la naturaleza crear seres cada vez más perfectos. Lo curioso era que todo se lleva a cabo a base de interacciones locales entre individuos, o entre estos y lo que les rodea. No sabía la respuesta, pero tenía una cierta idea de cómo hallarla: tratando de hacer pequeños modelos de la naturaleza, que tuvieran alguna de sus características, y ver cómo funcionaban, para luego extrapolar sus conclusiones a la totalidad.

Fue a principios de los sesenta, en la Universidad de Michigan, con el grupo *Logic of Computers* sus ideas comenzaron a desarrollarse y a dar frutos. Además, leyendo un libro escrito por un biólogo evolucionista R. A. Fisher, titulado *La teoría genética de la selección natural*, comenzó a descubrir los medios de llevar a cabo sus propósitos de comprensión de la naturaleza. De ese libro aprendió que *la evolución era una forma de adaptación más potente que el aprendizaje simple*, y tomó la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar programas bien adaptados con un fin determinado. Cuando Holland se enfrentó a los *algoritmos genéticos*, los objetivos de su investigación fueron dos: imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales, y diseñar sistemas artificiales que retengan los mecanismos importantes de los sistemas naturales, también son descritos por J. L. Monod (Monod, 1988) y con una presentación contextualizada en el campo de la genética por Eugenio Andrade, (Andrade, 2003).

3.6. Complejidad emergente desde el enfoque de Niklas Luhmann.

El esquema de la teoría de N. Luhmann puede sintetizarse en una mirada compleja en tres dimensiones:

- a. *La real u objetiva, referida a los objetos.*
- b. *La social a los sujetos.*
- c. *La temporalidad del tiempo.*

Estas dimensiones de la complejidad son, a su vez, dimensiones de sentido. Mirada que se conoce a partir de la diferencia, asimismo considerando las otras posibilidades, la contingencia de lo social y la resonancia entre subsistemas. Descubre que en lugar de estar en el mejor de los mundos, nos encontramos en un mundo pleno de mejores posibilidades, un mundo en el que es necesario confiar en informaciones, conocimientos y actitudes de otros.

En la primacía de *la función sobre la estructura*, la función consiste en la comprensión y reducción de la complejidad. Según N. Luhmann, (Luhmann & López, 1984), la complejidad es: *“La complejidad no es, entonces, sólo la cantidad de las relaciones estructuralmente posibles, sino su selectividad; tampoco es sólo un conjunto de conocimientos entre las variables tamaño y su estructurabilidad, sino la relación entre determinación positiva del tamaño y la determinación negativa del efecto de eliminación de la estructura.* En cuanto, unidad de su sistema, la complejidad en sí misma es de naturaleza relacional. Se puede hablar de mayor complejidad, en referencia a los sistemas, cuando aumenta la selectividad de las relaciones posibles de acuerdo con el tamaño y la estructura del sistema.”

Propone la construcción de un pensamiento interdisciplinario desde las ciencias sociales, entendido éste como la transformación de los objetos de conocimiento e investigación en áreas conexas. La realidad como un proceso de *auto-construcción, auto-producción, auto-organización y autopoiesis*, que se caracteriza por:

a. **Auto-organización** quiere decir construcción de estructuras propias dentro del sistema. Como los sistemas están clausurados en su operación no pueden importar estructuras. Ellos mismos deben construirlas.

b. Por **autopoiesis** se entiende como la característica que tienen los sistemas sociales y psíquicos de generar los elementos que los componen. La autopoiesis, significa determinación del estado siguiente del sistema, a partir de la limitación anterior a la que llegó la operación. Es *dirección interna* que hace posible la autorreproducción.

c. **Concepto de código**, todos los conceptos se clarifican como momentos de distinciones, como señales de reconocimiento de diferencias y como puntos de partida para abrir y ejecutar opciones ulteriores”

N. Luhmann percibe **Las competencias** como sistema complejo que han de posibilitar la comprensión de los vínculos, los contextos y los procesos dinámicos complejos. Por tanto, la estrategia es la síntesis y la contextualización, las cuales se concentran en los principios esenciales no en las partes, en las pautas perceptuales irreductibles: el todo es más que la suma de las partes, en patrones perceptuales integrados y en conjuntos organizados dotados de significado, (Chomsky, 1989), (Godino, 2003), (Scheiner, 2018)

Las competencias como sistema complejo son, pues, una totalidad integrada cuyas propiedades no pueden ser reducidas a suma de sus partes, son propiedades del conjunto, que ninguna de las partes tiene por sí sola.

En consecuencia, el propósito de *formar competencias* en la educación superior supone un cambio de método en los procesos de aprendizaje:

- a. Análisis, el cual sirve para conocer descomponiendo en partes,
- b. La síntesis que posibilita la comprensión al dar cuenta de la composición del todo.
- c. De la inducción – deducción- *Abducción*, El

inicio de la investigación es siempre la abducción. Es la hipótesis la que indica qué experimentos hay que hacer, adónde hay que mirar, (De Saussure, y otros, 1987) (Pierce, 2008). Proceso para la construcción del conocimiento de los símbolos, la semiótica, que se debe promover en las actividades didácticas interdisciplinarias.

Enseñar para formar en competencias y dejar que ellas sean aprendidas supone plantear una nueva visión del conocimiento que se enseña de las esencias: “es”, a las relaciones: “y”, “entre”; del conocimiento racional, a un conocimiento articulando la sensibilidad, la razón y la imaginación.

En esta dirección (Deleuze, Guattari, & Kauffmann, 2001), como herederos del pensamiento de Hume, afirman que: “la sensibilidad recibe información proveniente de las impresiones; la razón manipula datos y orienta la conducta; y la imaginación relaciona y crea ideas propias; continúa diciendo: “*para que la experiencia se organice es preciso creer en las asociaciones que hace la imaginación y además esperar que lo que creemos se repita, lo cual implica el hábito*”.

