ISSN: 2961-287X

RICCE

Revista Iberoamericana de Complejidad y Ciencias Económicas

Vol. 3 Núm. 2(2025)



LaSalle Universidad

En alianza con:

ACADEMIA HISPANOAMERICANA DE LA COMPLEJIDAD

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Revista Iberoamericana de Complejidad y Ciencias Económicas

Vol 3 No. 2 - Junio 2025.

Editado por:

Universidad La Salle

RUC: 20456344004

Av. Alfonso Ugarte 517, Cercado, Arequipa, Perú

ISSN: 2961-287X

Depósito Legal No. 2023-08579

Publicación cuatrimestral

DOI: 10.48168/RICCE.v3n2

Equipo Editorial Editor

Dr. Glenn Roberto Arce Larrea (Perú)

Editores invitados

PhD. Mauro Montealegre Cárdenas (Colombia)

Consejo Editorial

Dr. Glenn Roberto Arce Larrea (Perú)
Dr. Carlos Eduardo Maldonado Castañeda (Colombia)
Dr. Carlos Alberto Flores Sánchez (México)
Dr. Eligio Cruz Leandro (México)
Dr. José Guadalupe Ramírez Durán (México)
Mtro. Josué Miguel Flores Parra (México)
Dr. Leonardo G. Rodríguez Zoya (Argentina)
Dr. Miguel Ramón Viguri Axpe (España)
Dr. Nelson Alfonso Gómez Cruz (Colombia)
Dr. Ricardo Fernando Rosales Cisneros (México)
Dra. Margarita Ramírez Ramírez (México)
Dra. María del Consuelo Salgado Soto (México)
Dra. María Nely Vásquez Pérez (España)
Dra. Nora del Carmen Osuna Millan (México)
Dra. Taeli Gomez Francisco
Dra. Wendy Ugarte Mejía (Perú)
Econ. Angela Daniela Portugal Pacheco (Perú)
Dr. Juan Antonio Meza Fregoso (México)

Edición y Diseño

Universidad La Salle (Arequipa)

En alianza con

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA (MÉXICO)
ACADEMIA HISPANOAMERICANA DE LA COMPLEJIDAD

ricce@ulasalle.edu.pe
https://revistas.ulasalle.edu.pe/ricce

EDITORIAL

El modelado de sistemas discretos corresponden a las ciencias de la complejidad como ciencias de la vida, Maldonado (2021). Se aproximan al comportamiento de los seres o colectividades vivas que se caracterizan por su capacidad de creatividad y aprendizaje incesante. Más exactamente, se trata de fenómenos que representamos como sistemas con comportamientos de complejidad creciente por ser irreversibles, indeterminados, inestables, inciertos e inter definibles.

También las matemáticas discretas modelan procesos permiten la construcción de fractales en la matemática, las ciencias naturales y sociales, Mandelbrot B.(2004), y que pueden resolver problemas en el ámbito computacional aplicado, Kauffman, S. (2011). En esta área del modelado de sistemas discretos John Von Neumann (1966) ideó una máquina capaz de auto replicarse, los llamados Autómatas Celulares, interpretados como conjunto de células que crecen, se reproducían y mueren, Reyes Gómez (2011) y Nowak M.A. (2006).

En el modelado surgen matemáticas discretas de las redes con idea topológica de los grafos ideados por Leonhar Euler para la solución en 1736 del mítico problema de los siete puentes de Königsberg: "Un grafo es una de las representaciones que admite una red; y a la inversa una red es a su vez una clase, una interpretación o una instancia empírica de un grafo" (Reynoso, 2011, pág. 26).

La ciencia de redes se ha transformado en una de las inspiraciones de las ciencias de la complejidad, que atrae a profesionales de diversas áreas, haciendo de ella una ciencia interdisciplinar que permite ver el mundo de manera distinta; al igual que faculta el replanteamiento de cuestiones pasadas, ya que somos nosotros, como individuos, las unidades de una red de relaciones sociales de diferentes tipos y, como sistemas biológicos, el resultado delicado de una red de reacciones bioquímicas. Las redes pueden ser objetos tangibles en el espacio euclidiano, como redes eléctricas, internet, autopistas o sistemas de metro y redes neuronales. O pueden ser entidades definidas en un espacio abstracto, como redes de conocidos o colaboraciones entre individuos" (Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang, 2006, pág. 177)

Las redes complejas constituyen una especie de modelado *down to top* que permite pasar de los niveles individuales a las agrupaciones debido a que selecciona ciertos aspectos de la realidad y deja de lado otros, pero en esto no hay diferencia entre un tratamiento modelado y otro discursivo; en estas y otras técnicas de modelado la idea no es reproducir el fenómeno complejo hasta los últimos detalles, sino proporcionar resultados acordes con las suposiciones realizadas, permitiéndonos tratar reflexivamente con las implicancias de nuestras opiniones" (Reynoso, 2008, pág. 19).

Las matemáticas discretas en le ciencia de redes de "una parte integrante del sistema

constituyente que se haya en evolución" (Watts, 2006) , por lo tanto, las cualidades descritas hasta el momento junto con la posibilidad de predecir comportamientos colectivos a partir de su estructura permiten resaltar los atributos que hacen de las redes, redes complejas.

El uso recurrente de las redes en las interpretaciones del mundo real, pues su generalidad representa quizás la mayor fortaleza, debido a que topológicamente dos sistemas completamente distintos pueden poseer estructuras similares que a su vez permiten encontrar características aparentemente universales en la mayoría de las redes, como por ejemplo el fenómeno del mundo pequeño y la distribución de grados libres de escala, por citar algunos, lo cual posibilita la segmentación de las redes a partir de propiedades comunes. Del mismo modo, conviene citar la categorización de las redes sugerida por Mark E. J. Newman[1] (Newman, 2003), la cual reúne y agrupa la mayoría de las investigaciones realizadas hasta ese momento desde diferentes áreas del conocimiento en cuatro grupos: redes sociales, redes de información, redes tecnológicas y redes biológicas; siendo el primer grupo el de mayor interés para nuestros objetivos.

Al respecto en esta edición el artículo "*Modelado matemático en la educación para comprender"* las redes de las matemáticas discreta se involucran con los procesos educativos que privilegian la inteligencia emocional para comprensión y la *autoestima*; pues reconocen inestabilidades, aberturas, indeterminaciones y coevoluciones; identifican propiedades emergentes con estructuras *autonómicas* como "*rizomas*" o "*fractales*", rupturas, fluctuaciones y (*De*)construcciones; evidencian incertidumbres auto organizativas, entre flexibilidad y plasticidad cognitivas, que contribuyen al aprendizajes para la comprensión.

En particular sobre las redes del sistema educativo se publica en esta edición el artículo denominado "*Entropía Curricular y Redes Complejas para el desarrollo de Proyectos Ambientales Escolares (PRAE)",* que desde la termodinámica entrópica estadística de Shannon, C. E. y Weaver, W.[2] (1949) relaciona modelos de la matemática discreta en la complejidad de los sistemas de información, Solé y Goowdy (2000).

Inspirados en la neuroplasticidad cerebral la neuroplasticidad curricular plantea una nueva forma de entender el aprendizaje, donde el conocimiento se autoorganiza en función de la experiencia, la interacción y la interdisciplinariedad. Así como el cerebro fortalece sus conexiones sinápticas para mejorar el procesamiento de la información, el currículo debe favorecer la integración de saberes y metodologías para potenciar la construcción del conocimiento. Lo que es tratado en el artículo "*Neurolasticidad Curricular: un enfoque de aprendizaje en Redes*", se sustenta que

1 Newman, M. (2003). The structure and function of complex networks. SIAM review, 167-256.

2 Shannon, C. E. y Weaver, W. (1949). The Theory of Mathematical Communication. ***International Business***.

el currículo educativo, tradicionalmente concebido como una estructura rígida y lineal, debe evolucionar su comprensión en redes que posibiliten la adopción a los cambios registrados en sus contextos.

De la complejidad de los sistemas ambientales emergen fenómenos fractalizados, caóticos y catastróficos[3] que expresan la crisis climática en cuanto afecta la sobrevivencia de la vida en nuestro planeta, lo que nos obliga a comprometernos con estrategias de mitigación y adaptabilidad, Gallopín[4] (2006). Proceso que J. Holland[5] (2004) describe a través de cuatro propiedades básicas de estos sistemas adaptativos complejos: agrupación, no linealidad, diversidad y flujo. Surgen así propiedades emergentes de adaptación que se autoorganizan con funciones en ciclos cruzados de exploración, conservación, liberación y reorganización, Holling,C., Gunderson, Lance y Peterson, Garry, (2002)[6].

La variabilidad climática corresponde en particular a sistemas emergentes de funciones cruzadas entre: ciclos adaptativos: exploración, conservación, liberación y reorganización que corresponden al modelo de C. Holling (2011). Dichos ciclos son afectados por cambios súbitos del proceso de adaptación, que en esta edición se argumenta en el artículo "*Modelado de la Complejidad Ambiental*", en el cual los autores proponen un método centrado en las matemáticas discretas para comprender la complejidad de la interacción antrópica-entrópica.

En particular en artículo "*Modelado del impacto del cambio climático sobre el paisaje*", el autor propone a través de las matemáticas discretas conocer la complejidad la evolución del paisaje (Gavier, 2018) para simular la dinámica en la transformación del bosque a la agricultura (Brown, 2008), quien desarrolló un modelo espacio-temporal de la dinámica de maximización de la utilidad de cultivos frente a la cobertura forestal.

Mauro Montealegre Cárdenas, editor

Maestría en Estudios Interdisciplinarios de la Complejidad,

Universidad Surcolombiana.

3 Braun, E.(2019). Caos, fractales y catástrofes. Fondo Cultura Económica, Buenos Aires.

4 Gallopín, Gilberto C. 2006. "Linkages Between Vulnerability, Resilience, and Adaptive Capacity." Global Environmental Change 16 .

5 Holland, John 2004. El Orden Oculto: De cómo La Adaptación Crea La Complejidad. Fondo de Cultura Económica.

6 Holling, C. S., Gunderson, Lance y Peterson, Garry, (2002). Sustainability : Panarchy: understanding transformations in human and natural systems, Island Press.

Modelado matemático en la educación para comprender

Fecha de recepción: 17-12-24 / Fecha de aceptación: 12-05-25

Mauro Montealegre Cárdenas
Ph.D. Matemáticas y Profesor Titular Usco

Correo electrónico: mmonteal@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1577-5971

Joan Manuel Montealegre Hermosa
Mg. Ingeniería Ambiental y Proyecto Ondas MinTic Usco

Correo electrónico: joan.montealegre@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6956-3783

Jasmidt Vera Cuenca
Doctorado Complejidad y Profesora Titular Usco

Correo electrónico: jasmidt.vera@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8965-0661

Resumen

Desde las ciencias de la complejidad el modelado matemático en los procesos la educativos privilegian la inteligencia emocional para comprensión y la autoestima; reconocen inestabilidades, aberturas, indeterminaciones y coevoluciones; identifican propiedades emergentes con estructuras autonómicas como "rizomas" o "fractales", rupturas, fluctuaciones y (De)construcciones; evidencian incertidumbres auto organizativas, entre flexibilidad y plasticidad cognitivas, que contribuyen al aprendizajes para la comprensión.

Palabras clave: **Ciencias de la Complejidad, aprendizaje comprensivo, redes complejas, incertidumbres lejos del equilibrio, auto organización adaptativa, modelos bioinspirados, currículos no lineales.**

Abstract

From the standpoint of complexity science, mathematical modeling in educational processes prioritizes emotional intelligence for understanding and self-esteem; it acknowledges instabilities, openings, indeterminacies, and co-evolutions; it identifies emergent properties with self-organizing structures such as "rhizomes" or "fractals," along with ruptures, fluctuations, and (de)constructions; and it highlights self-organizing uncertainties—between cognitive flexibility and plasticity—that foster learning for understanding.

Keywords: Complexity Science, understanding-oriented learning, complex networks, far-from-equilibrium uncertainties, adaptive self-organization, bio-inspired models, nonlinear curricula.

1. Introducción

Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, Maldonado[1] (2021). Más exactamente, de la vida tal y como la conocemos y tal y como podría ser posible. Los sistemas vivos se caracterizan por su capacidad de creatividad y aprendizaje incesante. Más exactamente, se trata de fenómenos, sistemas y comportamientos de complejidad creciente, auto organizativos y con emergencias evolutivas, libres de escala y factibles de simulaciones, Maldonado y Gómez[2], (2018). Las ciencias de la complejidad se interesan por fenómenos y sistemas irreversibles, indeterminados, inestables, inciertos e interdefinibles; naturaleza y cultura.

En este contexto los aprendizajes deben vincular, en todos los ambientes, las motivaciones legítimas para la vida de las personas e incentivar su complejidad comprensiva, Montealegre M. y Vera J.[3] (2022). Esto en contravía del reduccionismo memorístico que hoy tienen en crisis estos procesos, resultados de las Pruebas Pisa 2022[4].

Los ámbitos de la pedagogía comprensiva son interdisciplinares, Piaget J. y García R.[5](1982), y favorecen procesos irreversibles, indeterminados, interdefinibles y en procura de hallazgos sorprendentes, creando capacidades desequilibrantes lejos del equilibrio, Maldonado, C. E.[6] (2014).

---

1 Maldonado, Carlos (2021). Las Ciencias de la Complejidad son Ciencias de la vida. Trepen Ediciones, Chile.

2 Maldonado, Carlos y Gómez, Nelson (2018) El Mundo de las Ciencias de la Complejidad

3 Montealegre M. y Vera J. (2022). Hacia la Pedagogía de la Complejidad. Revista Ciencias de la Complejidad.

4 Men Colombia, Pruebas PISA 2022: Colombia, un sistema educativo resiliente que requiere cambios estructurales para mejorar su calidad

5 Piaget J. y García R.(1982) Psicogénesis e Historia de la Ciencia, Siglo XXI

6 Maldonado, C. E. (2014). ¿Qué es eso de pedagogía y educación en complejidad? Debate Teórico-Metodológico, 1,

En esta vía el modelado matemático bioinspirado basado en agentes, Mitchell. M.[7] (2012), trascienden las representaciones de las fronteras borrosas de fenómenos sociales y naturales, soporta indagaciones retadoras entre habilidades lingüísticas y pensamiento matemático computacional, por ejemplo, con fractales o autómatas. Los métodos del aprendizaje comprensivo se involucran con redes complejas que interactúan de abajo hacia arriba y expresan interdependencias entre lo socio, tecno y cultural, Reynoso, C.[8] (2011).

Esto invita al ejercicio de currículos no lineales, adaptativos y autoorganizados en el tratamiento de problemas macros y la emergencia de aprendizajes significativos es debida acción de la incertidumbre: laberintos, metáforas, paradojas y autopoiésis, tal como se practica en *las matemáticas para la creatividad*, Montealegre, M.[9] (2013).

2. MODELIZACIÓN COMPLEJA DE FENÓMENOS NATURALES Y SOCIALES

Los sistemas reales son abiertos en los cuales se construye la interdisciplinariedad, se mantienen viables si importan energía desde su entorno próximo y exportan entropía hacia él. Se trata, en palabras del Premio Nobel ruso belga Ilya Prigogine[10], de *estructuras disipativas*. Cuanto más compleja sea una estructura funcional es más coherente y más energía necesita para mantener todas sus conexiones, más vulnerable es a las fluctuaciones internas y/o perturbaciones externas. Se dice entonces que el sistema es más *inestable* y que evoluciona lejos del equilibrio, G.Nicolis and I. Prigogine (1989)[11].

El término *estructura disipativa* busca representar la asociación de las ideas de orden y disipación. El nuevo hecho fundamental es que la disipación de energía y de materia suele asociarse a la noción de pérdida y evolución hacia el desorden, Agudelo, G. y Alcalá R. (2005) [12].

Las estructuras disipativas corresponden a la inestabilidad térmica modelada con la celdas de Rayleigh Bénard, Ruelle D. (2023)[13]. La complejidad del no equilibrio corresponden a los

---

7 Mitchell. M. (2012). Biological computation. The Computer Journal, 55(7), 852-855.

8 Reynoso, C. (2011). Redes Sociales y Complejidad. Universidad de Buenos Aires

9 Montealegre, M. (2013). Matemáticas para la creatividad del I al V, Tiempos Ecológicos, Colombia

10 Prigogine, I. (1998). El fin de las certidumbres, Andrés Bello. Andrés Bello, Chile.

11 G.Nicolis and I. Prigogine (1989). Exploring Complexity. W H Freeman & Co

12 Agudelo, G. y Alcalá R. (2005). Las estructuras disipativas en la evolución.

13 Ruelle, D. (2023). A Review of differentiable dynamical systems, IHES France.

procesos irreversibles asociados a la flecha de tiempo y desempeñan un papel constructivo en la naturaleza, como se ilustra en la siguiente gráfica.