3.7. Aventuras en lo simple y lo complejo.

Como lo plantea el premio nobel de física Murray Gell-Man “*Es un nuevo reto de la física y la matemática que mantiene expectantes a los estudiosos de las disciplinas como la biología, la economía, la arquitectura, el arte y la psicología*” (Gell-Man, 1995), soportado el universo cuántico como marco teórico para diversidad y sostenibilidad en una visión humana, ya planteada por Schrödinger (Schrödinger, 1998) de las estructuras adaptativas en las que se desarrolla la vida, explicada por lógicas no clásicas. Se pregunta, *que hay de común de un niño que aprende una lengua materna y , una cepa de bacterias defendiéndose de un antibiótico? En qué se parece el trabajo de un investigador científico que tantea nuevas teorías y un artista imaginando sus obras?*. Responde estas preguntas desde el pensamiento ecológico en armonía con las

vivencias de las culturas humanas, resaltando lo biodiverso y sostenible, requisitos para la supervivencia de los seres vivos en nuestro planeta, unificando el nuevo concepto de entropía no-extensiva representado por la multifractalidad.

4. Interdisciplinariedad desde el paradigma de la complejidad

El abordaje de la interdisciplinariedad desde el paradigma de la complejidad también es emprendido por trabajos pioneros de V. Bertalanffy (Von Bertalanffy & Sutherland, 1974), P. Berger (Berger, Luckmann, & Zuleta, 1968), y nuevo investigadores como P. Érdi (Érdi, 2007), J.H. Holland (Holland, 2004), S. Kauffman (Kauffman, 2000), Y. Bar-Yam (Bar-Yam, 2018), C. Gros (Gros, 2008), quienes reconocen elementos comunes y heterogéneos en interacción de subsistemas que se mueven en diversas interdisciplinas, caracterizados por una serie de propiedades relevantes, que incluyen:

- a. **Multiplicidad de perspectivas legítimas.** Sin que exista una única perspectiva correcta o verdadera.
- b. **No linealidad,** porque reconoce diversidad de caminos, no necesariamente encadenados en el proceso de resolver problemas.
- c. **Emergencia sistémica.** El todo es más que la suma de las partes.
- d. **Auto-organización.** Los componentes que interactúan, colaboran para producir estructuras y comportamientos coordinados a gran escala, ello se explica por historicidad.
- e. **Multiplicidad de escala.** La cuestión relevante es que suele existir un acople fuerte entre niveles y por tanto el sistema se debe analizar en más de una escala simultáneamente.
- f. **Incertidumbre irreductible.** Los sistemas complejos autoconscientes, o reflexivos, que incluyen sistemas humanos o institucionales, son capaces de observarse a sí mismos, introduciendo una incertidumbre dura; una especie de efecto Heisenberg, donde los actos de observación y síntesis se convierten en parte de la actividad del sistema estudiado.

Según Rolando García, un Sistema Complejo es *“Una representación de un recorte de la realidad, conceptualizado como una totalidad organizada de elementos interdefinibles”* (García, 2006), quien afirma que *“De ahí que la interdisciplina implique estudio de problemática concebidas como sistemas complejos, no descomponibles, y el estudio de sistemas complejos exija la investigación interdisciplinaria”*.

En particular, la Dinámica de los Sistemas Complejos, según I. Prigogine (Prigogine I. , El fin de las certidumbres, 1996) plantea que el conocimiento de los procesos irreversible permite unificar sistemas que pertenecen al dominio de las más diversas disciplinas: economía, física, química, tecnológicos y biológicos; descubrió que es posible en un sistema que está lejos de una posición de equilibrio termodinámico, surjan condiciones auto-controladas por el constante intercambio de materia y energía con el medio exterior. Así que cuando las perturbaciones provenientes de un subsistema exceden un cierto umbral, ponen en acción mecanismos del siguiente nivel, contrarrestando la perturbación y desencadenando procesos que reorganizan la estructura, la cual es regida por sus propias condiciones de “estabilidad”.

De otro lado, la escuela del Pensamiento Complejo liderada por Edgar Morin (Morin, 1984) enseña que la teoría del pensamiento complejo en la educación es una alternativa al referente reduccionista cartesiano; en la obra, Morin plantea que este pensamiento se elabora en la intersección de disciplinas como: las matemáticas (Wiener, Von Neumann, Von Forster), las termodinámicas (Prigogine), biofísicas (Athans y J. Monod) y filosóficas (Castoriadis); proceso estimulado por dos grandes revoluciones del siglo XX: la incertidumbre ocasionando las reflexiones epistémicas de Popper, Kuhn, Feyerabend; Maturana propone una revolución de la organización de las ciencias de la tierra y de la ecología que se prolongará en el diálogo de la auto-organización entre disciplinas tan distantes como la biología, sociología, y psicología (Maturana H. R., 1983).

Por ello las nuevas emergencias conocidas como: Los sistemas dinámicos complejos, la complejidad ambiental, las interrelaciones entre ciencias artes y tecnología, la neuro-pedagogía, constituyendo los nodos de la red de los estudios interdisciplinarios de la complejidad.

4.1. La transdisciplinariedad de Jean Piaget a Basarad Nicolescu

En este contexto, J. Piaget da la siguiente descripción de transdisciplinariedad: "las relaciones interdisciplinarias no se limitan a reconocer las interacciones y reciprocidades entre las investigaciones especializadas, sino que buscará ubicar esos vínculos dentro de un sistema total, sin fronteras estables entre las disciplinas" (Piaget, 2000). No obstante, la idea de un "sistema total" posibilita caer en la trampa o engaño de transformar la transdisciplinariedad en una súper o hiperdisciplina, un tipo de "ciencia de las ciencias". Después de muchos años de investigación, llegó a los siguientes tres axiomas de la metodología de la transdisciplinariedad:

- a. El axioma ontológico: Existen en la naturaleza y en nuestro conocimiento de la naturaleza, diferentes niveles de realidad y, correspondientemente, diferentes niveles de percepción.
- b. El axioma lógico: El paso de un nivel de realidad a otro es asegurado por la lógica del tercero incluido.
- c. El axioma de la complejidad: La estructura de la totalidad de niveles de percepción es una estructura compleja, "cada nivel es lo que es porque todos los niveles existen al mismo tiempo" (Piaget, 2000).

La multidisciplinariedad y la interdisciplinariedad sobrepasan las disciplinas, pero su meta sigue manteniéndose dentro del marco de la investigación disciplinaria. La interdisciplinariedad tiene incluso la capacidad de generar nuevas disciplinas como la cosmología cuántica y la teoría del caos, concierne a aquello que está entre las disciplinas, a través de las diferentes disciplinas y más allá de toda disciplina. Su meta es la comprensión

del mundo presente para el cual uno de sus imperativos es la unidad del conocimiento. Como puede verse, no hay oposición entre disciplinariedad (incluyendo multidisciplinariedad e interdisciplinariedad) y transdisciplinariedad, sino una fértil complementariedad. Nicolescu Bassarad, en su obra *Manifiesto de la transdisciplinariedad*, publicada en el 2002, presenta el enfoque de "la Teoría de la complejidad" (Bassarab, 2002), con índole transdisciplinario y condicionada al diálogo de saberes, en la que importan son los problemas, la cual desarrolla en lenguaje actualizado aún más que las teorías estructuralistas de Jean Piaget.

Los principios de la transdisciplinariedad fueron sintetizados de Basarab, así:

- a. Axioma ontológico, existen diferentes niveles de la realidad y correspondientemente, diferentes niveles de percepción.
- b. Axioma lógico, el paso de un nivel de realidad a otro es asegurado por la lógica del tercero incluido.
- c. Axioma epistemológico, la estructura de la totalidad de los niveles de realidad y de percepción, es una estructura compleja, todos los niveles existen al mismo tiempo.

5. Modelización y simulación de sistemas dinámicos

El énfasis de investigación sobre didáctica de la matemáticas, semiótica y ciencias naturales vincula la modelización pues en palabras de Jean Louis Le Moine, (Le Moigne & Morin, 2007), *"La sola consideración de las interacciones entre los elementos ya no es suficiente: es necesario desarrollar nuevos instrumentos de pensamiento que permitan aprehender los fenómenos de retroacción, las lógicas discursivas, las situaciones de autonomía relativa. Se trata del verdadero desafío, tanto en el plano empírico como en el plano teórico"*

5.1. Modelado y simulación de los sistemas dinámicos.

Debido a su carácter fragmentado, la educación tradicional en ciencias y en otras

disciplinas se torna progresivamente irrelevante a medida que las sociedades se tornan más complejas y fuertemente acopladas. Las ciencias físicas, biológicas, sociales y las humanidades se enseñan como si fueran inherentemente diferentes unas de otras. Por ejemplo la estructura dinámica fundamental que causa que un péndulo oscile, es la misma que causa las oscilaciones de una comunidad biológica de presas y predadores, o la estructura central que causa las fluctuaciones en empleos e inventarios durante el ciclo económico.

5.2. La Medida de la complejidad.

Complejidad computacional (CC) se define comúnmente como el tiempo o los requisitos de memoria de almacenamiento para el cálculo de una función. Contenido de la información algorítmica (AIC) es la medida más ampliamente utilizada de CC, AIC se define como la longitud de un programa de ordenador para generar los datos. Por ejemplo, considere varias series de tiempo de 1 y 0, así la sucesión de 111 tiene AIC mínimo, y una sucesión aleatoria tiene AIC máximo, (Shannon & Weaver, 2005).

5.3. La dinámica de sistemas.

¿Qué destrezas de pensamiento configuran el pensamiento sistema-dinámico?, Barry Richmond⁵, el creador del programa Stella identifica seis destrezas de pensamiento constitutivas de la dinámica de sistemas: *pensamiento dinámico, pensamiento generalista, pensamiento sistémico, pensamiento estructural, pensamiento en bucles, pensamiento operativo y pensamiento científico*. Todas ellas se articulan en un sistema dinámico para constituir un paradigma que se opone al paradigma de pensamiento dominante en nuestra cultura: *pensamiento estático, especialista, individualista, desestructurado, factorial pasivo*.

5.4. Redes complejas, el mundo pequeño.

La ciencia de las redes, según Duncan Watts, “es la ciencia del mundo real, del mundo en el que viven los seres humanos, de la amistad, de los rumores, de las enfermedades, de las tendencias y modas culturales y de las crisis financieras” (Watts, 2006). Se trata de una manera distinta de ver el mundo, donde las unidades dinámicas de un sistema y sus interacciones se sustituyen por los vértices y las aristas de un grafo, hecho “que permite pasar de los niveles individuales a las agrupaciones colectivas menos conflictivamente que otros formalismos” (Reynoso, 2008), a través de una monumental abstracción de la realidad, en la cual se desprecian los detalles y prima lo esencial, la idea es resumir la gran cantidad de detalles característicos del sistema a la simple existencia o no de un vínculo entre vértices, de ahí que sea posible obtener representaciones extremadamente sencillas de fenómenos extremadamente complejos como nuestra sociedad, la World Wide Web e incluso el cerebro humano, en consecuencia, este enfoque meramente topológico, condujo a la ciencia de redes hasta el discernimiento de propiedades aparentemente universales como el fenómeno del mundo pequeño y las redes libres de escala, características inherentes que se derivan de sistemas particularmente complejos.

5.5. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA), se puede considerar como una nueva revolución industrial, es una máquina-software que exhibe habilidades de tipo humano, como la capacidad de razonar lógicamente, identificar objetos en imágenes, traducir texto de un idioma a otro, reconocer patrones, generar habla o texto, crear arte, diferenciar entre grupos, y más, (Russell & Norvig, 2016).

El Aprendizaje Automático es una parte fundamental de la IA, que comprende el Aprendizaje de Representación que se basa en arquitecturas de redes neuronales profundas, que

⁵Richmond, Barry; Stella software, 2002.

hacen posible que las máquinas pueden aprender de miles de ejemplos positivos y negativos, generar imágenes nunca antes vistas e incluso adaptar su propio comportamiento basado en funciones de recompensa, (Goodfellow, Bengio, Courville, & Bengio, 2016).