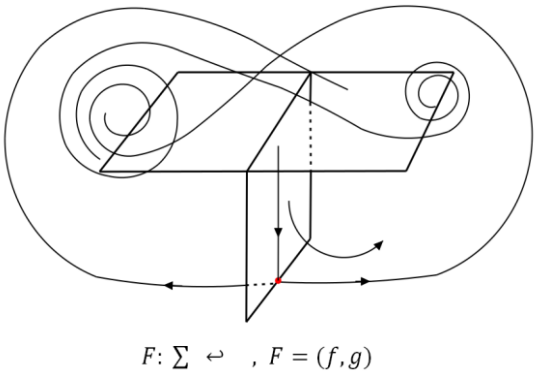


Figura 1. Complejidad del no equilibrio

La auto organización es la forma a través de la cual el sistema recupera el equilibrio, modificándose y acoplándose cada vez más estrechamente con su entorno próximo. Las interrelaciones entre los elementos de un nivel originan nuevos tipos de elementos en otro nivel. Cada nuevo estado es sólo una transición al *reposo entrópico*, y la complejidad de los sistemas auto organizado de Ashby[14] (1956) corresponden a la entropía.

Intermitencia es otra característica de los sistemas disipativos, significa que el caos surge del orden sino también que el orden puede surgir en el caos, por ejemplo los números irracionales son números de complejidad infinita que aparecen dentro del sistema regular de números racionales. También La aleatoriedad y complejidad infinitas para efectos prácticos son lo mismo, se puede decir que la pura aleatoriedad es lo mismo que la información infinita.

Los sistemas adaptativos complejos de la naturaleza o la sociedad son aquellos en los cuales la incertidumbre es importante para comprender que el sistema aprende. Un sistema real es *no-lineal*, además es "*complejo*", dado que está compuesto por una gran cantidad de elementos, cada uno de los cuales interacciona con sus vecinos relativamente inmediatos y es muy difícil vaticinar lo que ocurrirá más allá de un cierto horizonte temporal. Por último, en general un sistema real es *"adaptativo"*, ya que no sólo es influido por el medio ambiente sino que reacciona y se adapta. Pero la capacidad para adaptarse tiene límites, si el sistema no puede acomodarse a tales afectaciones, su estructura puede transformarse de manera parcial o total, temporal o permanente, lo cual depende tanto de la organización y la comunicación con su entorno.

Similarmente la construcción cultural del pensamiento interdisciplinario es entendido

14 Ashby, W. R. (1956). An Introduction to Cybernetics. In London: Chapman & Hall Ltd.

a través de procesos como *auto-construcción y auto-producción, es decir autopoiésis* Maturana[15] (2003) y vistos desde la biología[16]. Significa diferenciación de los sistemas sociales en términos de la *función* que realizan dentro de la dinámica social, Luhmann, N. (1990)[17]. Las ciencias sociales, desde las ciencias de la complejidad son ciencias del no equilibrio[18], ciencias generativas epigenéticas, susceptibles de modelizar y simular con lógicas no clásicas. Así podemos abordar la gestión de complejidad creciente en las organizaciones Etkin[19] (2005), con estrategias flexibles y adaptables para comprender situaciones irreversibles, inestables, inciertas e interdefinibles que no se pueden conocer desde el reduccionismo.

Las organizaciones son vistas como sistemas adaptativos complejos, Bohórquez Arévalo (2013)[20]. De igual maneras se adaptan continuamente en redes, la tecnología, la competencia y las dinámicas internas. Se reconoce la importancia de la interconexión y la retroalimentación en la toma de decisiones, buscando comprender cómo las interacciones entre componentes de diverso nivel de una organización contribuyen a la emergencia de patrones comportamentales, Lorenzón E.(2020)[21].

El enfoque eco-evo-devo de Carrol[22] S.B. (2005) y Sapp and Tauber[23] (2012), articulan la ecología con la evolución epigenética, Jablonka[24] y Lamb (2005). Así se propone un vínculo radical entre la biología, la cultura y el desarrollo para superar la comprensión de las transformaciones ecosistémicas desde las características sólo genotipos-fenotipos para soportarlas en lo genético y cultura, Maldonado[25] C.E. (2019), expresado en lo cognitivo, comportamental y emocional.

Los Sistemas adaptativos complejos corresponden a los fenómenos ambientales,

15 Maturana, H. y Varela F. (2003). El árbol del conocimiento, bases biológicas del entendimiento humano. Lumen, Buenos Aires.

16 Méndez I. E. Carvajal B.M. (2029). Una mirada a los fundamentos biológicos de la educación desde la teoría de Santiago. Universidad de Camagüey, cuba.

17 Luhmann, N (1990). Sociedad y Sistemas: La ambición de la teoría, U.A. de Barcelona.

18 Nicolis, G. y Prigogine, I. (1977) Self Organization in Nonquihbrium Systen Wiley, New York.

19 Etkin, J. R. (2011). Gestión de la complejidad en las organizaciones: la estrategia frente a lo imprevisto y lo impensado. Ediciones Granica, Buenos Aires.

20 Bohórquez Arévalo, L. E. (2013). A organização empresarial como sistema adaptativo complexo. Estudios gerenciales, 29.

21 Lorenzón, E. E. (2020). Sistemas y organizaciones. Libros de Cátedra.

22 Carrol S.B. 2005. Endless Forms most beautiful, science of evo devo. WW Norton &co.

23 Sapp, J. & Tauber, A. I. (2012) A symbiotic view of life: we have never been individual, Rev. Biol. 87.

24 Jablonka E. & Lamb, M. J. 2005. Evolutions in four dimensións: genetic, epigenetic, behavioral and symbolic variation in the history of life. Cambridge Mass: MIT Press

25 Maldonado, Carlos 2019. La Epigénetica y la transformación radical de la biología, U. El Bosque.

económicos, organizacionales, evolutivos y coevolutivos, en los cuales la criticidad auto organizativa ocurre en el borde del caos y que explican experimentos físicos como la formación de tornados o láseres, químicos como estructuras disipativas, biológicos como reacciones básicas del metabolismo, formales como los que se representan en las redes booleanas y autómatas celulares, Solé, RV y Goodwin, B. (2000)[26].

Los sistemas ambientales son auto organizativos y corresponden adaptaciones a la naturaleza de los sistemas dinámicos (Kampis[27] 1991). Sistemas que pueden auto modificarse produciendo nuevas expresiones fenotípicas, derivando estrategias de mitigación y adaptabilidad, Gallopín (2006)[28]. Por lo tanto los parámetros y las variables son definibles sólo a posteriori Thom[29] (1983) y Schrödinger (1944)[30]. Por ello autores como *R. B. Laughlin*, premio Nobel de Física en 1998[31], afirman que vivimos una época en la que la tendencia reduccionista ha terminado.

Según Murray Hell Mann[32], Instituto Santa Fé y premio nobel de física 1969, de la mayor auto organización neguentrópica el cambio climático es un sistema simbólico abstracto, que mezcla su condición evolutiva con aspectos del mundo físico y con creencias relacionados con la cultura del siglo XX. Murray Gell Man identifica algunas señales para acelerar una transformación cultural para aproximarnos colectivamente a la construcción de una sociedad con menos emisiones de carbono.

Los modelos matemáticos de J. Holland (2004) integran procesos resilientes y adaptativos frente al reto de la sostenibilidad ambiental, en particular los procesos emergentes de la variabilidad climática que conducen sistemas auto-organizadas con funciones cruzadas en ciclos adaptativos: exploración, conservación, liberación y reorganización, Holling C.[33] (2011) sobre ciclos que refleja los cambios en el proceso de adaptación.

26 Solé, RV y Goodwin, B. (2000). Señales de vida: ¿Cómo la Complejidad impregna la Biología?.

27 Kampis, George. 1991. Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science: A New Framework for Dynamics, Information and Complexity. Vol. 6. Elsevier.

28 Gallopín, G.2006. Linkages Between Vulnerability, Resilience, and Adaptive Capacity. Naciones Unidas.

29 Thom, René. 1983. Mathematical Models of Morphogenesis. Ellis Horwood.

30 Schrödinger, Erwin. 1944. ¿Qué Es La Vida? Tusquets.

31 Laughlin, R.B. (2007). Un universo diferente, reinvención de la física. Katz Editores, Buenos Aires.

32 Gell-Mann, Murray, 2007. El quark y el jaguar, Editorial Tusquets, Barcelona.

33 Holling, C. 2011. Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*

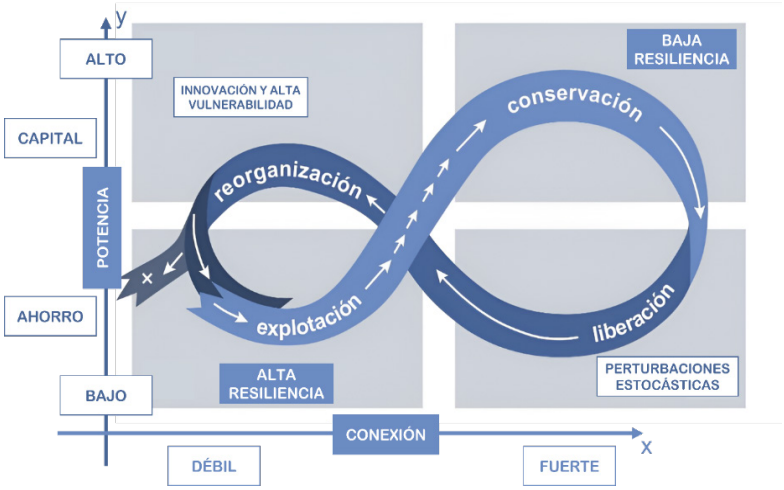


Figura 2. Bucle adaptativo bioeconómico

Recientemente los premios Nobel de Física 2021, George Parisi, Syukuro Manabe y Klaus Hasselmann[34] han hecho contribuciones innovadoras para comprender desde la complejidad el clima de la Tierra, su variabilidad y predicción del calentamiento global.

La pérdida de resiliencia ecológica pone a prueba la capacidad de adaptación de la dimensión humana del sistema, así lo advierte las Naciones Unidas panel de expertos en Sustentabilidad Global, "*Personas Resilientes, Planeta Resiliente: el futuro que queremos*", Walker et al[35] (2006), IPBES[36] y en los Objetivos Del desarrollo Sostenible, ODS[37]. Montealegre, M. Montealegre J. y Vera J.[38] (2024) proponen procesos de modelamiento para la sostenibilidad Ambiental, MAPI3 UIS.

En la perspectiva termodinámica surge la economía ecológica de Georgescu-Roegen (1971)[39] , quien mediante la aplicación de la *Ley de la Entropía* inicia un nuevo campo de investigación de las relaciones entre economía, las ciencia caos y de la incertidumbre de estos biosistemas abiertos y complejos lejos del equilibrio termodinámico, Enrique Leff

34 Nobel de Física 2021, George Parisi, Syukuro Manabe y Klaus Hasselmann

35 Walker et al (2006). Exploring Resilience in Social-Ecological Systems Through Comparative Studies and Theory Development.

36 https://www.ipbes.net/

37 ODS 2015. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas.

38 Montealegre, M. Montealegre J. y Vera J. (2024). Modelamiento de la sostenibilidad Ambiental, MAPI3.

39 Georgescu-Roegen, Nicholas, 1971. La ley de la Entropía y el proceso económico, Universidad Católica del Ecuador.

(2009)[40]. También Martyushev, L.M. (2003)[41] y Anzola, D. (2017)[42] se refieren a esta auto organización entrópica-antrópica en la biosfera con la metáfora de trama de la vida, Capra F (2003)[43].

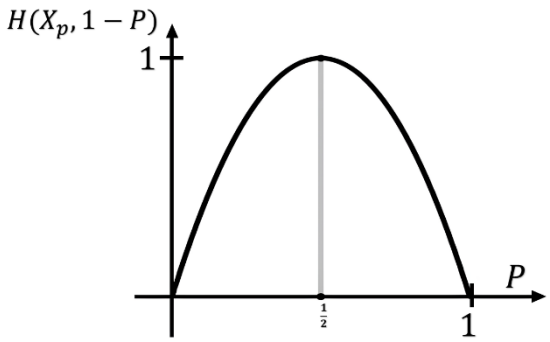


Figura 3. Modelo de entropía

También los modelos de inteligencia de enjambres explican los patrones de comportamiento social observados en bandadas de pájaros, cardúmenes de peces o enjambres de abejas que proporcionan un marco para explorar la resolución de problemas distribuidos sin control centralizado, Hong Bo y Ajith A. (2009)[44]. Un tipo de estos sistemas es el de *Pasteels*[45] *(1989)*, quien trabajó con colonias de hormigas, observando que cuando el número de hormigas es pequeño tienden a ir todas a la misma fuente de alimento llegando a un número crítico de hormigas denominado punto de bifurcación que trasciende las partes de las que se encuentra formada. Estas emergencias funcionan *de abajo hacia arriba* al igual que lo hacen las ciudades, las colonias de hormigas y el internet, Steven Johnson[46] y Resnick, M[47]. (2001), ganando capacidad de adaptación y orden similar a las organizaciones sociales.

Los modelos de la teoría de juegos abordan decisiones estratégicas referentes a los

40 Leff, Enrique (2009), Ecología, Capital e Cultura: a Territorialização da Racionalidade Ambiental. Editora, Petrópolis, Brasil.

41 Martyushev, Leonid M. 2023. Old Misconceptions and New Breakthroughs, Entropy Production, Entropy.

42 Anzola, D. (2017) Self-organization and Social Science, Computational and Mathematics Organization Theory

43 Capra F (2003). The web of life

44 Hong Bo Liu y Ajith Abraham, 2009. Chaos and Swarm Intelligence, School of Computer Science China.

45 Pasteels, J. M., Daloze, D.; Aldehydic (1989). Alarm pheromone of the ant Crematogaster, Journal of chemical ecology, 15.

46 Jhonson, Steven; Los Sistemas Emergentes; Fondo de Cultura Económica, 2009.

47 Resnick, Mitchel (2001). Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico.

disfrute de los bienes comunes, en particular los juegos cooperativos contra la naturaleza procuran equilibrios óptimos entre las acciones de los agentes socio-ecológicos, Neyman A. Sorin, S.(2003)[48].

3. REDES COMPLEJAS: PROCESOS SOCIO, TECNO, CULTURALES

La ciencia de las redes identifica propiedades universales fruto de su caracterización topológica, Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang[49] (2006). Ver figura siguiente.

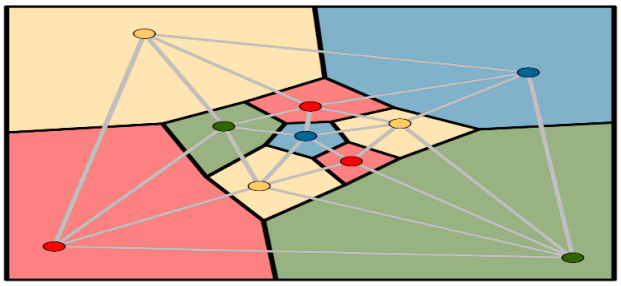


Figura 4. Redes complejas: procesos socio, tecno, culturales

En las Ciencias Sociales y humanas se modelan con la topología de las ciencia de las Redes Complejas[50], uno de los desarrollos de las ciencias de la complejidad.

Las redes Complejas son una especie de modelado *botton to up* que permite pasar de los niveles individuales a las agrupaciones, Reynoso, C[51]. (2011); en Newman[52] (2003), se relacionan la mayoría de las contextualizaciones de redes complejas realizadas, hasta la fecha, en diferentes campos del conocimiento. La trama de la vida es un ejemplo muy ilustrativo de las redes complejas ambientales[53].