5.6. Paquetes computacionales.

Hace años, enseñamos a nuestros estudiantes a construir modelos que utilizan lenguajes de programación tales como Basic, Pascal, C, y así sucesivamente. Lenguajes especiales de simulación como el Dynamo, Stella, Velsim avanzaron en gran medida el arte del modelado dinámico complejo, luego vinieron los ambientes para la manipulación simbólica y la solución de problema como Macsyma, Maple, Spss, Mathematica, Matlab, Python, Netlogo y similares. (Moncho, 2008)

5.6.1. MapleSim y Vensim.

En particular, este importante paquete computacional recientemente comercializado, permite a los docentes, ingenieros y estudiantes modelar sistemas al nivel de componentes físicos, pues genera automáticamente una *S-function* optimizada para su uso inmediato en Simulink, es muy útil para modelos que exploran el ciclo límite de un oscilador subamortiguado, un péndulo forzado periódicamente, y con una discusión sobre el control del caos y la sincronización. Su autor, David Lynch⁶ ha explicado MapleSim en la segunda edición de su *best seller*, *Dynamical Systems and Applications using Maple*. Debido a su publicación durante el verano de 2009, el libro introduce a los lectores a la teoría de los sistemas dinámicos a través de ejemplos teóricos y prácticos, todos ilustrados con programas creados con las herramientas de software de Maplesoft. Estos programas modelan fenómenos como cinética química, circuitos eléctricos, sistemas mecánicos y fractales.

El MapleSim es una herramienta para explorar

el caos y el comportamiento dinámico de sistemas reales sin la complejidad de paquetes de modelado y simulación más tradicionales. El MapleSim permite a los estudiantes modelar sistemas caóticos y dinámicos de la vida real al nivel de componentes físicos y le proporciona un entorno en el que el dominio de parámetros puede ser explorado rápida y eficientemente.

Enlace de descarga:

<http://vensim.com/download/>

5.6.2. Python.

Python es un lenguaje de programación revolucionario, de libre acceso y fácil de usar, su uso recurrente recae sobre su programación multiparadigma, pues, soporta programación orientada a objetos, programación imperativa y, en menor medida, pero no menos importante, programación funcional. Su desarrollo se remonta a la década de los ochenta, cuando Guido van Rossum crea un sucesor para el lenguaje de programación ABC en el Centro para las Matemáticas y la Informática (CWI, Centrum Wiskunde & Informatica), en los países bajos; el nombre Python proviene de la gran afición de Guido por los humoristas británicos Monty Python. Por otro lado, Python persigue una filosofía similar a la establecida por Unix, es decir, portable, multitarea y multiusuario.

Enlace de descarga:

<https://www.python.org/downloads/>

5.6.3. Netlogo.

NetLogo es un programa y lenguaje de programación basado en agentes, en ese sentido, es una plataforma para el desarrollo y estudio de sistemas multiagentes, desarrollado por el Northwestern University Center for Connected Learning (CCL) es de libre acceso y cuenta con un gran soporte, asimismo, su interfaz es simple y sencilla, con lo cual su uso también lo es.

⁶Lynch, David; Maple software, Waterloo University, 1988.

Desarrollado en Java y Scala, y ejecutado en la máquina virtual de Java (JVM), NetLogo es muy portable y eficiente, pues, con cada nueva versión, es mejorado significativamente. Las características del lenguaje orientadas a los agentes han sido racionalizadas, para ser más consistentes y coherentes, con el fin de ofrecer una simulación más acorde a las verdaderas interacciones de los elementos del sistema en estudio.

Enlace de descarga:

<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/download.shtml>

5.6.4. SageMath.

Sage es un software matemático de libre acceso y de código abierto que apoya la investigación y la enseñanza en álgebra, geometría, teoría de números, criptografía, computación numérica y áreas relacionadas, en resumen, se trata de un sistema algebraico computacional (CAS) cimentado y construido sobre NumPy, Sympy, Maxima, entre otros; durante algún tiempo era llamado Sage a secas, sin embargo, hoy se conoce bajo del nombre de SageMath. Tanto el modelo de desarrollo como la tecnología en Sage se distinguen por un énfasis extremadamente fuerte en la apertura, comunidad, cooperación y colaboración, como sus creadores han mencionado en reiteradas ocasiones, “estamos construyendo el carro, no reinventando la rueda”. Una alternativa viable, libre y de código abierto a Maple, Mathematica, Magma y Matlab.

Enlace de descarga:

<http://www.sagemath.org/download.html>

5.7. Futuro y ciencia ficción.

El físico Eric Harth sostiene que “*la neurobiología y conciencia están inextricablemente unidas*” (Harth, 1993), lo que echaría por tierra la hipótesis de la “*descarga del cerebro*” (Ross, 2011), planteada por Ross. Por supuesto, Harth arguye que, aunque admite que el cerebro no es un computador de uso general del tipo Von Neumann, podría contener una conciencia

humana si la emulación “llegase a un nivel lo suficientemente bajo para que emulase sistemas que están bajo el nivel esencial del cerebro”. El neurólogo Richard Restak, despeja esta discusión al preguntar: “¿Es posible que nuestra definición de cerebro sea demasiado corta?, ¿Acaso no están los procesos reguladores que situamos dentro de nuestras cabezas mucho más distribuidos?” (Restak, 2005). De este modo nos recuerda que los neurotransmisores y las hormonas reguladoras no se hallan confinadas en el cerebro sino repartidas por todo el cuerpo.

6. Conclusiones: eco-neuro-pedagogía y complejidad

Los científicos creyeron que el sentido común era el principal obstáculo para hacer ciencia, y se empeñaron en contradecirlo y remplazarlo por la visión científica del mundo. Para Gastón Bachelard, (Bachelard, 2000), el sentido común era el primero de los obstáculos epistemológicos, y sólo pudo darse la ciencia física cuando éste fue derrotado por Galileo y Newton. Fue frecuente entre los especialistas en enseñanza de las ciencias naturales la recomendación de sustituir el lenguaje del sentido común por el lenguaje científico, y aún el de eliminar las imágenes y analogías para concentrarse en las definiciones rigurosas de los conceptos de lógica, las matemáticas y la física.