Al respecto, las redes complejas tienen cuatro categorías: redes de apego preferencial ligados a fenómenos de distribución de Pareto $P(X) \sim x^{-k}$; redes aleatorias, Alfred Rényi

48 Neyman, A., Sorin, S., editors (2003), Stochastic Games and Applications, Kluwer, Dordrecht.

49 Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang (2006). Complex networks: Structure and dynamics, Physics Reports, V. 424

50 https://gephi.org/

51 Reynoso, C. (2011). Redes Sociales y Complejidad. Universidad de Buenos Aires.

52 Newman, M. (2003). The structure and function of complex networks. SIAM review, 167-256.

53 https://www.youtube.com/watch?v=6XSt1ZVSX50 . Fritjof Capra, Una nueva forma de pensar la vida: ciencia, redes y sistemas vivos.

Paul Erdös[54] (1959); redes libres de escala Barabási, A-L. & Albert, R[55]. (1997); redes del mundo pequeño, Duncan Watts D. and Strogatz S[56]. (1998).

Ahora se presentan dos modelos de redes que tienen una conexión natural, el primero de ellos, el modelo de redes aleatorias de Paul Erdös y Alfred Rényi junto con el modelo de redes de mundo pequeño de Duncan Watts y Steven Strogatz. En últimas se hace una corta reseña del software libre Gephi como una de las herramientas de mayor soporte y distribución en el modelado y análisis de redes.

Un grafo aleatorio es, tal como el termino puede sugerir, una red de vértices conexos por enlaces de un modo puramente aleatorio" (Watts,2006). o como el conjunto de botones que el biólogo estadounidense Stuart Kauffman (1939–) concibió, en ese sentido, "imaginemos que vaciamos una caja llena de botones en el suelo y luego nos dedicamos a escoger pares de botones al azar y los unimos unos con otros con hebras de hilo de longitudes apropiadas ver Figura. Finalmente, el resultado es un grafo aleatorio.

La expresión redes libres de escala (scale-free net-works) fue ideada por Barabási las redes de este tipo aparecen en el contexto lógicos y materiales más disimiles, Barabasi y Bonabeau,2003. Además, la red libre de escala permite conciliar el hecho que muchas redes reales presentan conglomerados o clústers jerárquicos.

Otras propiedades de las redes L.E son un desafío en el sentido común es decir, aún hay discusiones sobre el valor de en el termino de la ley de potencia, tiende a caer entre 2 y 3, según su estructura cualquier nodo está conectado con cualquier otro con muy pocos grados de separación : alrededor de seis cuando los nodos son uno cuantos cientos de miles y no más de diecinueve entre cualesquiera de los 4000 millones de la página web(Reynoso, 2008)

El uso recurrente de las redes en el desciframiento del mundo real, utilizan específicamente la definición de grafo, pues su generalidad representa quizás la mayor fortaleza del estudio de las redes, debido a que topológicamente dos sistemas completamente distintos pueden poseer estructuras similares que a su vez permiten encontrar características aparentemente universales en la mayoría de las redes, como por ejemplo el fenómeno del mundo pequeño y la distribución de grados libres de escala, por citar algunos, lo cual posibilita la segmentación de las redes a partir de propiedades comunes. Del mismo modo, conviene citar la categorización de las redes sugerida por Mark E. J. Newman[57] (Newman, 2003), la cual reúne y agrupa la mayoría de las investigaciones realizadas hasta ese momento desde diferentes áreas del conocimiento en cuatro grupos: redes sociales, redes

54 Erdős, P.; Rényi, A. (1959). On Random Graphs. Publicationes Mathematicae 6: 290–297

55 Barabási, A.-L., Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. Science, 286(5439), 509-512. https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509

56 Duncan J. Watts* & Steven H. Strogatz (1997). Collective dynamics of 'small-world' networks. Cornell University.

57 Newman, M. (2003). The structure and function of complex networks. SIAM review, 167-256.

de información, redes tecnológicas y redes biológicas; siendo el primer grupo el de mayor interés para nuestros objetivos.

4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO EN EL APRENDIZAJE COMPRENSIVO

Los procesos educativos desde la complejidad privilegian la inteligencia emocional para comprensión y la *autoestima*; reconociendo inestabilidades, aberturas, indeterminaciones, coevoluciones, verdad y poder, Foucault M.[58] (1987); la emergencia de estructuras *autonómicas* como "*rizomas*" o "*fractales*"; los desequilibrios afectados por rupturas y fluctuaciones, que se reconocen en las (*De*)construcciones, Derrida J.[59] (1995). Son las organizaciones de Capra F.[60] (2003) en la educación para vida, entre flexibilidad y plasticidad cognitiva Piaget J.[61] (1982); son juegos estratégicos entre emociones y razones (Bateson, 1979); son aleatoriedad y certeza, Shannon C.E. y Weaver, W.[62] (1949); inestabilidad y catástrofes, Thom R.[63] (1983), ver figura siguiente.

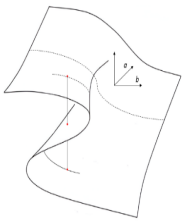


Figura 5. Sistemas complejos inestables

Los retos para una educación desde la complejidad suponen asumir posturas abiertas, creativas e innovadoras como aprendizajes laberíntico propuesto por Colom A.J.[64] (2002), aprendizajes metafóricos relacionados con la comprensión, Perkins D. et.al.[65] (2014); entre la diferenciación e integración de los aprendizajes autopoiéticos, Maturana H. y

58 Foucault, M. (1987). Saber-poder. Paidos Buenos Aires.

59 Derrida, J. (1995). El lenguaje y las instituciones filosóficas. 1–78. papers3://publication/uuid/B96905AB-F056-44B3-9F43-56E00109764F

60 Capra, F. (2003). La trama de la vida. Editorial Anagrama, Barcelona.

61 Piaget, J (1982). Epistemología Genética. Editorial Debate, Brasil.

62 Shannon, C. E. y Weaver, W. (1949). The Theory of Mathematical Communication. International Business, 131.

63 Thom, R. (1983). Mathematical models of morphogenesis. Ellis Horwood.

64 Colom, A. J. (2002). (De) construcción del conocimiento pedagógico: perspectivas en teoría de la educación. Barcelona: Paidós.

65 Perkins, D. et.al. (2014). Hacer visible el pensamiento. Cómo promover el compromiso, la comprensión y la autonomía del estudiante. Buenos Aires: Paidós.

Varela F.[66] (1999). Pues desde paradigma de la complejidad el fenómeno educativo es emocional, flexible e incierto, o como lo caracteriza Morin E.[67] (2005) : El error y la ilusión, conocimiento pertinente, dimensión humana, individuo – sociedad – especie, identidad terrenal, conciencia de los riesgos y la comprensión

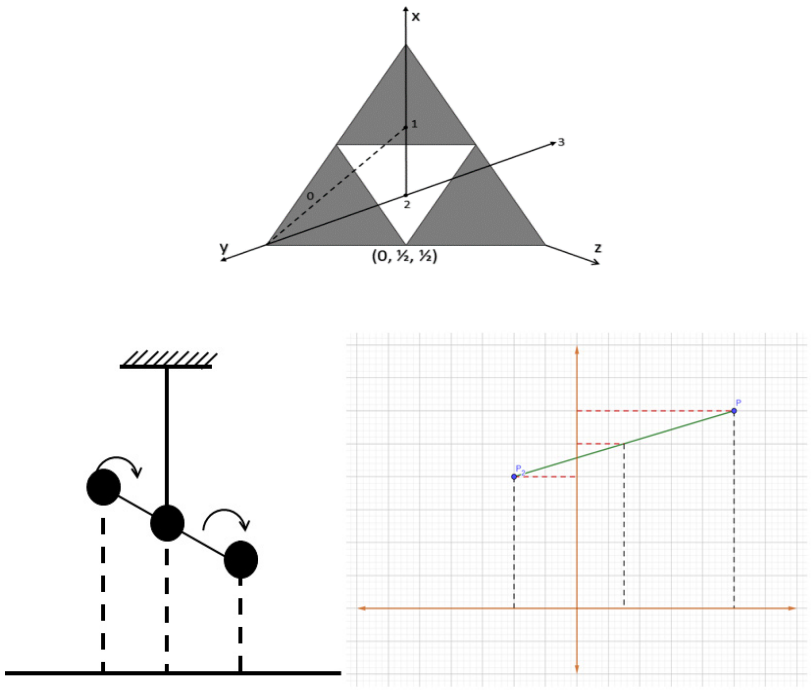


Figura 6. Aprendizaje Interdisciplinar

En el sistema educativo debe formar para lo desconocido, Perkins D.[68] (2017), *interpretar las formas en que las personas se encuentran conductualmente.* Superar el ejercicio de las disciplinas fragmentadas, métodos reduccionistas y descontextualizados y por ello poco pertinentes. La educación debe facilitar procesos para superar fronteras disciplinares, Piaget J. y García R.[69] (1982), como lo sustenta Bassarad,N.(2002)[70] en lenguaje contemporáneo sobre teorías estructuralistas de Piaget J. y Vygotski L[71]. (1996). Se constituyen estructuras de abajo hacia arriba y que funcionen como una totalidad auto organizada, un sistema interdisciplinar complejo, Maldonado C.E.[72] (2024): formar seres

66 Maturana, H. y Varela, F. (1999). El Árbol Conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano.

67 Morin, E. (2005). Los siete saberes necesarios para la educación del futuro. UNESCO, 122

68 Perkins, D. (2017). Educar para lo desconocido, Ediciones SM, Madrid

69 Piaget J. y García R.(1982) Psicogénesis e Historia de la Ciencia, Siglo XXI. http://books.google.com/books?id=OP_46cTPf8MC&pgis=1

70 Bassarab, N. (2002) Manifiesto de la Interdisciplinariedad, La Habana.

71 Piaget, J. y Vygotski, L. (1996). Biología y conocimiento. *Academia*

72 Maldonado, C. E. (2014). ¿Qué es eso de pedagogía y educación en complejidad? *Debate Teórico-Metodológico, 1, 1–23.*

humanos autónomos y libres complejizando la educación; desde este abordaje se rompe con los conceptos tradicionales de adquisición de conocimiento, enseñanza, aprendizaje, autoridad, disciplina, asignaturas, currículo, programas y evaluación.

El inicio de la investigación sobre aprendizajes es siempre la abducción, es la hipótesis la que indica qué experimentos hay que hacer, adónde hay que mirar, Godino J.[73] (2003) y Pierce C.[74] (2008); es el razonamiento propio del pensamiento infantil que orienta las didácticas del aprendizaje basados en las preguntas laberínticas y que intuitivamente desbordan las disciplinas, Fischbein E.[75] (1987). Los razonamientos inductivos, heurísticos y deductivos son derivas naturales de estas abducciones, Tall D.[76] 1996).

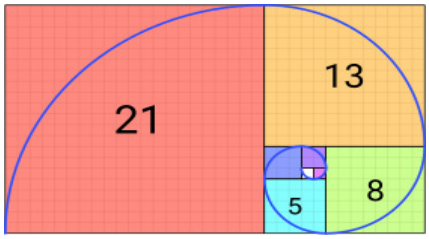


Figura 7. Razonamiento interdisciplinar

Por supuesto también se cuestiona y (de)construye la organización escolar que le daba forma material a todas esas concepciones, Davis y Sumara[77] (2006), pues las oportunidades y ambientes de aprendizajes son más enriquecedores fuera de los contextos del aula. En particular la metáfora de aprendizajes no lineales en el borde caos modelizado por Bak P.[78] (1996) soportan la creatividad más allá del patrimonio de los artistas; construye redes complejas involucrando emergencias recreativas y lúdicas y con necesarios márgenes de libertad.

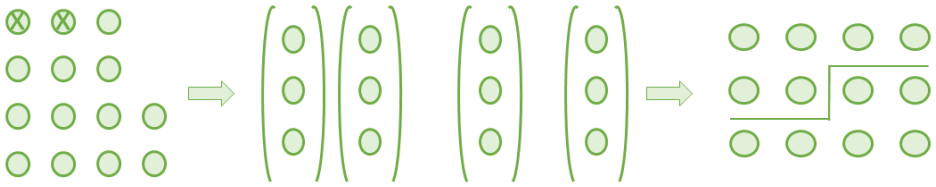


Figura 8. Experimento aritmética articulada

73 Godino, J. (2003). Teoría de las funciones semióticas. U. de Granada.

74 Pierce, C. (2008). Pragmatismo. Ediciones Encuentros, Madrid.

75 Fischbein, E. (1987). Intuition in science and mathematic. Dordrecht Reidel.

76 Tall, D. (1996). Advanced Mathematical Thinking Computer. Education Warwick.

77 Davis, B. y Sumara, D. (2006). Complexity and Education Inquiries Into Learning, Teaching, and Research. https://doi.org/10.4324/9780203764015

78 Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Copernicus*. www.natureworks.com

Desde esta perspectiva involucramos currículos que evolucionan de una organización fragmentada en disciplinas, hacia una concepción no lineal, orgánica, comprensiva y holista, J. Prigogine y Strenger[79] (1989). Como lo propone Badilla Saxe E.[80] (2009), con currículos no lineales a partir de grandes ideas de Beane J. AA[81] (2000) y del método pedagógico de proyectos para resolver problemas, Dewey J[82] (2013). Interactuar con la emergencia de la complejidad en educación, Mason M. [83] (2008) reconociendo la diversidad, interacciones próximas, coherencia y control autoorganizativo. Mediar para que el aprendizaje se realice a través de la indagación, el pensamiento creativo a través de preguntas abiertas con múltiples interpretaciones, hallazgos sorprendentes: sino no hay sorpresa no hay aprendizaje.

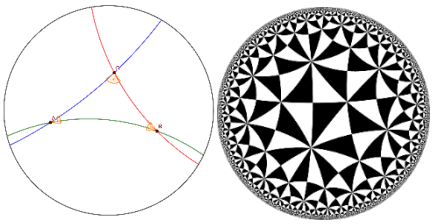


Figura 9. Modelo emergencia de estructura geométrica

El pensamiento crítico es pensamiento aplicado , Lipmann M[84] (1998), implica usar el conocimiento para producir un cambio razonable se distingue entre un pensamiento implicativo y pensamiento ampliativo. El primero, ejemplificado por la deducción, extiende nuestro pensamiento sin ir más allá de la información y el segundo ejemplificado por la inducción, la analogía y la metáfora.

Precursores del pensamiento crítico como Perkins D and Swartz R.[85] (2016) promueven la comprensión profunda que transciende la memorización. Son estrategias del pensamiento crítico: presentar modelos, retroalimentación, facilitan lecturas comprensivas y preguntas desafiantes. Por ejemplo el siguiente modelo del archipiélago de los fraccionarios.

79 Prigogine I. and Stenger (1990). La nueva alianza. Alianza Editorial, Madrid.

80 Badillo, E. (2009). Deseño Curricular: De la integración a la Complejidad. Universidad de Costa Rica.

81 Beane J. A. (2000) Curriculum Integration and the Disciplines of Knowledge. University of Nebraska.

82 Dewey, J. (2013). The Child and the curriculum. Z y L Barnes Publishig

83 Mason, M. (2008). Complex theory and the Philosophy of education. Wiley-Blakwell

84 Lipman, Mattheu 1998, El lugar del pensamiento , Octaedro Editorial.

85 Perkins, D, and Swartz R, 2016. Teaching Thinking. Ruetledge New York.

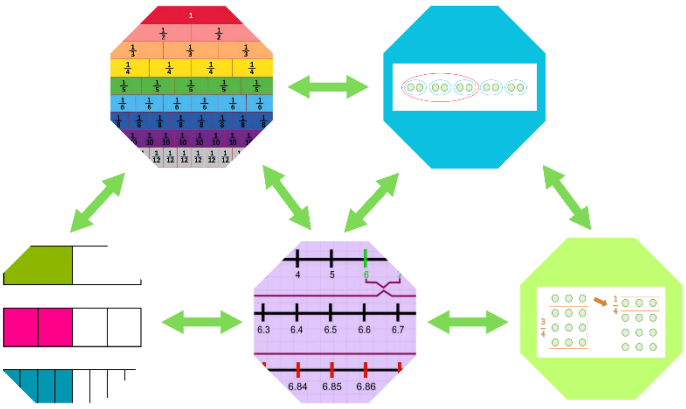


Figura 10. Archipiélago de los fraccionarios

La educación *axiológicamente* desarrolla conciencia en libertad en contexto abiertos y autoorganizados en el borde del caos Kauffman S.[86] (2000), así que las organizaciones transitan entre orden y desorden con acciones liberadoras, Freire P.[87] (1994). Dicho de otra manera, auto-eco-organizados como es descritas por Bateson, G.[88] (1979). Son interacciones entre procesos singulares y regulares; entre conocimientos locales y globales; abordajes educativos para el rescate de soluciones impensables a los problemas inciertos.

Foerster, H.V.[89] (2006) describe estos procesos mediante la metáfora de máquinas no-triviales, y = F (x, z) Función motriz y z'= Z (x, z) Función de estado. Resalta la importancia del método de las preguntas no triviales abiertas en contextos simbólicos, Chomsky N.[90] (1989),e interactivos, con motivaciones para el pensamiento computacional e el modelado matemático, Neumann, J. V.[91] (1958). De ahí la interrelación indistinguible entre habilidades linguísticas interdefinidos con el pensamiento matemático.

86 Kauffman, S. (2000). Investigations. Oxford University Press.

87 Freire, P.; Pedagogía del oprimido México; Ed. Siglo XXI; 1994.

88 Bateson, G. (1979). Heteroaprendizajes, espíritu y naturaleza. *Palo Alto.*

89 Foerster, H. Von. (2006). Las semillas de la cibernética. Barcelona: Gedisa

90 Chomsky, N. (1989). El conocimiento del lenguaje, su naturaleza. *Madrid, Alianza*

91 Neumann, J. Von. (1958). *The Computer and the Brain New.* Yale University Press.

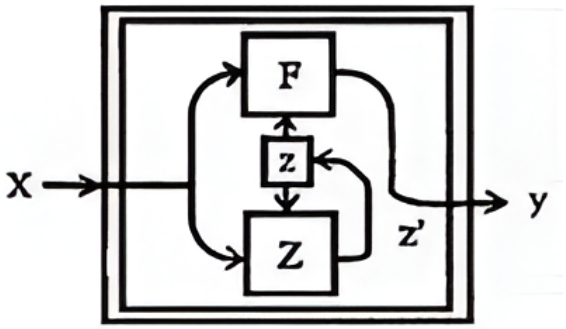


Figura 11. Modelo Cibernético

En la vía del empoderamiento de los aprendizajes, Montealegre M. y Vera Jasmidt[92] (2022) y Martha Nussbaum[93] (2012), investigan cómo se construyen capacidades, que en contextos de Neuropedagogía Smith[94] (2019) y su articulación con la metacognición, Brown & Jones[95] (2020); sugieren a los educadores para que participen de los retos actuales sobre autorregulación y su relación significativa con la afectividad, Flavell[96] (1977). Los aprendizajes significativos, Ausubel et al.[97] (1978), desarrollan habilidades para la metacognición, que es esencial para el establecimiento de metas, selección de estrategias y evaluación motivadora. La gestión de la metacognición a través de la estrategia de la resolución de problemas no depende de la posesión de un gran bagaje de conocimiento, sino en juegos de roles con diversas estrategias cooperativas; creatividad por asombros; libertad y autonomía.

La complejidad como ludopatía, Maldonado C.E.[98], supera el dualismo entre mente y materia, Batenson G.[99] (1972), Ciencias Naturales y humanidades, Snow C[100]; corresponden interacciones entre filosofía, ciencia, arte y tecnología y humanidades. En efecto Deleuze-Guattari[101] [1991] definen el pensamiento en sus tres grandes formas: la Ciencia, el Arte y la Filosofía, maneras indistinguibles de afrontar el caos, lo infinito y lo indiscernible

92 Montealegre M. y Vera J. (2022). Hacia la Pedagogía de la Complejidad. Revista Ciencias de la Complejidad.

93 Martha N. (2012). Crear capacidades propuesta para el desarrollo humano. Ediciones Paidos, Barcelona.

94 Smith, A. (2019). The Role of Neuropedagogy in Teacher Training. Journal of Educational Research 43.

95 Brown, T. L., & Jones, S. W. (2020). Fostering Metacognition in the Classroom: Opportunities and Challenges. Educational Psychology Review, 32.

96 Flavell, J. H. (1977). Cognitive development. Prentice-Hall.

97 Ausubel, D. P., Novak, J. D. y Hanesian, H. (1978). Educational Psychology: A Cognitive Vie

98 Carlos Eduardo Maldonado (2024). Estética de la Complejidad. Desde Abajo, Bogotá D.C.

99 Bateson, G. (1972). Pasos hacia la ecología de la mente, una aproximación revolucionaria de la autocomprensión del hombre. Lohlé-Lumen, Buenos Aires

100 Snow, C.P.(1965). Les dues cultures i la revolució científica. Edicions 62. Barcelona

101 Deluze, G. y Guttari, F. (1991). ¿Qué es la filosofía?. Miruil, Paris.

modelado en la paradoja de Zenón.

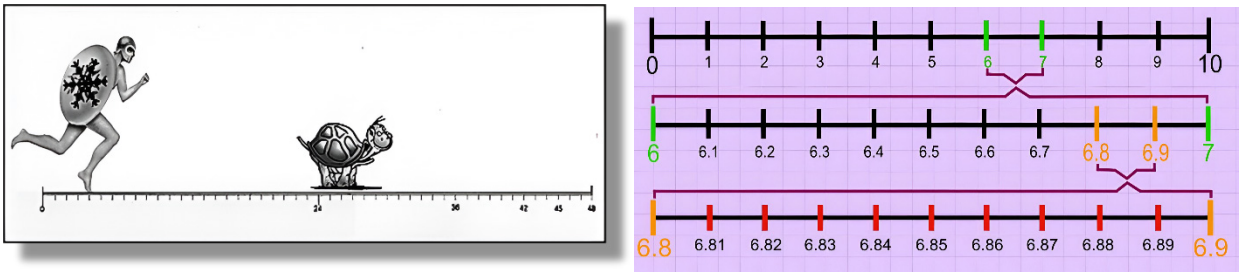


Figura 12. Paradoja de Zenón

Recientemente se está construyendo el modelo STEAM integrado Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas como un campo multidisciplinar y permite abordar los desafíos que plantea la compleja realidad social, científica y tecnológica de estos tiempos. Los procesos centrados en el STEAM requieren la implementación de metodologías activas y la combinación de inteligencias con el fin de posibilitar la solución creativa y diversa a los problemas, Laudan[102] L. (1984). Se avizora que los resultados de este método será notablemente más relevantes que los derivados de las metodologías tradicionales. Los procesos centrados en el STEAM requieren de aprendizajes colaborativos propios de inteligencias múltiples, focalizadas en construcción de situaciones didácticas no estructuradas, Chevellard Y.[103] (1997) y Casado y Checa[104] (2020), como se ilustra en la siguiente gráfica:

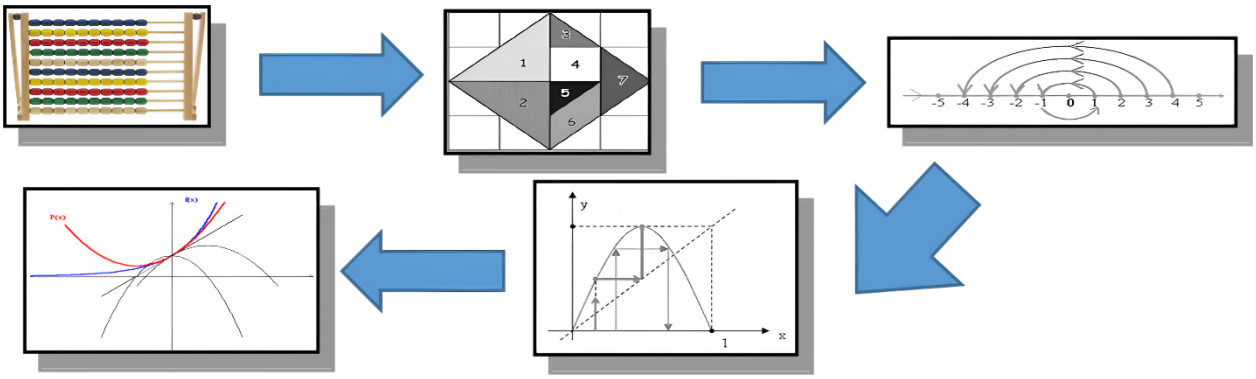


Figura 13. Complejidad en la matemática básica

102 Laudan L. (1984). Ideas epistemológicas en la enseñanza de las ciencias, Instituto de física, Texas Austin.

103 Chevelland, Yves; La transposición didáctica, Aique Buenos Aires 1997.

104 Casado, R. y Checa, M. (2020) Robótica y proyectos Steam: Desarrollo de la creatividad en las aulas. Revista de medios Educativos 58, 51-69, Doi:10.12795/pixelbit.73672.

En particular Montealegre, M[105]. (2013) presenta una propuesta curricular para formar en las habilidades Matemáticas, haciendo explícitos los compromisos e intereses de los aprendizajes a través del hábito de la solución de problemas con modelizaciones elementales; se orienta para identificar la existencia de capacidades, habilidades y aptitudes que, en conjunto, permiten a la persona resolver problemas y situaciones de la vida.

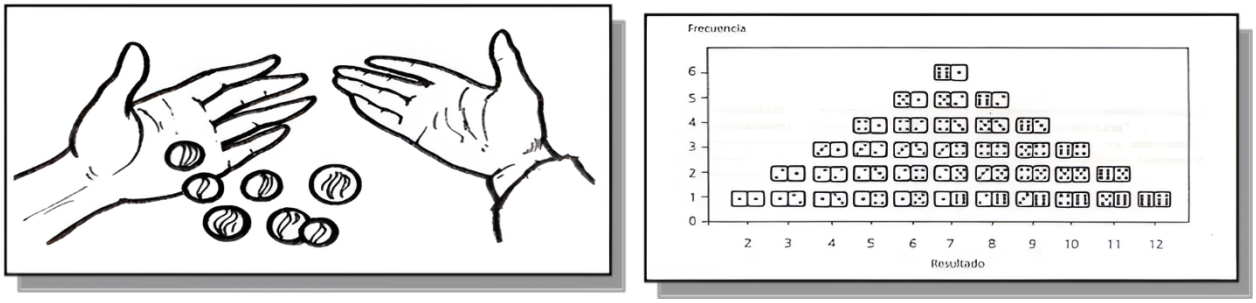


Figura 14. Modelo sobre incertidumbre

En esta propuesta curricular se relaciona métodos para aprendizajes con sistemas cercanos a su cotidianidad, para favorecer la transformación metacognitiva en los dominios en la matemática escolar; se articulan sus sistemas matemáticos con los procesos metacognitivos y contextos, para integrarlos a la

Ejemplo la dinámica del conteo, exploración dinámica del espacio, simetrías y geometría sintética, Artin E.[106] (1963); aproximaciones y estimaciones; escenarios variacionales y azarosos.

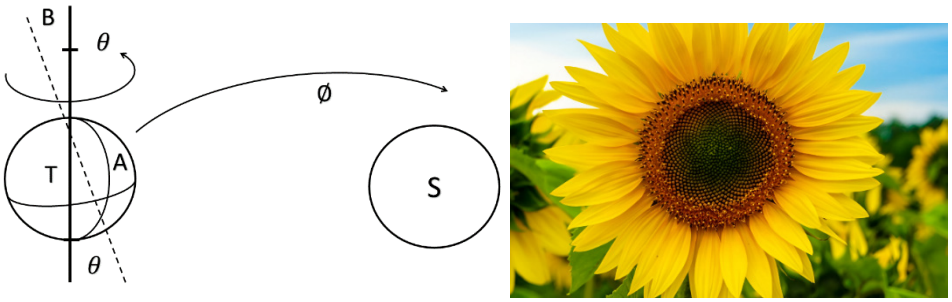


Figura 15. Contextos para aula abierta

La propuesta curricular Montealegre, M[107]. (2013) Se resume en el siguiente esquema construido por dicho autor: no linealidad, interdisciplinariedad y empoderamiento.

105 Montealegre, M. (2013). Matemáticas para la creatividad del I al V, Tiempos Ecológicos, Colombia.

106 Artin, E. (1963): «Puntos de vista extremados sobre la enseñanza de la geometría», Alianza Editorial.

107 Montealegre, M. (2013). Matemáticas para la creatividad del I al V, Tiempos Ecológicos, Colombia.

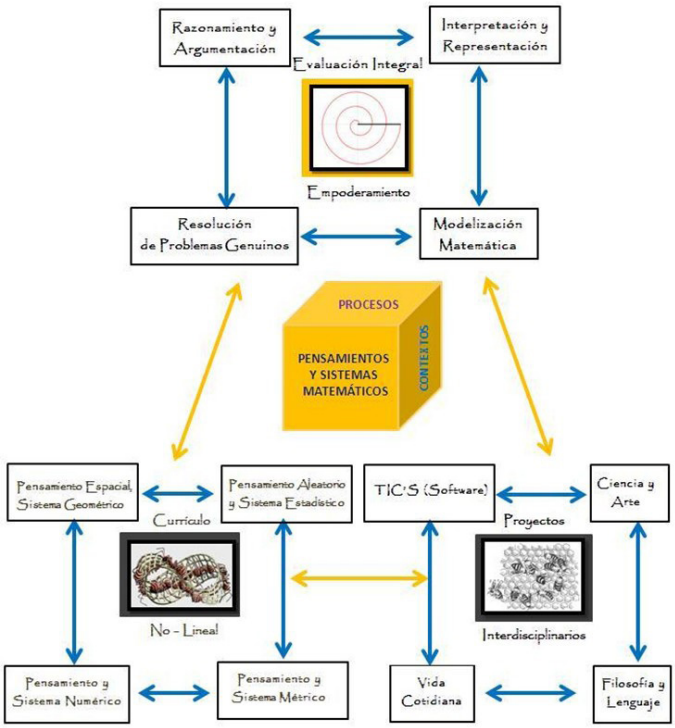


Figura 16. Sistema curricular

5. MODELIZACIÓN BIOINSPIRADA.

En esta línea de investigación John Von Neumann[108] (1966) también modeló una máquina capaz de auto replicarse, los llamados Autómatas Celulares, A.C, las cuales Inicialmente fueron interpretados como conjunto de células que crecían, se reproducían y morían a medida que pasaba el tiempo" Reyes[109] Gómez (2011). Un A.C. constituye un sistema dinámico discreto, compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados, según los estados de las celdas vecinas y reglas de transición locales. Los A.C. pueden representar las dinámicas de juegos evolutivos, Nowak M.A.[110] (2006). Las Ciencias de la Computación nos enseña a comprender lo posible o imposible, el juego de la vida. Los procesos de recursividad permiten la construcción de fractales en la matemática, las ciencias naturales y sociales, que tienen el potencial de ser sistemas generativos con imágenes complejas, Mandelbrot B.[111]

Para simular este tipo de problemas existe la alternativa del modelado y simulación

108 Neumann, JV. (1966) Theory of Self-Reproducing Automata, Illinois University Press.

109 Reyes Gómez, D. A. (2011). Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares.

110 Nowak M.A. (2006). Evolutionary Dynamics, explorando la ecuación de la vida. Harvard University Press.

111 Mandelbrot, B. (2004). Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond, Springer Verlag NY.

computacional con agentes y simulación computacional de su dinámica, Rodriguez[112] Zoya & Pascal (2015), que actúa como una sociedad artificial integrada por agentes autónomos y heterogéneos que interactúan de modo no previsible entre sí y con el entorno. Es una manera robusta de entender las dinámicas emergentes y autoorganizativas. La interacción entre los agentes son dadas por reglas predefinidas que tienen la capacidad aprender. Epstein[113] (2007).

La complejidad computacional, desde los fundamentos establecidos por Alan Turing[114] hasta la entropía de la Información y la NP-completitud, exploraciones en la intersección con la computación biológica, Shannon, C. y Weaver, W. (1949)[115] y Fortnow, L. (2023)[116] expresadas con interacciones los números primos en el infinito, teorema Z de Riemann y que espacialmente corresponde con la topología no orientada de Moebius.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{p\ primo} \left(\frac{1}{1 - p^{-s}} \right)$$

$$donde\ s = \frac{1}{2} + it\ , t \in \mathbb{R}$$

Figura 17. De la aritmética a la geometría

También Melanie Mitchell (2023)[117] ha explorado la relación entre la complejidad algorítmica y la evolución, su trabajo resalta cómo los algoritmos pueden evolucionar y adaptarse con el tiempo, lo que tiene importantes implicaciones en la complejidad de los problemas resolubles por sistemas basados con algoritmos evolutivos.