También con demasiada frecuencia se creyó que el arte era una creación puramente emocional e intuitiva y que, a diferencia del artista, la labor del científico era la de adelantar una experimentación empírica controlada, la de pulir una formulación rigurosa, ojalá matemática, de sus teorías y la de extraer de ellas por deducción lógica las conclusiones y las hipótesis de trabajo. Sólo un análisis más detallado de la creación de nuevas teorías científicas, nuevos conceptos, nuevas leyes físicas y nuevos teoremas matemáticos, reveló la dimensión profunda de tipo creativo que la hace más cercana al trabajo de los artistas que al de la carpintería cotidiana de lo que Kuhn llamó “hacer ciencia normal” (Kuhn, 2013), lo que es explicado por Vasco (Vasco, 1990) en su conferencia de 1990.

Sólo los estudios de Husserl y Habermas (Habermas, 1990) en sus observaciones sobre la crisis de la modernidad lograron una reconceptualización y reubicación del papel del sentido común y del mundo de la vida, de la cotidianidad, de la crítica, en la utilización de las ciencias, su aprendizaje y enseñanza. Porque la caricatura de un mundo que hizo de las ciencias inconmensurable con el de las artes y el sentido común, las ciencias naturales pasaron de ser una actividad profundamente humana e histórica, llena de intuiciones, imaginación y creatividad.

Es porque la educación a través del arte, puede apuntar un camino para la *pacificación del hombre*, (Escobedo, 1993). El arte de pilotar, propio de la cibernética, sirve de modelo e ilustración de la relación educación - arte, como posibilidad de resonancia de esas hormonas que contienen al mismo tiempo los principios de la metáfora “orden y desorden”. También porque Deleuze, Guattari y Kauf definen el pensamiento en sus tres grandes formas: la Ciencia, el Arte y la Filosofía como maneras diferentes de afrontar el Caos, lo Infinito y lo Indiscernible: “*La filosofía quiere salvar el infinito dándole consistencia, ella traza un plano de inmanencia que lleva al infinito los acontecimientos o conceptos consistentes bajo la acción de personajes conceptuales. La ciencia, al contrario, renuncia desde este punto de vista al infinito para ganar la referencia, ella traza un plano de coordenadas que define cada vez estados de cosas, de funciones o de proposiciones referenciales, bajo la acción de observadores parciales. El arte quiere crear lo finito que vuelve a dar lo infinito, traza un plano de composición que lleva a su turno los monumentos o las sensaciones compuestas a lo infinito, bajo la acción de figuras estéticas*” (Deleuze, Guattari, & Kauffmann, 2001). Es a partir de este modelo que Deleuze, Guattari y Kauffmann piensan los encuentros y los devenires que constituyen la vida de los seres humanos, no vivimos en un entorno prefijado de antemano, sino en un mundo de interrelaciones constantes. En un mundo de humanos, el acontecimiento no puede ser reducido a una ley determinista, ya que sus condiciones iniciales son múltiples y la vuelta hacia atrás en

su trayectoria es casi imposible.

Es el devenir en espiral de Heráclito, la complementariedad-sintagma-Heisenberg, el abordaje caológico-cosmología de Ilya Prigogine; se trata contribuir con la transformación de las instituciones educativas en comunidades de aprendizajes, hetero-aprendizajes como las denomina Gregory Bateson, esto es, en espacios de preguntas para superar problemas no triviales y promover “*el aprender haciendo y aprender del error*” (Bateson, 1979)

6.1. Metáfora del caos y la creatividad.

Es una teoría pedagógica cuyos principios plantean sistemas educativos abiertos, donde reconociendo que la creatividad se hace presente por las interrelaciones con entornos así como con en sus elementos y redes, tienden a fluir al alejarse de las condiciones normales lejos del equilibrio, registrándose en las dimensiones espacios temporales, propiciando la auto-regulación, (Colom, 2002)

Corresponde a la (de)construcción de la pedagogía para asumir nuevas formas de la realidad educativa y abordar la formación bajo condiciones que solo se dieron a finales del siglo XX. En este sentido rompe con los conceptos tradicionales de adquisición de conocimiento, enseñanza, aprendizaje, autoridad, disciplina, asignaturas, currículo, programas y evaluación. Por supuesto también cuestiona y de-construye la organización escolar que le daba forma material a todas esas concepciones, (Davis & Sumara, 2014).

La metáfora del caos permite variar allí más de lo permitido, ser más diferente que la diferencia, soporta la creatividad va más allá del patrimonio de los artistas, construyendo hacia el futuro redes complejas involucrando emergencias recreativas, lúdicas y gamificaciones, pues la creatividad emergente debe estar presente en nuestras organizaciones educativas. La metáfora del caos reconoce que los procesos educativos para que se auto-produzca funcionan con necesarios márgenes de libertad, libremente conectados o reconectados.

6.2. Necesidad de la trasposición didáctica, del saber sabio al saber enseñando.

Pero es necesario responder a la pregunta "¿Por qué el funcionamiento didáctico del saber es distinto del funcionamiento académico?, ¿por qué hay dos regímenes del saber, interrelacionados pero no superponibles?", Y. Chevallard responde, porque "La transposición didáctica tiene lugar cuando pasan al saber enseñado elementos del

saber, ¿pero por qué son necesarios esos flujos?" (Chevallard, 1991) Comúnmente, el saber enseñado vive muy bien encerrado sobre sí mismo, protegido por lo que hemos llamado la "clausura de la conciencia didáctica", y cuando se lo observa, el funcionamiento didáctico revela incluso una verdadera capacidad de producción de saber con fines del autoconsumo. Esta creatividad didáctica introduce muchas variaciones sobre los grandes motivos de la más alta ascendencia.

Concretamente, los sistemas didácticos son formaciones que aparecen alrededor de un saber, se forma un contrato didáctico que toma ese saber cómo objeto de un proyecto compartido de enseñanza, aprendizaje y que une en un mismo sitio a docentes y alumnos. Estos principios son desarrollados para la enseñanza de las matemáticas escolares por Guy Brousseau⁷ en la Teoría de las Situaciones Didácticas.

En particular para articular un currículo, surge la necesidad de articular la formación matemática en la escuela desde la resolución de problemas (Niss, 1999), su modelización contextualizada (Bosch, García, Gascón, & Ruiz Higuera, 2006), con soluciones curriculares integradoras como las propuestas por Badilla, (Badilla Saxe, 2009), el rescate del aprendizaje por proyectos de Dewey (Dewey, 1992) y (Jurado, 2016), el enfoque de los ejes transversales de Baene (Beane, 2016) y las ideas de las investigaciones transdisciplinarias de Nicolescu (Nicolescu, 2008).