Esto demuestra cómo los principios de la evolución biológica pueden resolver problemas en el ámbito computacional, Kauffman, S. (2011)[118]. En este sentido, gracias a autores como Eric Smith y Harold Morowitz[119], la integración de la biología y la complejidad computacional

112 Rodriguez Zoya, L., & Pascal , R. (2015). Modelos basados en agentes: aportes epistemológicos y teóricos para la investigación social. Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales

113 Epstein, J. (2007). Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton, NJ: Princeton University Press.

114 Turing, A. (1950). Computing Machinery and Intelligence. Mind 49: 433-460

115 Shannon, C. y Weaver, W. (1949). The Mathematical Theory of Communication. University Illinois Press.

116 Fortnow, L.(2023) The Golden Ticket: P, NP, and the Search for the Impossible. Princeton University Press

117 Mitchell. M. (2012). Biological computation. The Computer Journal, 55(7), 852-855.

118 Kauffman, S. (2011). Information Processing and Biological Systems. Berlin: Springer.

119 Smith E. y Morowitz H.(2016). The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere,

permite comprender la computación biológica en términos termodinámicos, mostrando cómo la vida misma es un ejemplo de complejidad emergente, Sipper M. (1990)[120].



Figura 18. Modelo inteligencia de enjambres

Los fenómenos afectados por las transiciones de fase son explicados mediante modelos de autómatas celulares o redes complejas en el borde del caos, criticidad, Ruelle, D[121] (2023). Se realiza en la transición de la periodicidad hacia caos en Langton, C. G.[122] (1990) y para las ciencias sociales en Reynoso, C. (2009)[123]. Sobre este asunto Pascual M. and Guichard F. (2005) [124] consideran tres tipos de criticidad: (i) criticidad clásica debida a la transición de fase; (ii) autoorganizada según Carlos Reynoso, (2009) y (iii) criticidad robusta tipo percolación, Cohen, R. (2002)[125] ; los cuales explican la extinción de especias, el proceso de inoculación para enfermedades y las redes eficientes de comunicación.

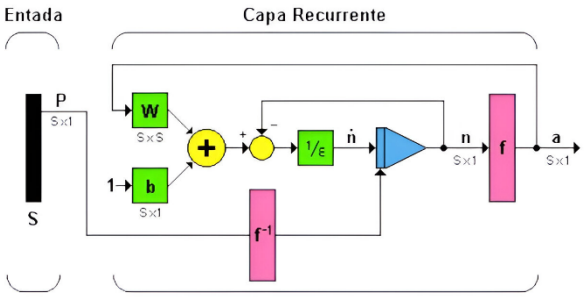


Figura 19. Algoritmo básico inteligencia artificial

Cambridge University Press.

120 Sipper, M. (1990). The emergence of cellular computing. IEEE Computer, 32(7).

121 Ruelle, D (2023). A Review of linear response theory for general differentiable dynamical systems

122 Langton, C. G. (1990). Complex Systems Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos

123 Reynoso, C. (2009); Redes y complejidad: modelos y algoritmos no convencionales en investigación sociocultural

124 Guichard F. (2005). Criticality and disturbance in spatial ecological systems; Trends in Ecology and Evolution.

125 Cohen, R. (2002). Percolation Critical Exponents in Scale-Free Networks.

La inteligencia artificial se ha desarrollado con gran impacto, permite la simulación y solución independiente a problemas complejos y corresponde a desarrollo de aprendizajes que realizan redes neuronales artificiales estocásticas, Derrida B. y Pomeau Y.[126] (1986) o generativos relacionados con las competencias lingüística , ver figura de arriba, que han alcanzado el nivel de algoritmos metaheurísticos bioinspirados para aprendizajes de procesos de evolución como algoritmos genéticos, Holland J.[127].

En consecuencia la biosemiótica puede ser idóneamente considerada como una de las ciencias de la complejidad, Maldonado C. (2021) [128] y trata de un ámbito centrado en la vida, articula dominios: la antroposemiótica, que corresponde a lo que clásicamente, desde Saussure en adelante, se entendió como semiótica, semiología; procesos de información fitosemiótica y zoosemiótica. Así la información es un fenómeno físico pero no material, Landauer R. (1991)[129], asistimos al nacimiento de una física de fenómenos inmateriales. Vida artificial simbólica de la naturaleza, como sistemas de complejidad creciente, incompleta e inacabada, como lo llama C. Maldonado (2023)[130].

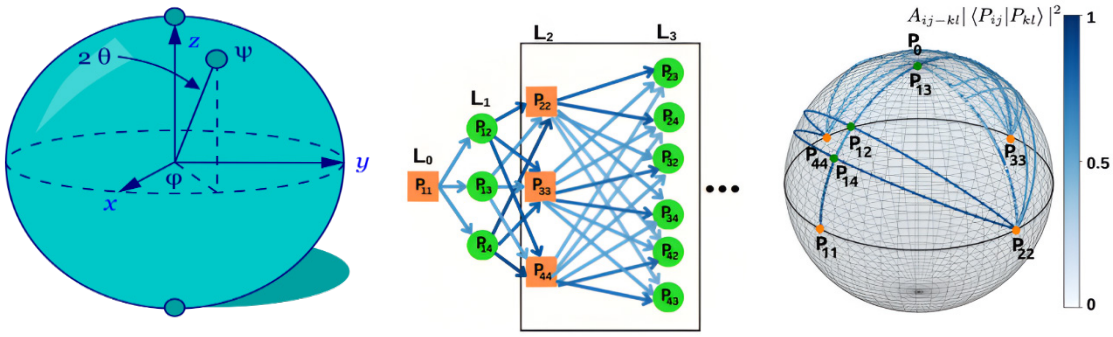


Figura 20. Complejidad cuántica

Inteligencia descentralizada de optimización colectiva a la manera redes de enjambre[131], en

126 B. Derrida and Y. Pomeau, (1986). Random networks of automata: a simple annealed approximation.

127 Holland J. H. (2004). El Orden Oculto. De Cómo la Adaptación Crea la Complejidad, Fondo de Cultura Económica México.

128 Maldonado, C. E., (2021). Biosemiótica y complejidad. Bogotá. Ed. Universidad El Bosque

129 Landauer, R., (1991). "Information is physical" en Physics Today 4; doi: 10.1063/1.881299

130 https://www.youtube.com/watch?v=IP6cx_Q-orc

131 https://cci.mit.edu/

los que interactúan modelos de computación cuántica y vida artificial Langton[132], C. (1989), ver figura de abajo. Procesos con máquinas virtuales que crean algoritmos independientes del programador, aprendizaje profundo, Pagels H.[133] (1991). Con implicaciones en los procesos de aprendizajes de máquinas como Machine Learning, Deap Learning y Web Learning.

6. CONCLUSIONES

En el sistema educativo debe formar para lo desconocido, *para su pertinencia* no corresponde al ejercicio de disciplinas fragmentadas, métodos reduccionistas y descontextualizados. La educación debe orientar, de abajo hacia arriba, procesos para superar fronteras disciplinares y que funcionen traslapando modelos entre naturaleza y sociedad, como una totalidad autoorganizada.

Un sistema que complejice la educación debe ser interdisciplinar para que forme seres humanos autónomos y libres, se rompe así con los conceptos tradicionales de adquisición de conocimiento, enseñanza, aprendizaje, autoridad, disciplina, asignaturas, currículo, programas y evaluación. Desarrolla procesos no lineales en escenarios inciertos y lejos del equilibrio pueden generar estructuras imposibles, es muy difícil vaticinar lo que ocurrirá más allá de un cierto horizonte temporal.

Las organizaciones educativas para vida facilitan la flexibilidad y plasticidad, corresponden a juegos estratégicos entre emociones y razones que se debaten entre la aleatoriedad y certeza, inestabilidad y catástrofes; son sistemas adaptativos complejos eco-devo-evo para comprender que el sistema aprende. Corresponde a un vínculo radical entre la biología, la cultura y pedagógica para superar la comprensión de las transformaciones eco sistémicas desde las características no sólo genotipos-fenotipos sino también genético y cultura, expresado en lo cognitivo, comportamental y emocional.

Pero la capacidad para adaptarse tiene límites, complejidad en el borde del caos, si el sistema no puede acomodarse a tales afectaciones su estructura puede transformarse de manera total, temporal o permanente, lo cual depende tanto de la organización y sus nexos con su entorno.

Para simular este tipo de problemas existe la alternativa del modelado con agentes,

132 Langton, C. (1989). Artificial Life. In C. Langton (Ed.), Artificial Life, SF I Studies in the Science of Complexity, Vol VI (pp. 1-47). Redwood City: Addison-Wesley.

133 Pagels, H. (1991). Los Sueños de la Razón: El Ordenador y los Nuevos Horizontes de las Ciencias de la Complejidad. Barcelona: Gedisa.

simulación computacional para el estudio de una organización y la dinámica de sistemas, que actúa como una sociedad artificial integrada por agentes autónomos y heterogéneos que interactúan de modo no previsible entre sí y nexos con el entorno.. Las interacciones entre los agentes son dadas por reglas predefinidas que tienen la capacidad aprender, es una manera robusta de entender las propiedades emergentes auto organizativas.

Los procesos recursivos para aprendizajes matemáticos legítimos favorecen las habilidades lingüísticas y biocomputacionales, por ejemplo en la construcción matemática de fractales, autómatas, redes entre ciencias naturales y sociedad, que tienen el potencial de ser sistemas complejos generativos.

En particular en este artículo se sustenta un modelo curricular para formar en las habilidades Matemáticas, haciendo explícitos los compromisos e intereses de los aprendizajes a través del hábito de la solución de problemas. Busca identificar la existencia de capacidades, habilidades y aptitudes que permiten abordar situaciones de la vida.

Referencias

- Agudelo, G. y Alcalá R. (2005). Las estructuras disipativas en la evolución.
- Anzola, D. (2017) Self-organization and Social Science, Computational and Mathematics Organization Theory.
- Artin, E. (1963): «Puntos de vista extremados sobre la enseñanza de la geometría», Alianza Editorial.
- Ashby, W. R. (1956). An Introduction to Cybernetics. In London: Chapman & Hall
- Ausubel, D. P., Novak, J. D. y Hanesian, H. (1978). Educational Psychology: A Cognitive View.Badillo, E. (2009). Diseño Curricular. Universidad de Costa Rica.
- Bassarab, N. (2002) Manifiesto de la Interdisciplinariedad, La Habana.
- Bateson, G. (1972). Pasos hacia la ecología de la mente, una aproximación revolucionaria de la autocomprensión del hombre. Lohlé-Lumen, Buenos Aires.
- Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Copernicus.* www.natureworks.com
- Barabási, A.-L., Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. Science.
- Beane J. A. (2000) Curriculum Integration and the Disciplines of Knowledge. University of Nebraska.
- Bohórquez Arévalo, L. E. (2013). A organização empresarial como sistema adaptativo complexo. Estudios gerenciales, 29.
- Capra, F. (2003). La trama de la vida. Editorial Anagrama, Barcelona.
- Chevelland, Yves; La transposición didáctica, Aique Buenos Aires 1997.
- Cohen, R. (2002). Percolation Critical Exponents in Scale-Free Networks.
- Colom, A. J. (2002). (De) construcción del conocimiento pedagógico. Paidós
- Davis, B. y Sumara, D. (2006). Complexity and Education Inquiries Into Learning,
- Teaching, and Research. Universidad de Alberta, Canada.
- Derrida, J. (1995). El lenguaje y las instituciones filosóficas. 1–78.
- Derrida B. and Y. Pomeau, (1986). Random networks of automata.
- Duncan J. Watts* & Steven H. Strogatz (1997). Collective dynamics of 'small-world'
- Epstein, J. (2007). Generative Social Science. Princeton University Press.
- Etkin, J. R. (2011). Gestión de la complejidad en las organizaciones.
- Granica, Buenos Aires.
- Fortnow, L.(2023) The Golden Ticket: P, NP, and the Search for the Impossible. Princeton University Press.
- Foucault, M. (1987). Saber-poder. Paidos Buenos Aires.
- Guichard F. (2005). Criticality and disturbance in spatial ecological systems; Trends in Ecology and Evolution.
- Hong Bo Liu y Ajith Abraham, 2009. Chaos and Swarm Intelligence, School of Computer Science China.

Referencias

- Holland J. H. (2004). El Orden Oculto. De Cómo la Adaptación Crea la Complejidad, Fondo de Cultura Económica México.
- Holling, C. 2011. Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*.
- Jhonson, Steven; Los Sistemas Emergentes; Fondo de Cultura Económica, 2009.
- Kauffman, S. (2011). Information Processing and Biological Systems. Springer.
- Langton, C. G. (1990). Complex Systems Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos.
- Langton, C. (1989). Artificial Life. In C. Langton (Ed.). Addison-Wesley.
- Landauer, R., (1991). "Information is physical" en Physics Today 4.
- Leff, Enrique (2009), Ecología, Capital e Cultura: a Territorialização da Racionalidade Ambiental. Editora, Petrópolis, Brasil.
- Lorenzón, E. E. (2020). Sistemas y organizaciones. Libros de Cátedra.
- Luhmann, N (1990). Sociedad y Sistemas: La ambición de la teoría, U.A. de Barcelona.
- Maldonado, Carlos (2021). Las Ciencias de la Complejidad son Ciencias de la vida. Trepen Ediciones, Chile.
- Maldonado, C. E., (2021). Biosemiótica y complejidad. Bogotá. Ed. Universidad El Bosque.
- Maldonado, Carlos y Gómez, Nelson (2018) El Mundo de las Ciencias de la Complejidad
- Maldonado, C. E. (2014). ¿Qué es eso de pedagogía y educación en complejidad? *Debate Teórico-Metodológico.*
- Maturana, H. y Varela F. (2003). El árbol del conocimiento. Lumen, Buenos Aires
- Mandelbrot, B. (2004). Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond, Springer Verlag N.Y
- Martyushev, Leonid M. 2023. Old Misconceptions and New Breakthroughs, Entropy Production, Entropy.
- Mason, M. (2008). Complex theory and the Philosophy of education. Wiley-Blakwell
- Méndez I. E. Carvajal B.M. (2029). Una mirada a los fundamentos biológicos de la educación desde la teoría de Santiago. Universidad de Camagüey, Cuba Mitchell. M. (2012). Biological computation. The Computer Journal, 55(7), 852-855.
- Montealegre, M. (2013). Matemáticas para la creatividad del I al V, Tiempos Ecológicos, Colombia.
- Montealegre M. y Vera J. (2022). Hacia la Pedagogía de la Complejidad. Revista Ciencias de la Complejidad.
- Montealegre, M. Montealegre J. y Vera J. (2024). Modelado de la sostenibilidad Ambiental, MAPI3.
- Morin, E. (2005). Los siete saberes necesarios para la educación del futuro UNESCO, 2018.
- Newman, M. (2003). The structure and function of complex networks. SIAM review.
- Neumann, J.V. (1966) Theory of Self-Reproducing Automata, Illinois University Press.
- Nicolis G. and I. Prigogine (1989). Exploring

Complexity. W H Freeman & Co

- Nowak M.A. (2006). Evolutionary Dynamics, explorando la ecuación de la vida.
- Pagels, H. (1991). Los Sueños de la Razón: El Ordenador y los Nuevos Horizontes de las Ciencias de la Complejidad. Barcelona: Gedisa.
- Perkins, D. et.al. (2014). Hacer visible el pensamiento. Paidós.
- Perkins, D. (2017). Educar para lo desconocido, Ediciones SM, Madrid
- Piaget J. y García R.(1982) Psicogénesis e Historia de la Ciencia, Siglo XXI.
- Piaget, J. y Vygotski, L. (1996). Biología y conocimiento. *Academia*Pierce, C. (2008). Pragmatismo. Ediciones Encuentros, Madrid.
- Prigogine, I. (1998). El fin de las certidumbres, Andrés Bello. Andrés Bello, Chile.
- Piaget, J (1982). Epistemología Genética. Editorial Debate, Brasil.
- Ruelle, D. (2023). A Review of differentiable dynamical systems, IHES France
- Resnick, Mitchel (2001). Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico.
- Reyes Gómez, D. A. (2011). Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares. Harvard University Press.
- Reynoso, C. (2009); Redes y complejidad: modelos y algoritmos no convencionales en investigación sociocultural
- Rodriguez Zoya, L., & Pascal , R. (2015). Modelos basados en agentes. Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales.
- Sipper, M. (1990). The emergence of cellular computing. IEEE Computer, 32(7).
- Shannon, C. y Weaver, W. (1949). The Mathematical Theory of Communication. University Illinois Press.
- Smith E. y Morowitz H.(2016). The Origin and Nature of Life on Earth, Cambridge University Press.
- Tall, D. (1996). Advanced Mathematical Thinking Computer. Education Warwick.
- Thom, R. (1983). Mathematical models of morphogenesis. Ellis Island .
- Turing, A. (1950). Computing Machinery and Intelligence. Mind 49: 433-460

Entropía Curricular y Redes Complejas para el desarrollo de Proyectos Ambientales Escolares (PRAE)

Fecha de recepción: 20-12-25 / Fecha de aceptación:27-04-25

Mauro Montealegre Cárdenas
Ph.D. Matemáticas y Profesor Titular Usco

Correo electrónico: mmonteal@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1577-5971

Jasmidt Vera Cuenca
Doctorado Complejidad y Profesora Titular Usco

Correo electrónico: Jasmidt.vera@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8965-0661

Edinson Oswaldo Delgado Rivas
Magister Complejidad e Docente Investigador Uninavarra

Correo electrónico: oswaldodelgador@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4736-0436

Resumen

En este artículo se presenta un indicador de entropía curricular y el enfoque de redes complejas de la crisis climática para fortalecer el desarrollo y la contextualización de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE). Esta investigación considera dimensiones socioambientales de la crisis climática, destacando la necesidad de su comprensión holística. En este sentido, teniendo en cuenta los factores ambientales relacionados con este fenómeno como los gases de efecto invernadero (GEI), las quemas y las deforestaciones, se propone la implementación de la noción de entropía curricular como estrategia didáctica que interconecta de manera no lineal del currículo, la participación activa de los estudiantes y fortaleciendo la educación ambiental. Por otro lado, se presenta

una metodología de evaluación de entropía de un diseño curricular de una intervención pedagógica, proporcionando una métrica de la diversidad y complejidad de la adaptación curricular. En conclusión, la implementación de indicadores de entropía curricular y la implementación de redes complejas del cambio climático en los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) promueve la comprensión de la flexibilidad, no linealidad en el currículo, y procesos de interdisciplinariedad asociados a redes de mundo pequeño.