6.3. Visión compleja de la enseñanza:eco-pedagogía-ciencia-arte.

Para proponer métodos en la actual sociedad del aprendizaje *la pedagogía de la complejidad* en el aula como un nicho ecológico de diálogo de saberes, con valor del contextual, con iniciativas para el cambio, (Llinás, 2003) (Llinás, 2017), el cual tradicionalmente ha oscilado entre el control y el caos (Pascale, Millemann, & Gioja, 2006) , como las propuestas por (Fullan, 2002), un renovado poder pedagógico expuesto por Michael Foucault (Foucault, 1987), para aprender a aprender, o enseñar a aprender, consideramos por ejemplo los aportes de: la Gestalt, (Velasco, Números Revista de Didáctica de las Matemáticas, 81) *la forma por estructuras; la epistemología genética*, de Jean Piaget; las construcciones inter-subjetivas, *Las zonas de desarrollo próximo* de Lev Vygotski, (Vygotski, Kozulin, & Abadía, 1995) y Jerome Bruner; (Bruner, 2001) *La Inteligencia emocional* investigada por Daniel Goleman (Goleman, 2012) y *Las Inteligencias Múltiples* investigadas por Howard Gardner, (Gardner, 2001); el *aprendizaje significativo* de David Ausubel, Joseph Novak y Hanesian (Ausubel, Novak, & Hanesian, 1978); y "*la pedagogía liberadora*" de Paulo Freire (Freire, 2005), (Maturana & Varela, 1998).

Como hemos sido formados a partir de un enfoque mecanicista-positivista de la realidad, creemos que podemos alcanzar el orden y el control de los procesos educativos en los que nos involucramos. Aún hoy, se tiende a creer en la existencia de verdades absolutas, empero, vivimos tiempos dinámicos y complejos que se nutren de la incertidumbre y de una multidiversidad de relaciones económicas, sociales, geográficas, políticas, cognitivas, temporales, interculturales, institucionales. En la construcción de universos diferentes desde las ciencias, desde las artes o desde al sentido común, Daniel Goleman, filósofo de la Universidad de Harvard y cofundador del Proyecto Cero, escribió un libro sobre tres

⁷<http://guy-brousseau.com/>

maneras de hacer mundo: desde *las ciencias, desde las artes o desde al sentido común*.

Hay que destacar las investigaciones significativas en la Didáctica de las Ciencias dirigidas a conformar nuevos modelos de enseñanza que permitan superar las dificultades que se vienen presentando en el ámbito escolar con el aprendizaje de las ciencias. Campanario y Moya (Campanario & Moya, 1999). Un caso relevante lo constituye la educación ambiental ya que es un tema emergente que debe enseñarse en la escuela desde el nivel básico hasta el nivel superior, con la finalidad de incidir en una cultura orientada a la preservación y conservación del medio ambiente.

A este respecto la teoría de los sistemas de Bertalanffy, la identificación de las fronteras comunes entre las ciencias humanas y ciencias naturales de I. Prigogine y Maturana, como un puente entre las ciencias naturales y sociales, inclusive integrando metodologías transdisciplinarias entre, a través y más allá de las disciplinas.

Mauro Montealegre Cárdenas (Montealegre C., 2013) presenta un desarrollo de las matemáticas escolares desde enfoque de la solución de problemas y modelizaciones elementales, el cual inicia al estudiante en los métodos y contenidos de los sistemas dinámicos cercanos a su cotidianidad, para favorecer del desarrollo cognitivo de los estudiantes. Maldonado propone una educación que indiscipline el conocimiento, (Maldonado, 2017). Y para formar seres humanos autónomos y libres, complejizando la educación (Maldonado, 2014).

6.4. Neuropedagogía.

Desde el punto de vista de la *interdisciplinarietà* existe una relación relevante entre la Neurociencia y la Educación, dada por la necesidad de contextualizar los conocimientos sobre el cerebro, su anatomía, funcionamiento,

plasticidad, desmitificando su exclusivo estudio para las ciencias de la salud.

La revisión de las diversas teorías, entre ellas: el Cerebro Trino, la bi-hemisferialidad, la Inteligencia Emocional, la Neurolingüística, la Teoría Neuronal muestra que todas ellas guardan una íntima relación con los procesos cognitivos y los avances tecnológicos propios de este tercer milenio, donde la información y la cibernética avanzan a pasos acelerados, lo cual conlleva al profesional a estar en un proceso permanente de actualización y búsqueda de nuevas estrategias que le permitan facilitar con la relación cerebro - mente con mayor fluidez y creatividad.

De ahí la importancia de los distintos enfoques presentados y que se relacionan directamente con la Neurociencia, a través de diversos estudios como los de Mac Lean (MacLEAN, 1970), Sperry (Sperry, 1968), Eccles y Popper (Popper, 1989), Daniel Goleman (Goleman, 2012), Edelman (Edelman, 1987), Howard Gardner (Gardner, 2001), Llinas⁸ quienes con sus diversos abordajes permiten conocer y profundizar sobre ese magnífico computador que es el cerebro. Gracias a todas estas investigaciones se ha confirmado la especialización de los hemisferios cerebrales y el hipotálamo, permitiendo establecer por ejemplo que la capacidad de hablar, escribir, leer y el razonamiento numérico, es responsabilidad fundamental del hemisferio izquierdo, mientras que en el hemisferio derecho residen la curiosidad, la habilidad de percepción y orientación temporal-espacial, la creatividad, la imaginación.

6.5. Hacia la pedagogía de la complejidad.

Como nuestros sujetos educativos son a la vez físico, biológico, psíquico, culturales e históricos, el diseño curricular debe evolucionar de una organización fragmentada y dividida en materias y disciplinas, hacia una concepción más orgánica, comprensiva y holista, Morin (Morin, 1999) y

⁸Llinas Rodolfo

J. Prigogine y Strenger (Prigogine & Strenger, 1983), J. Holland (Holland, 2004), H. Maturana y F. Varela (Maturana & Varela, 2003). Es esta unidad compleja de la naturaleza humana la que está completamente desintegrada en la educación a través de las disciplinas, y es la que ha imposibilitado aprender eso que significa ser humano. Las organizaciones educativas se organizan ellas mismas, en los macro y en lo micro, como sistemas complejos adaptativos dinámicamente reconocen lo imprevisto como normal y que los aprendizajes deben ser contextualizados en ambientes culturales diversos (Mason, 2008).