Palabras clave: Entropía curricular, Redes de mundo pequeño, Cambio climático, Currículo No Lineal, Interdisciplinariedad y Proyectos Ambientales Escolares, (PRAE).

Abstract

This article introduces a curricular entropy indicator and applies a complex-network perspective on the climate crisis to strengthen the development and contextualization of School Environmental Projects (PRAE). The study considers the socio-environmental dimensions of the climate crisis, emphasizing the need for a holistic understanding. Taking into account environmental factors linked to this phenomenon—such as greenhouse gases (GHG), burning practices, and deforestation—it proposes the use of the notion of curricular entropy as a didactic strategy that non-linearly interconnects the curriculum, fosters students' active participation, and reinforces environmental education. In addition, it presents a methodology for evaluating the entropy of a curricular design within a pedagogical intervention, providing a metric for the diversity and complexity of curricular adaptation. In conclusion, implementing curricular-entropy indicators and complex climate-change networks in PRAE promotes an appreciation of curricular flexibility, non-linearity, and the interdisciplinary processes associated with small-world networks.

Keywords: Curricular entropy, small-world networks, climate change, nonlinear curriculum, interdisciplinarity, School Environmental Projects (PRAE).

1. Introducción

La comprensión del cambio climático ha evolucionado en las últimas décadas, pasando de ser un tema exclusivamente científico a convertirse en un desafío multidimensional que integra desde aspectos ambientales, sociales, económicos, hasta educativos. En esta dirección, la modelación del cambio climático se transforma en una herramienta fundamental para comprender la complejidad de los sistemas climáticos y sus interacciones con el entorno y desarrollar estrategias para la mitigación y adaptación de la crisis climática, (Roca Jusmet, 2018). El Programa de Educación Ambiental (PRAE) emerge en las instituciones educativas como un pilar fundamental para promover la interconexión curricular en torno a la educación ambiental, (Fien, 1992), (Novo, 2006) (Leff, 2022). No obstante, al integrar la modelización climática como un recurso didáctico,

el PRAE fortalece los ecosistemas de aprendizaje que movilizan de forma dinámica los currículos de las instituciones educativas, (Manabe & Wetherald, 1967), (Hasselmann, 1976). Entender las causas subyacentes y las interconexiones en el sistema climático local se vuelve esencial para implementar medidas eficaces de mitigación y adaptación curricular de forma contextualizada, (Minambiente, 2019).

Por otro lado, desde una perspectiva más técnica, al introducir los términos de búsqueda "redes del cambio climático y proyectos escolares ambientales" en la base de datos "SCOPUS", en la figura 1 se observa un incremento constante en la publicación de artículos especializados en los últimos 20 años, alcanzando un total de 16.191 resultados. Este aumento evidencia la creciente importancia y el desarrollo continuo de la integración de redes sobre el cambio climático en la educación escolar, estableciéndose como un campo de investigación en constante evolución y creciente interés. Este fenómeno consolida su posición como un área de investigación crucial en la actualidad, subrayando la necesidad de comprender y abordar los desafíos del cambio climático desde una perspectiva educativa e investigativa.

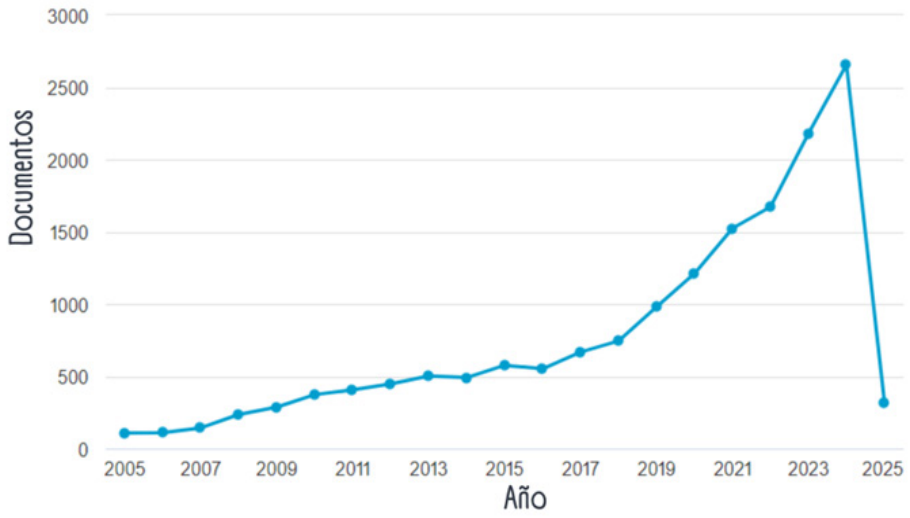


Fig 1. Publicaciones sobre redes del cambio climático y proyectos educativos. Fuente: Base de datos SCOPUS.

En primera instancia, se propone concebir el currículo como un sistema autopoiético, donde el ser y el hacer están intrínsecamente vinculados, dando lugar a una estructura curricular que se construye y se autorregula internamente, (Maturana & Varela, 2003) (Simon, 2019). Así, la interdisciplinariedad se convierte en un principio fundamental, donde las diversas áreas de conocimiento se entrelazan de manera indistinguible, formando una red compleja que refleja la naturaleza dinámica y autónoma del proceso educativo, (Maldonado C., 2015) (Castro Sáez, 2001). Esta estructura curricular autopoiética no solo promueve la integración de diferentes disciplinas, sino que también fomenta la adaptabilidad y la flexibilidad, permitiendo que el currículo evolucione continuamente en respuesta a los

cambios en el entorno educativo y las necesidades de los estudiantes, (Maturana, 1980), (Maldonado, C, 2017).

Modelización del cambio climático y la Transposición didáctica

La integración de la modelización de la crisis climática dentro del ámbito educativo del PRAE representa desde el punto de vista metodológico uno de los mayores retos en el proceso de implementación del currículum. Como parte integral del compromiso educativo las redes ambientales asumen un rol protagónico al ofrecer un enfoque multidisciplinario que integra la ciencia ambiental, las ciencias sociales y las matemáticas de manera contextualizada, (Bateson, 1979), (Leff, 2000).

La transposición didáctica, conceptualizada por Yves Chevallard (Chevalard, 2013), es fundamental para comprender cómo se lleva el conocimiento científico al contexto educativo, implicando una cuidadosa adaptación de los conocimientos científicos al entorno escolar. Este tipo de transposición implica transformar el conocimiento científico sobre la crisis climática en saberes accesibles y pertinentes para los estudiantes, considerando su nivel de comprensión y contexto educativo promoviendo el aprendizaje significativo y la comprensión profunda de las complejidades del cambio climático. Por ello se hace imperativo pasar de un enfoque tradicional de enseñanza a uno interdisciplinar y dinámico, permitiendo abordar el cambio climático desde múltiples perspectivas, a través de una comprensión integral del problema, (Maldonado, 2016).

Redes de Mundo Pequeño y la no linealidad del currículo

Por su parte, las redes de mundo pequeño, un concepto originario de la teoría de redes, describen sistemas donde los nodos están altamente interconectados. Esta noción adquiere relevancia al considerar la necesidad de conexiones dinámicas y efectivas entre los diferentes actores y recursos involucrados en la gestión ambiental escolar para gestión del cambio climático, (Watts & Strogatz, 1998), (Barabasi, 2003).

Los modelos de redes complejas evidencian interconexión y colaboración entre los diversos agentes involucrados en la gestión ambiental escolar, lo que promueve una colaboración activa entre estudiantes, profesores, instituciones educativas, comunidades locales y organizaciones ambientales. Además, esta colaboración facilita el intercambio de conocimientos, recursos y experiencias, fortaleciendo así los PRAE y su capacidad para abordar el cambio climático de manera integral. Asimismo, los grados de resiliencia y ciclos de adaptabilidad inherentes a las redes de mundo pequeño permiten a los PRAE adaptarse a los desafíos ambientales emergentes y a las necesidades evolutivas de los estudiantes y la comunidad escolar. Esto implica la flexibilidad para ajustar estrategias, implementar nuevas iniciativas y responder de manera sitémica a los impactos del cambio climático en el entorno escolar, (Holling, 1973), (Walker et al., 2003).

Otro aspecto crucial es la eficiencia en la comunicación que ofrecen la existencia de las redes complejas, promoviendo la difusión de información relevante sobre el cambio climático y la generación de buenas prácticas ambientales. En el contexto de los PRAE es esencial para involucrar a todos los actores pertinentes, promover la conciencia ambiental y coordinar esfuerzos para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático, (Newman, 2003).

De esta forma, la estructura de redes de mundo pequeño permite que las acciones locales tengan un impacto amplificado a través de conexiones globales y sinérgicas, (Watts & Strogatz, 1998), (Barabási, 2002). Esto significa que las iniciativas ambientales desarrolladas a nivel escolar pueden influir en comunidades más amplias, contribuyendo significativamente a la lucha contra el cambio climático a escalas regional, nacional e internacional, (Perkins, 2023).

La modelización de la crisis climática mediante redes complejas no solo pretende comprender la dinámica climática, sino también promover la conciencia y su comprensión en la comunidad educativa y la sociedad en general (Gore, 2007), (IPCC, 2021). Así pues, el objetivo de investigación se estructura en torno a la exploración de la entropía curricular y las redes complejas del cambio climático como herramienta interdisciplinar para fortalecer la implementación de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), como también fomentar la alfabetización climática en diversos niveles.

Entropía Curricular en el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares

En el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) el concepto de entropía educativa ofrece una perspectiva para abordar los desafíos actuales en la educación ambiental. Esta entropía, por su origen termodinámico del no equilibrio, se refiere al grado de desorden, excitación o incertidumbre del sistema, (I. Prigogine, 1997), (Boltzmann, 2012). Al realizar una migración conceptual al ámbito educativo, se puede analizar cómo los sistemas educativos manejan la complejidad y la incertidumbre inherente a la enseñanza y el aprendizaje, (I. (Ilya) Prigogine, 1980). Particularmente en los PRAE, la entropía educativa se manifiesta en la forma en que se gestionan las problemáticas ambientales, reconociendo que el entorno natural y social es dinámico y cambiante. La entropía curricular sugiere que, en lugar de buscar una rigidez estructural, se debe promover una organización pedagógica que posibilite: la adaptación, flexibilidad, la creatividad, la innovación y la capacidad de respuesta a nuevas situaciones y conocimientos emergentes, (I. Prigogine & Rysselberghe, 1963), (Leff, 2000).

En este contexto, la entropía curricular tiene las siguientes propiedades:

- Diversidad de saberes: La variedad y amplitud de temas, enfoques pedagógicos, métodos de enseñanza y recursos utilizados en un plan de estudios. Cuanta más diversidad de saberes interconectados haya, mayor será la entropía curricular. Entropía asociada a la red curricular de mundo pequeño, entre más sea de mundo

pequeño mayor es el grado de entropía, (Leinster, T., 2020).

- Interdefinibilidad: La medida en que los diferentes elementos del plan de estudios están interrelacionados y conectados entre sí. No se define solo, se necesitan varios factores para definirse (malla curricular, proyectos, metodologías, procesos de evaluación, niveles de aprendizaje , niveles de motivación, cuanto más diversas e inciertas, interdefinibles sean estas interconexiones, mayor será la entropía curricular, (Candia et al., 2022)
- Flexibilidad y Adaptabilidad: La capacidad del currículo para adaptarse a cambios, integrar nuevas ideas, enfoques o avances educativos. Una mayor flexibilidad puede aumentar la entropía curricular al permitir múltiples enfoques y adaptaciones, (Holland, J., 1992), (Brusilovsky & Peylo, 2003), (Holland, 2005).

Es preciso resaltar una distinción importante, la complejidad y la simplicidad coexisten en los sistemas naturales (Gell-Mann, 1994), (Fritzsch, 2018), una tesis que puede aplicarse a la entropía educativa para argumentar que los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) deben integrar la complejidad de la crisis climática mediante enfoques holísticos e interdisciplinarios. Naturalmente, la entropía curricular emerge como una métrica útil para evaluar y dinamizar la estructura curricular de un plan de estudios, destacando la necesidad de integrar saberes de diversos campos del conocimiento, (Perkins, 2023).

2. Metodología

Esta investigación se fundamenta en la comprensión holística del fenómeno socioambiental de la crisis climática que se articula con los procesos curriculares. La relación descrita de entropía curricular permite abordar mediante redes complejas de mundo pequeño la complejidad de la crisis climática y fortalecer los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE).

El tipo de investigación, según su diseño, es exploratorio y descriptivo, ya que se busca, en primer lugar, identificar y analizar los factores determinantes de la crisis climática dentro del contexto educativo y cómo se interrelacionan en un modelo curricular. En este sentido, en cuanto a su alcance, la investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como objetivo desarrollar un modelo curricular basado en redes complejas que pueda ser implementado en contextos escolares, con miras a fortalecer los PRAE y contribuir a la formación de estudiantes conscientes y capaces de afrontar los retos ambientales.

En este contexto, se desarrolló la siguiente ruta metodológica:

- **Identificación de Factores Determinantes en la crisis climática y Estructuración de un Modelo Curricular:** utilizar herramientas de análisis de redes complejas para identificar y visualizar el grafo de los factores claves de la crisis climática, como los gases de efecto invernadero, la deforestación y acciones curriculares ambientalmente

estratégicas. Visualizando un proceso autoorganizado para la sostenibilidad de vida, figura 2, a través de un modelo no lineal de las interacciones regenerativas entre estos factores: recursos hídricos, reforestaciones y generación de entornos resilientes.

- **Diseño de una Propuesta Interdisciplinar de Intervención Curricular:** para el aprendizaje interdisciplinario se construye una guía básica no lineal del modelo curricular que se integra abajo hacia arriba, como una red que articula funcionalmente a los agentes bióticos, comunidades de todo tipo en las singularidades locales de la biosfera, y abióticos incluyendo la noosfera, constituida por las percepciones conscientes que tienen, individual y colectivamente, las comunidades humanas que conviven en el ambiente escolar, (Teilhard de Chardin, 1969), (Edgar Morin, 2006). Expresando así su cosmovisión antrópica como red del mundo pequeño, que a escala fractal reconoce complejidades del mundo llevado a las restricciones del aula, sin perder su visión de complejidad creciente. La comprensión evolutiva y aleatoria, esto es entrópica, de los microestados que manifiestan los agentes del sistema curricular expresan la sostenibilidad ambiental deseada en las instituciones educativas. Así, en sus contextos el sistema curricular es autoorganizativo frente a las perturbaciones súbitas y emergentes de la crisis climática.

- **Orientaciones curriculares:** En la implementación de estrategias para abordar la crisis climática son útiles las simulaciones computacionales especializadas con Gephi, plataforma construye las redes complejas; permitió visualizar y filtrar las interacciones procesos claves como las emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo y la biodiversidad afectada por el clima, (Bastian, M., 2009) (Wilensky, U; Randall, 2015) .

- **Herramientas y métodos de Investigación:** En esta investigación, se emplearon una variedad de instrumentos, métodos y herramientas que facilitaron la integración de los factores determinantes de la crisis climática en un enfoque educativo interdisciplinario. A continuación, se describen los métodos y herramientas implementadas:

A. Modelación Basada en Agentes con NetLogo: NetLogo fue implementado para diseñar experiencias de laboratorio STEAM mediante el método de modelación basada en agentes. En este proceso, se integró la noción de transposición didáctica, que se refiere a la adaptación y transformación de conceptos científicos complejos en contenidos accesibles y relevantes para el contexto educativo. La modelación basada en agentes permitió simular dinámicas como el impacto del cambio climático en los ecosistemas y en el desarrollo urbano. Las simulaciones diseñadas en NetLogo sirvieron como una herramienta pedagógica que facilitó la comprensión de estas dinámicas por parte de los estudiantes, permitiéndoles interactuar con escenarios complejos y explorar cómo las decisiones humanas y naturales influyen en los sistemas climáticos y sociales, (Wilensky, U; Randall, 2015).

B. Encuestas a Expertos en crisis climática: Se realizó una encuesta cualitativa dirigida a veinte expertos en crisis climática y educación ambiental para identificar los factores determinantes más relevantes en el contexto de la región sur colombiana. Las respuestas de los expertos proporcionaron datos esenciales para validar los análisis realizados y para diseñar una propuesta curricular que abordara las prioridades emergentes en torno a la gestión del cambio climático.

C. Métrica de Análisis de la Entropía Curricular: para aplicar un análisis de entropía en el diseño de la estrategia curricular propuesta para los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), se puede utilizar el modelo de entropía de Shannon (Shannon, C. E., 1948). Este modelo matemático mide la incertidumbre o la diversidad en la estructura curricular:

El modelo general de la entropía de Shannon es:

$$E(C) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) Log_2 p(x_i) \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

- E(C), es la entropía total del currículo con "n" áreas, categorías, o nodos.
- p(x_i), es la probabilidad de la ocurrencia o cumplimiento del componente del currículo x_i.
- Log_2 p(x_i), es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de la ocurrencia o cumplimiento del componente del currículo x_i.

Asimismo, el valor máximo de la entropía para una estructura curricular de "n" áreas, categorías, o nodos y se puede representar mediante la expresión:

$$E(C)_{max} = Log_2 n \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Entre tanto, el valor porcentual de la entropía para una estructura curricular de "n" áreas, categorías, o nodos y se puede representar mediante la expresión:

$$\%E(C) = \frac{E(C)}{E(C)_{max}} \cdot 100 \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Donde:

- E(C), es la entropía total del currículo con "n" áreas, categorías, o nodos.
- E(C)_max, el valor máximo de la entropía para una estructura curricular de "n" áreas, categorías, o nodos.

En este sentido, para determinar el nivel de entropía en una estructura curricular, en términos de porcentaje se pueden considerar:

- **Muy Bajo (0–0.20]:** El currículo es altamente cohesivo y tiene poca diversidad en sus enfoques. La estructura es rígida y difícilmente se adapta a nuevos contenidos o enfoques interdisciplinarios.
- **Bajo (0.20–0.40]:** Hay un cierto grado de flexibilidad, pero sigue predominando una estructura curricular centralizada y poco diversa.
- **Medio (0.4–0.6]:** El currículo presenta un equilibrio entre cohesión y diversidad, permitiendo incorporar diferentes enfoques y adaptarse a algunos desafíos emergentes.
- **Alto (0.6–0.8]:** La entropía indica una alta diversidad en los enfoques y contenidos. El currículo es flexible y se adapta con facilidad a nuevos temas y desafíos interdisciplinarios.
- **Muy Alto (0.8–1]:** El currículo es altamente adaptable y flexible, permitiendo una amplia integración de contenidos diversos. Sin embargo, puede llegar a perder cohesión si no se gestiona correctamente la autoorganización, dado el elevado nivel de complejidad.

Esta métrica define una metodología para evaluar la entropía curricular en el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), permitiendo una comprensión integral de cómo el currículo gestiona la crisis climática, a través de la flexibilidad curricular, la integración interdisciplinaria, y la adaptación a nuevos desafíos ambientales.

3. Resultados

Los siguientes resultados evidencian

3.1 Modelo curricular de redes complejas de la crisis climática para el desarrollo del PRAE.

El modelo Curricular de Redes Complejas de la crisis climática para el Desarrollo del PRAE se fundamenta en la interconexión de diversos componentes críticos para enfrentar el cambio climático y promover la sostenibilidad.

El diseño del modelo de la intervención pedagógica se basa en los siguientes componentes ambientales:

- Crisis climática y Entropía: Se enfatiza la relevancia de los gases de efecto invernadero (GEI) en el cambio climático. Este enfoque permite a los estudiantes comprender cómo las emisiones de GEI contribuyen a la entropía del sistema climático, destacando la

necesidad de acciones inmediatas y sostenibles.

- Gestión del Riesgo: Se contextualiza la dinámica del fenómeno del Niño y la Niña, explicando cómo estos eventos climáticos extremos afectan diversas regiones. La integración de este componente permite a los estudiantes analizar y gestionar riesgos asociados a estos fenómenos, mejorando la preparación y respuesta ante desastres naturales.
- Deforestación: Se abordan las causas y consecuencias de la deforestación, vinculándola

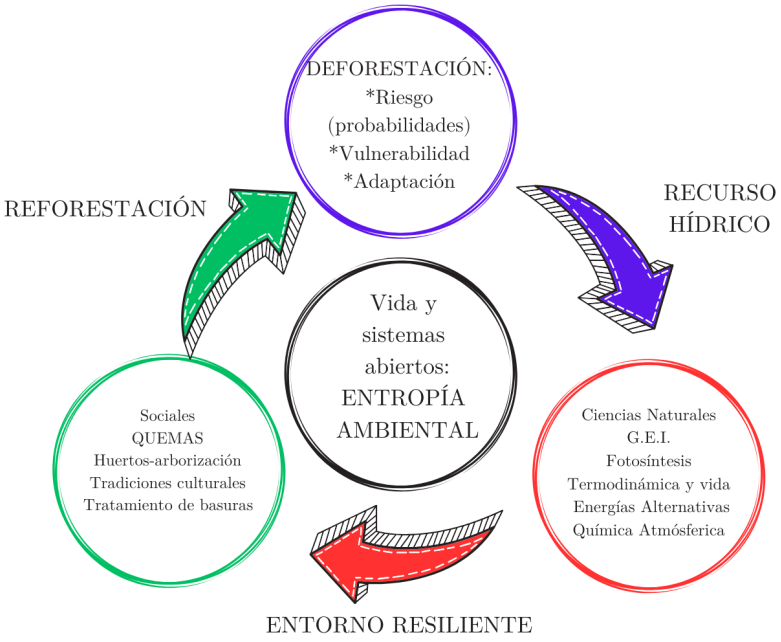


Fig 2. Modelo Curricular de Red Compleja que expone la crisis climática para el Desarrollo del PRAE. Fuente: elaboración propia.

Este enfoque integral no solo conecta áreas curriculares y contenidos, sino que también fomenta la participación activa de los estudiantes en la superación de problemáticas ambientales, desarrollando una conciencia ecológica y una responsabilidad frente a los estados críticos del entorno próximo y lejano de esta nuestra casa común.

3.2 Diseño de una Propuesta Interdisciplinar de Intervención Pedagógica (PIP) de la crisis climática en el Contexto Educativo: Guía de aprendizaje en educación ambiental

En este sentido, como resultado del proceso de implementación del enfoque de redes complejas de mundo pequeño en el diseño de una propuesta interdisciplinar de intervención curricular para la crisis climática en el contexto educativo, se desarrolló una guía de aprendizaje en educación ambiental. Este enfoque permitió visualizar y comprender cómo diversos factores socioambientales se interconectan y afectan el entorno escolar. La guía elaborada no solo integró aspectos clave de la crisis climática, sino que también promovió una comprensión holística y dinámica del fenómeno.

Esta propuesta de intervención curricular se diseñó a través del enfoque del paradigma de la complejidad, el cual permite resaltar la importancia de una educación que contextualice el mundo global y complejo en el que vivimos. Este enfoque promueve un aprendizaje desde el territorio, evitando enfoques reduccionistas y lineales.

En este caso particular, la intervención se desarrolló considerando los factores de gases de efecto invernadero (GEI), las quemas y la deforestación asociadas al cambio climático, fenómenos con interrelaciones altamente complejas

La propuesta de intervención pedagógica (PIP), propone integrar áreas curriculares y abordar problemas ambientales, a través de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), (ver figura 3).

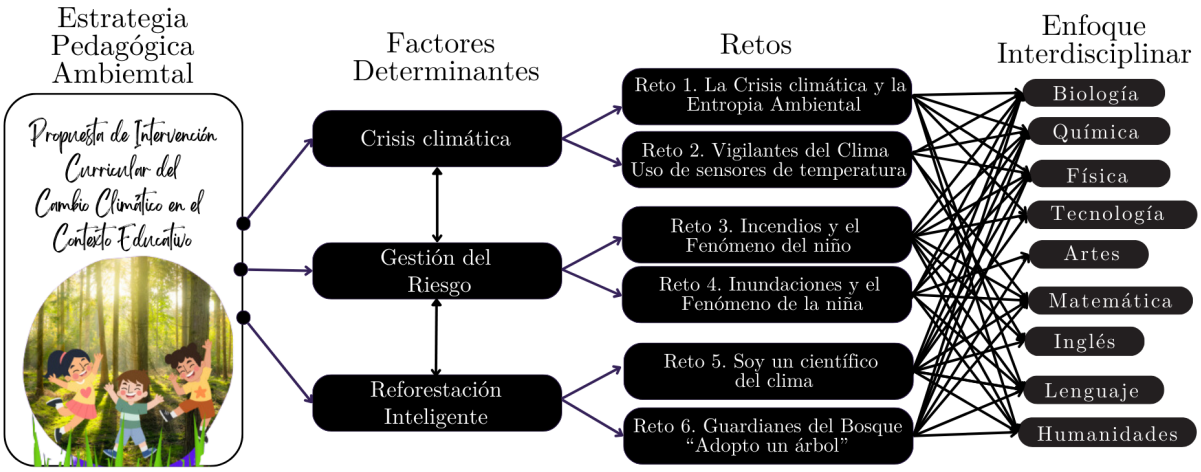


Fig 3. Red curricular de la propuesta de intervención pedagógica (PIP) de la crisis climática para el Desarrollo del PRAE. Fuente: elaboración propia.

Esta estrategia no solo contextualiza el aprendizaje dentro del entorno local, sino que también fomenta un enfoque no reduccionista y no lineal del conocimiento. Al conectar los contenidos curriculares con problemas ambientales reales, los estudiantes desarrollan habilidades críticas y un compromiso con la sostenibilidad y la mejora de su comunidad.

3.3 Evaluación de la Entropía Curricular de la propuesta de intervención pedagógica (PIP) de la crisis climática para el Desarrollo del PRAE: Caso de estudio

Para implementar un análisis de entropía en el diseño curricular de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), se puede recurrir al modelo de entropía de Shannon, (ver ecuación 1). Esta métrica permite medir la incertidumbre o diversidad en la estructura curricular, lo que resulta fundamental para evaluar su capacidad de adaptación y respuesta ante temas complejos como la crisis climática. Al cuantificar la diversidad de componentes educativos relacionados con el cambio climático, la deforestación y la gestión del riesgo, es posible determinar qué tan cohesivo y flexible es el currículo en la formación ambiental de los estudiantes, (Shannon, C. E., 1948), (Obregón N. & Romero C., 2013), (Mitchell, 2021).

- Definición de Componentes de la estructura curricular de la propuesta de intervención Pedagógica (PIP): después de identificar los componentes clave del currículo relacionados con la crisis climática. En la intervención interdisciplinar se consideraron:
    - Contenido sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI): la propuesta de intervención incluye dos retos sobre cómo estos gases afectan el clima y las estrategias para reducir sus emisiones, ver figura 3.
    - Gestión del Riesgo Climático (GRC): la propuesta de intervención propone dos retos que aborda la comprensión y la gestión de eventos climáticos extremos como: El Niño y La Niña.
    - Deforestación y Reforestación (DR): la propuesta integra dos retos enfocados en las causas de la deforestación y los métodos para mitigar sus efectos a través de la reforestación.
- Evaluación de la Entropía: En este caso de estudio se ha asignado probabilidades basadas en la capacidad del currículo para adaptar e incorporar nuevas estrategias pedagógicas, estimando la probabilidad p(x_i), para cada reto, actividad o laboratorio propuesto en los componentes de la estructura curricular de la intervención pedagógica (PIP). Este valor se basó en la proporción del tiempo dedicado a cada tema o el grado de interacción con los recursos didácticos y el grado de interconexión con las demás áreas del currículo.

Sustituyendo las probabilidades de los componentes de la estructura curricular de la intervención pedagógica (PIP), en el modelo de Shannon (ver ecuación 1) obtenemos el modelo:

$$E(C_{PIP}) = -[p(GEI)Log_2 p(GEI) + p(GRC)Log_2 p(GRC) + p(DR)Log_2 p(DR)]; \quad \text{(Ec. 4)}$$

Donde:

- $E(C_{PIP})$, es la entropía total de la estructura curricular de la intervención pedagógica.
- $p(GEI)$, es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- $Log_2 p(GEI)$, es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- $p(GRC)$, es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gestión del Riesgo Climático (GRC).
- $Log_2 p(GRC)$, es el logaritmo en base 2 dela probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gestión del Riesgo Climático (GRC).
- $p(DR)$, es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Deforestación y Reforestación (DR).
- $Log_2 p(DR)$, es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Deforestación y Reforestación (DR).

En efecto, si consideramos las siguientes probabilidades implementación de la intervención pedagógica en donde se asigna el 40% del tiempo curricular a actividades relacionadas con los gases de efecto invernadero (GEI), el 30% a la gestión del riesgo climático (GRC) y el 30% restante a la deforestación y reforestación, obtenemos:

$$E(C_{PIP}) = -[0.4Log_2(0.4)) + 0.35Log_2 p(0.30) + 0.25Log_2 0.30]; \quad \text{(Ec.5)}$$

$$E(C_{PIP}) = -[0.4 \cdot (-1.32) + 0.35 \cdot (-1.74) + 0.25 \cdot (-1.74)]; \quad \text{(Ec.6)}$$

$$E(C_{PIP}) = 0.528 + 0.522 + 0.522 = 1.57; \quad \text{(Ec.7)}$$

En efecto, el valor de la entropía curricular evidencia un valor de 1.57, por otro lado, teniendo en cuenta la ecuación 2, obtenemos que el valor máximo de entropía curricular para una estructura de tres componentes (n=3) es:

$$E(C_{PIP})_{max} = Log_2 3 \simeq 1.585; \quad \text{(Ec.8)}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación 3, el valor porcentual de la entropía curricular para el caso de estudio considerado es.

$$\%E(C_{PIP}) = \frac{E(C_{PIP})}{E(C_{PIP})_{max}} \cdot 100 = \frac{1.57}{1.585} \cdot 100 = 99.05\% \quad \text{(Ec. 9)}$$

El valor de entropía obtenido (99.05%) refleja una significativa diversidad y flexibilidad en el diseño de la intervención pedagógica, lo que indica que evidencia una gran capacidad para adaptarse a los distintos factores de la crisis climática en el contexto. Por otro lado,

la integración proporcional de los componentes de la intervención pedagógica promueve una formación integral, fomentando una comprensión interdisciplinar de los fenómenos climáticos. No obstante, este alto nivel de entropía también sugiere que, sin una adecuada organización y metodología en la implementación de las actividades, la estructura curricular podría volverse fragmentada, en este sentido, es importante mantener una cohesión entre las estrategias didácticas, los recursos y las distintas áreas disciplinares que conforman la estructura curricular.