Esto quiere decir que no es suficiente con elaborar proyectos o introducir ejes transversales para tratar de re-unificar lo que ha sido separado. Para que la educación del futuro responda a las nuevas realidades de la actualidad, es necesario que el currículo nazca ya integrado. Con ese fin, Morin indica que la educación del futuro debe evolucionar hacia siete saberes, (Morin, 1999):

a. Asumir el riesgo del error: La educación del futuro debe contar siempre con la posibilidad de error

b. Asumir la interacción compleja del conocimiento: Es necesario que la educación del futuro contribuya con la diferenciación de los problemas y las preguntas relevantes.

c. Entender los bucles de lo humano: Para el autor, lo humano es y se desarrolla en bucles:

- *Cerebro- mente- cultura*
- *Razón - afecto - impulso*
- *Individuo - sociedad -especie.*

d. Asumir una patria planetaria: La perspectiva planetaria es imprescindible en la educación.

e. Enfrentar la incertidumbre: *"La historia avanza por atajos y desviaciones y, como pasa en la evolución biológica, todo cambio es fruto de una mutación, a veces de civilización y a veces*

de barbarie. Todo ello obedece en gran medida al azar o a factores impredecibles".

f. Comprender en diversas dimensiones: Comprensión implica el entendimiento de los códigos éticos de los demás, de sus ritos y costumbres, de sus opciones políticas.

g. Asumir una ética válida para la humanidad: Para Morin, en el bucle *Individuo-sociedad* surge el deber ético de cultivar la democracia, que implica consensos y aceptación de reglas democráticas y que incluye diversidades y antagonismos.

7. Referencias bibliográficas

- Andrade, E. (2003). *Los demonios de Darwin. Semiótica y termodinámica de la evolución biológica.* Bogotá DC.: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Ausubel, D., Novak, J. D., & Hanesian, H. (1978). *Educational Psychology: A Cognitive view* New York: Werbel & Peck.
- Bachelard, G. (2000). *La formación del espíritu científico.* Siglo XXI.
- Badilla Saxe, E. (2009). Diseño curricular: de la integración a la complejidad. *Revista Electrónica" Actualidades Investigativas en Educación"*.
- Bar-Yam, Y. (2018). *Unifying Themes In Complex Systems, Volume 1: Proceedings Of The First International Conference On Complex Systems.* CRC Press.
- Bassarab, N. (2002). *Manifiesto de la interdisciplinariedad.* La Habana.
- Bateson, G. (1979). *Heteroaprendizajes, espíritu y naturaleza.* Palo Alto.
- Beane, J. A. (2016). *Curriculum integration: Designing the core of democratic education.* Teachers College Press.

- Berger, P. L., Luckmann, T., & Zuleta, S. (1968). *La construcción social de la realidad*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Bosch, M., García, F. J., Gascón, J., & Ruiz Higuera, L. (2006). La modelización matemática y el problema de la articulación de la matemática escolar. Una propuesta desde la teoría antropológica de lo didáctico. *Educación matemática*.
- Bruner, J. S. (2001). *El proceso mental en el aprendizaje*. Narcea Ediciones.
- Campanario, J. M., & Moya, A. (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 172-192.
- Chevallard, Y. (1991). *La transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado*.
- Chomsky, N. (1989). *El conocimiento del lenguaje: su naturaleza, origen y uso; versión española de Eduardo Bustos Guadaño*. Alianza Editorial.
- Colom, A. J. (2002). *La (de) construcción del conocimiento pedagógico: Nuevas perspectivas en teoría de la educación*. Barcelona: Paidós.
- Cros, C. (2008). *Complex and Adaptive Dynamical Systems*. London : Springer.
- Davis, B., & Sumara, D. (2014). *Complexity and education: Inquiries into learning, teaching, and research*. New York: Routledge.
- Davis, B., & Sumara, D. (2014). *Complexity and education: Inquiries into learning, teaching, and research*. Routledge.
- De Saussure, F., Bally, C., Sechehaye, A., Riedlinger, A., Alonso, A., & Sechehaye, A. (1987). *Curso de lingüística general*. Madrid: Editorial Alianza.
- Deleuze, G., Guattari, F., & Kauffmann, T. (2001). *¿Qué es la filosofía?* Barcelona: Anagrama.
- Dewey, J. (1992). *The child and the curriculum*. University of Chicago Press.
- Edelman, G. M. (1987). *Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection*. Basic books.
- Érdi, P. (2007). *Complexity explained*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Escobedo, H. (1993). Psicología cognitiva. *Informática Educativa Proyecto SIIE*, 167-173.
- Foucault, M. (1987). *Saber-poder, interrogante del presente*. Buenos Aires: Paidós.
- Freire, P. (2005). *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI.
- Fullan, M. (2002). *Las fuerzas del cambio* (Vol. 5). Madrid: Ediciones AKAL.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos*. Barcelona: Gedisa.
- Gardner, H. (2001). *La inteligencia reformulada: las inteligencias múltiples en el siglo XXI*. Paidós.
- Gell-Man, M. (1995). *El quark y el jaguar, Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona: TusQuest Editores.
- Godino, J. D. (2003). *Teoría de las funciones semióticas. Un Enfoque Ontológico-Semiótico de la Cognición e Instrucción Matemática (Theory of semiotic functions. An ontological and semiotic approach to mathematics cognition)*. Granada: Departamento de Didáctica de la Matemática, Universidad de Granada.
- Goleman, D. (2012). *Inteligencia emocional*. Editorial Kairós.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). *Deep learning* (Vol. 1). Cambridge: MIT press.

- Habermas, J. (1990). *Teoría de la Acción Comunicativa*. Gedesa.
- Harth, E. (1993). *The creative loop: How the brain makes a mind*.
- Holland, J. H. (2004). *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. México DF.: Fondo de Cultura Económica.
- Johnson, S., & Ferré, M. F. (2003). *Sistemas emergentes*. Fondo de Cultura Económica.
- Jurado, F. (2016). *Algunas características de la educación por proyectos*. Bogotá DC.: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Kauffman, S. A. (2000). *Investigations*. New York: Oxford University Press.
- Kuhn, T. S. (2013). *La estructura de las revoluciones científicas*. México DF: Fondo de Cultura Económica.
- Le Moigne, J. L., & Morin, E. (2007). *Intelligence de la complexité: épistémologie et pragmatique: colloque de Cerisy*. de l'Aube essai.
- Lipman, M. (1998). *Pensamiento complejo y educación*. Madrid: Ediciones de la Torre.
- Llinás, R. R. (2003). *Llinás, R. R. (2003). El cerebro y el mito del yo: el papel de las neuronas en el pensamiento y el comportamiento humanos*. Bogotá DC.: Editorial Norma.
- Llinás, R. R. (2017). *La pregunta difícil*. Bogotá DC.: Aguilar.
- Luhmann, N., & López, P. (1984). *Sociedad y sistema: La ambición de la teoría*.
- MacLEAN, P. A. (1970). *The Triune Brain, Emotion, and Scientific Bias*. New York: Schmitt.
- Maldonado, C. E. (2011). *Termonidámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales*. Bogotá, DC: Desde Abajo, Ed Universidad Externado de Colombia.
- Maldonado, C. E. (2014). ¿Qué es eso de pedagogía y educación en complejidad? *Intersticios sociales*, 1-23.
- Maldonado, C. E. (2017). Educación compleja: Indisciplinar la sociedad. *Educación y Humanismo*, 234-352.
- Mason, M. (2008). Complexity theory and the philosophy of education. *Educational Philosophy and Theory*, 4-18.
- Maturana, H. (2007). *La pedagogía de la esperanza*. México: Siglo XXI.
- Maturana, H. R. (1983). Fenomenología del conocer. *Revista de Tecnología Educativa (Departamento de Asuntos Educativos Organización de los Estados Americanos)*, 228-252.
- Maturana, H., & Varela, F. (1998). *De máquinas y seres vivos*. Universitaria.
- Maturana, H., & Varela, F. (2003). *El árbol del conocimiento: las bases biológicas del entendimiento humano*. Lumen Humanitas.
- Moncho, A. C. (2008). *Modelización y simulación de sistemas complejos*. València: Universitat de València.
- Monod, J. L. (1988). *El azar y la necesidad: ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*. Barcelona: TusQuest.
- Montealegre C., M. (2013). *Matemáticas para la creatividad Plus, volúmenes I-V*. Neiva: Tiempos Ecológicos.
- Morin, E. (1994). El diseño y designio complejos. En E. Morin, & M. Pakman, *Introducción al pensamiento complejo* (págs. 21-53). Barcelona: Gedisa.

- Morin, E. (1984). *Ciencia con conciencia*. Barcelona : Anthropos.
- Morin, E. (1999). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. Unesco.
- Nicolescu, B. (2008). *Transdisciplinary theory and practice*. TheATLAS.
- Niss, M. (1999). Aspects of the nature and state of research in mathematics education. *Educational studies in mathematics*, 1-24.
- Pascale, R. T., Millemann, M., & Gioja, L. (2006). Surfing the Edge of Chaos. En H. J., *Creative Management and Development* (págs. 235-250). Londres: Sage Publications.
- Piaget, J. (2000). *Biología y conocimiento*. Siglo XXI.
- Pierce, C. S. (2008). *Pragmatismo*. Madrid : Encuentros.
- Poincaré, H. (1981). *Filosofía de la ciencia*. México: Conacyt.
- Popper, K. R. (1989). *La lógica de la investigación científica*. REI.
- Prigogine, I. (1993). *¿Tan sólo una ilusión?* Barcelona: TusQuest.
- Prigogine, I. (1996). *El fin de las certidumbres*. Santiago de Chile : Andrés Bello.
- Prigogine, I., & Stenger, (1983). *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza.
- René, T. (1983). *Mathematical Models of Morphogenesis*. New York: Ellis Horwod.
- Restak, R. (2005). *Nuestro nuevo cerebro*. Barcelona: Urano.
- Reynoso, C. (2008). Hacia la complejidad por la vía de las redes: nuevas lecciones epistemológicas. *Desacatos*, 17-40.
- Ross, R. (2011). *El cerebro y el mundo no se corresponden*. Barcelona.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). *Artificial intelligence: a modern approach*. Malaysia: Pearson Education Limited.
- Scheiner, T. (2018). *Unitiyng the similar Dwal theory*. ICM.
- Schrödinger, E. (1998). *Mi concepción del mundo: seguido de mi vida*. Barcelona: TusQuest Editores.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (2005). *The mathematical theory of communication*. University of Illinos Press.
- Sperry, R. W. (1968). *Hemisphere deconnection and unity in conscios awareness*. American Psychologist.
- Vasco, C. (1990). *Artes, Ciencias y Sentido Común*. Bogotá DC.
- Velasco, M. P. (Números Revista de Didáctica de las Matemáticas, 81). Descartes y la gestalt: La ilusión encerrada en las imágenes. 2012, 61-66.
- Von Bertalanffy, L., & Sutherland, J. W. (1974). General systems theory: Foundations, developments, applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 592-592.
- Von Foerster, H. (2006). *Las semillas de la cibernética: obras escogidas*. Barcelona: Gedisa.
- Von Foerster, H., Mead, M., & Teuber, H. L. (1951). In Cybernetics: Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems. *Transactions of the Eighth Conference*, 15-16.

- Von Neumann, J. (2012). *The computer and the brain*. Yale University Press.
- Vygotski, L. S., Kozulin, A., & Abadía, P. T. (1995). *Pensamiento y lenguaje*. Barcelona: Paidós.
- Watts, D. J. (2006). *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era del acceso*. México: Paidós.
- Wiener, N. (1985). *Cibernética*. Barcelona: TusQuest.