3.4 Orientaciones Curriculares de la crisis climática en el Contexto Educativo

El módulo de intervención curricular se construyó desde una perspectiva de los estándares nacionales, sin embargo, queda abierto en el sentido que puede ser adoptado en otras instituciones del municipio, departamento y el país, donde reconozca la casualidad, la simultaneidad, incertidumbre, la no linealidad y las contradicciones, que conllevan la transformación de la sociedad, asimismo queda para consulta de la comunidad educativa, constituida por docentes y directivos docentes, estudiantes y padres de familia; ya que las actividades desarrolladas son de muy fácil adaptación y comprensión, este módulo puede ser socializado, mejorado, adaptado según las características de sus contextos y proyectos, porque son problemáticas comunes que en su gran parte afectan a nuestra región y país.

En la siguiente tabla se presentan las principales orientaciones curriculares tratadas en esta propuesta y relacionadas con el fenómeno del cambio climático:

Tabla 1. Orientaciones curriculares. Fuente: elaboración propia

Componentes del Modelo Curricular	Conceptos Dinamizados	Áreas Curriculares y Estándares
Crisis climática y entropía	Ciclos del carbono y nitrógeno, reacción química de combustión Gases de efecto invernadero (GEI), fotosíntesis, termodinámica y vida, energías alternativas, química atmosférica, Probabilidad de eventos climáticos extremos, análisis estadístico de GEI, interacciones bióticas y abióticas.	**Matemática:** probabilidad y estadística; **Artes:** visualización de datos climáticos, proyectos artísticos que representen el cambio. **Tecnología:** diseño de soluciones tecnológicas sostenibles, desarrollo de aplicaciones y herramientas para la gestión del riesgo y adaptación al cambio climático **Química:** compuestos orgánicos e inorgánicos, reacciones de fotosíntesis, química ambiental; **Física:** termodinámica; **Geografía:** biogeografía, cambios en el uso del suelo; **Humanidades:** impacto socioeconómico

Gestión del riesgo de las quemas	Fenómeno del Niño y de la Niña, gestión de huertos, tradiciones culturales, gestión responsable de residuos, modelos estocásticos para predicción de fenómenos del Niño y la Niña, análisis de datos históricos, fuentes de energía alternativa, eficiencia energética, estrategias de resiliencia, políticas de adaptación, Agricultura sostenible y seguridad alimentaria.	**Matemática:** procesos estocásticos; **Artes:** visualización artística de diferentes fuentes de energía; **Tecnología:** Energías alternativas, creación de prototipos de dispositivos energéticamente eficientes, sistemas de alerta temprana. **Química:** análisis de contaminantes **Geografía:** distribución de recursos naturales; riesgo y gestión de desastres; **Humanidades:** políticas energéticas, justicia climática
Deforestación	Conservación y restauración de bosques, ecosistemas, servicios ecosistémicos, evaluación probabilística de la pérdida de biodiversidad, análisis de tendencias de deforestación, Principios de reciclaje, reutilización y reducción.	**Matemática:** análisis de tendencias; **Artes:** creación de campañas visuales sobre la importancia de la biodiversidad, arte reciclado y reutilización de materiales. **Tecnología:** uso de tecnologías para el monitoreo y conservación de la biodiversidad, desarrollo de sistemas de reciclaje automatizados **Química:** procesos de reciclaje químico, biotecnología **Geografía:** flujos de materiales **Humanidades:** derechos ambientales, economía sostenible.

Estas directrices proporcionan un marco estructurado para integrar el estudio del cambio climático en todas las áreas curriculares y orientan a los docentes sobre la manera transversal de abordar este fenómeno para la sostenibilidad de la vida. Los componentes del modelo curricular incluyen la definición de objetivos específicos relacionados con la comprensión del cambio climático, la promoción de la sostenibilidad y acciones de resiliencia ambiental.

Los campos del conocimiento dinamizados en las interacciones de esta propuesta curricular: matemática, artes, ciencias naturales, geografía, humanidades y tecnología, enriquecen esta trama interdisciplinaria que advierte a los estudiantes para que desde diferentes perspectivas se comprendan las complejidades ambientales crecientes. Los estándares educativos activados de esta manera refuerzan la necesidad de desarrollar competencias, habilidades y capacidades como la investigación científica, la alfabetización climática y resolución activa de problemas ambientales.

Discusión: desafíos y retos

La implementación de enfoques interdisciplinares para los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), a través de redes complejas de mundo pequeño, representa una estrategia transversal que permite contextualizar la complejidad de los problemas ambientales

en las escuelas. Por su parte, estas redes facilitan la integración de diversas disciplinas académicas y actores sociales, promoviendo una visión integral y colaborativa del cuidado ambiental. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos.

La coordinación entre instituciones educativas, entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales es fundamental, que puede verse obstaculizada por diferencias en agendas y recursos disponibles. Otro reto significativo es la evaluación y medición del impacto real de los PRAE interdisciplinares, ya que los indicadores de éxito pueden variar según el contexto y las expectativas de los diferentes actores involucrados. A pesar de estos desafíos, el potencial de las Redes Complejas de mundo pequeño para transformar la educación ambiental mediante la integración de conocimientos de abajo hacia arriba y prácticas innovadoras activadas es considerable, ofreciendo una oportunidad única para fortalecer la conciencia ambiental y la acción de las comunidades educativas en sus territorios.

Desafíos Curriculares básicos de la crisis climática: establecer directrices curriculares que incorporen los resultados del modelo de redes complejas y la propuesta interdisciplinar para crear unidades transversales en el currículo, en particular:

a. Fundamentos básicos de la epigenética, cultura de la biodiversidad que hace sostenible la vida en el suelo, el aire y entre contextos interespecies.

b. Fundamentos básicos de la bioquímica sustentada en conocimiento de los procesos fotosintéticos y tróficos.

c. Fundamentos básicos de fisicoquímica sustentada en la termodinámica del no equilibrio, desgaste de energía provocada por la expansión de los gases de efecto invernadero, expresada en la entropía creciente en el contexto abierto de la biosfera.

d. Fundamentos básicos de biofísica que promueve la práctica en la cultura física y el disfrute educativo no sedentario de la naturaleza.

e. Fundamentos básicos de la bioeconomía generativa y sostenible a largo plazo de los servicios ecosistémicos para afianzar el bienestar de las comunidades.

Frente a la mitigación y adaptación al cambio climático, estas ideas fundamentales orientadoras explican la interdisciplina creciente de un sistema curricular que activa motivaciones por aprendizajes que hacen indistinguible en la cotidianidad los procesos teóricos o prácticos.

4. Conclusiones

Los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) representan una estrategia educativa integral que va más allá de la mera transmisión de conocimientos sobre el cambio climático.

Según investigaciones recientes, como el estudio sobre el enfoque interdisciplinar para el desarrollo de los PRAE, estos programas están diseñados para cultivar habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la participación de la ciudadanía activa. Estas habilidades no solo empoderan a los estudiantes para comprender y abordar los desafíos ambientales, sino que también los preparan para convertirse en agentes de cambio en sus comunidades.

La entropía educativa en los PRAE se manifiesta a través de la diversidad y complejidad de actividades interdisciplinarias que involucran a múltiples actores educativos y comunitarios. Estos proyectos no se limitan al aula; implican a estudiantes, docentes, padres de familia y miembros de la comunidad en la investigación, la acción y de sensibilización global frente a esta problemática. Esta colaboración activa y multifacética fortalece el aprendizaje significativo al conectar teoría y práctica en contextos reales, promoviendo así un compromiso sostenible con el medio ambiente desde una edad temprana.

Asimismo, la entropía curricular en los PRAE es clave para medir la diversidad y complejidad del currículo, lo que refleja su adaptabilidad frente a la crisis climática. Un currículo con alto valor de entropía promueve una educación flexible y dinámica, capaz de abordar múltiples aspectos del cambio climático, desde la gestión de riesgos climáticos hasta la reducción de GEI y la deforestación. No obstante, esta complejidad debe gestionarse con claridad pedagógica para evitar una pérdida de cohesión en el contenido.

La implementación de Redes Complejas del Cambio Climático en los PRAE es fundamental para optimizar su impacto. Basándose en los principios de las Redes de Mundo Pequeño, estos proyectos pueden gestionar de manera efectiva la información, los recursos y las acciones necesarias para abordar los desafíos ambientales locales. Este enfoque propone una gestión ambiental escolar adaptable y colaborativa, permitiendo a las escuelas adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno mientras fomentan una cultura de sostenibilidad.

Entre tanto, este enfoque interdisciplinar no solo genera entre los estudiantes conocimientos contextualizados, sino que también fomenta habilidades y potencialidades esenciales para el ejercicio responsable de la ciudadanía. Al integrar redes complejas y principios de mundo pequeño, estos proyectos se convierten en herramientas poderosas para la transformación educativa y ambiental.

Referencias

- Ausubel, p david. (1968). *Education Psychology A Cognitive View.* http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.112045
- Barabasi, A.-L. (2003). *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life.*
- Bastian, M. (2009). *(PDF) Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks.* https://www.researchgate.net/publication/221297890_Gephi_An_Open_Source_Software_for_Exploring_and_Manipulating_Networks
- Bateson, G. (with Internet Archive). (1979). *Mind and nature: A necessary unity.* New York : Dutton. http://archive.org/details/mindnaturenecess0000bate
- Bryk, A. S., & Schneider, B. (2002). *Trust in Schools: A Core Resource for Improvement.* Russell Sage Foundation. https://www.jstor.org/stable/10.7758/9781610440967
- Candia, C., Pulgar, J., & Pinheiro, F. (2022). *Interconnectedness in Education Systems.*
- Castro Sáez, B. (2001). LA ORGANIZACION EDUCATIVA: UNA APROXIMACION DESDE LA COMPLEJIDAD. *Estudios pedagógicos (Valdivia), 27*, 97-110. https://doi.org/10.4067/S0718-07052001000100007
- Chevalard, Y. (2013). *Chevalard, Y. La Trasposición Didáctica.* http://archive.org/details/chevalard-y.-la-trasposicion-didactica
- Dawson, J. L. (2021). *A Guide to Feedback Theory.* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781139018289
- Edgar Morin. (2006). *Morin, Edgar. El Método. Vol. 1. La Naturaleza De La Naturaleza [ocr] [2006].* http://archive.org/details/morin-edgar.-el-metodo.-vol.-1.-la-naturaleza-de-la-naturaleza-ocr-2006
- Fritzsch, H. (2018). Quarks. En H. Fritzsch (Ed.), *Murray Gell-Mann and the Physics of Quarks* (pp. 49-51). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92195-2_5
- Fullan M. (2007). *El nuevo significado del cambio educativo* -. https://michaelfullan.ca/books/new-meaning-educational-change/
- Gell-Mann, M. (1994). *Complex Adaptive Systems* (G. Cowan, D. Pines, & D. Meltzer, Eds.; 19; Número 19, pp. 17-45). Addison-Wesley. https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20150924-144445402
- Hattie, J. (2009). *Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement.* En Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. https://doi.org/10.4324/9780203887332
- Herrington J., Oliver Ron. (2000). *An instructional design framework for authentic learning environments | Educational technology research and development.* https://link.springer.com/article/10.1007/BF02319856
- Holland, J. H. (2005). *El Orden Oculto*. Fondo de Cultura Economica USA.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 4*(Volume 4, 1973), 1-23. https://doi.org/10.1146/annu-

rev.es.04.110173.000245

- Korthagen Fred A.J. (2009). Situated learning theory and the pedagogy of teacher education: Towards an integrative view of teacher behavior and teacher learning. *CETAR, VU University, Amsterdam, The Netherlands.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://korthagen.nl/en/wp-content/uploads/2018/07/Situated-learning-theory-and-the-pedagogy-of-teacher-education.pdf
- Krajcik j. y Blumenfeld P. (2005). *Project-Based Learning (Chapter 19)—The Cambridge Handbook of the Learning Sciences.* https://www.cambridge.org/core/books/abs/cambridge-handbook-of-the-learning-sciences/projectbased-learning/355AA45D92D7FCD5D312FD1C343FDBB2
- Leff, E. (2000). *Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder / E. Leff.*
- Leinster, T. (2020). *Entropy and diversity The axiomatic approach.*
- Maldonado, C. E. (2016). Pensar como la naturaleza. Una idea radical. *Uni-pluriversidad, 16*(2), 41-51.
- Maturana, H. R. (with Internet Archive). (1980). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living.* Dordrecht, Holland ; Boston : D. Reidel Pub. Co. http://archive.org/details/autopoiesiscogni0042matu
- Minambiente. (2019). *Guía PRAE.* https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/guia-prae/
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review, 45*(2), 167-256. https://doi.org/10.1137/S003614450342480
- Penrose Roger , Jorgensen Palle. (2008). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe.* https://www.researchgate.net/publication/226597688_The_Road_to_Reality_A_Complete_Guide_to_the_Laws_of_the_Universe
- Perkins, D. (2009). *Making learning whole: How seven principles of teaching can transform education: Perkins, David N : Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive.* https://archive.org/details/makinglearningwh0000perk
- Perkins, D. (2023). *Perkins, D. Educar Para Un Mundo Cambiante ¿ Qué Necesitan Aprender Realmente Los Alumnos Para El Futuro.* http://archive.org/details/perkins-d.-educar-para-un-mundo-cambiante-que-necesitan-aprender-realmente-los-a
- Prigogine, I. (1997). *Prigogine, Ilya. Las Leyes Del Caos [ocr] [1997].* http://archive.org/details/prigogine-ilya.-las-leyes-del-caos-ocr-1997
- Prigogine, I., & Rysselberghe, P. V. (1963). Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. *Journal of The Electrochemical Society, 110*(4), 97C. https://doi.org/10.1149/1.2425756
- Shannon, C. E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication.*
- Stiggins, R. (2005). From Formative Assessment to Assessment for Learning: A Path to Success in Standards-Based Schools. *Phi Delta Kappan, 87*(4), 324-328. https://doi.org/10.1177/003172170508700414

Referencias

- Teilhard de Chardin. (1969). *Teilhard de Chardin, El-Fenomeno-Humano.pdf.* https://1library.co/document/y65j417z-teilhard-de-chardin-el-fenomeno-humano-pdf.html
- UNESCO. (2003). *La Educación ambiental: Pilar de un desarrollo sostenible—UNESCO Biblioteca Digital.* https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000132190_spa
- Walker, B., Holling, C. s, Carpenter, S., & Kinzig, A. (2003). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems. *Ecol. Soc., 9.* https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of «small-world» networks. *Nature, 393*(6684), 440-442. https://doi.org/10.1038/30918
- Wilensky, U; Randall. (2015). *Introducción al modelado basado en agentes: Modelado de sistemas naturales, sociales y complejos diseñados con NetLogo | Libros electrónicos de MIT Press | Exploración IEEE.* https://ieeexplore.ieee.org/book/7109293
- Yakman, G., & Marketing, S. (2017). *STEAM Education Professional Development Practicum & Research.* https://www.academia.edu/33856479/STEAM_Education_Professional_Development_Practicum_and_Research

Impacto del cambio climático sobre el paisaje

Fecha de recepción: 21-11-24 / Fecha de aceptación: 01-03-25

Joan Manuel Montealegre Hermosa
Magíster en Ingeniería Ambiental e investigador del proyecto Ondas MinCiencias Usco

Correo electrónico: joan.montealegre@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6956-3783

Resumen

El presente trabajo se realiza recopilaciones de datos, descripciones, modelizaciones y simulaciones de las interrelaciones dinámicas entre la variabilidad climática y la evolución del paisaje que sustenta el parque Arqueológico de San Agustín Huila y sus nexos con las actividades entrópicas que ocurren en su entorno cercano constituido por las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda, con el fin conocer la dinámica de su índice de vulnerabilidad y en consecuencia la sostenibilidad ambiental de esta zona de vida. Lo cual es motivado porque dicho paisaje protege un patrimonio cultural de la Nación Colombiana, declarado como tal por la UNESCO en 1995.

Palabras Clave: Antrópico; Parque Arqueológico de San Agustín; Variabilidad climática; Paisaje; Exposición; Sensibilidad; Capacidad adaptativa; Índice de vulnerabilidad.

Abstract

The present work is carried out data compilations, descriptions, modeling and simulations of the dynamic interrelationships between climate variability and the evolution of the landscape that sustains the Archaeological Park of San Agustin Huila and its links with the entropic activities that occur in its nearby environment constituted through the Mesitas, La Estrella and New Zealand paths, in order to know the dynamics of their vulnerability index and consequently the environmental sustainability of this life zone. Which is motivated because said landscape protects a cultural heritage of the Colombian Nation, declared as such by UNESCO in 1995.

Keywords: Anthropic; San Agustin Archaeological Park; Climate variability; Landscape; Exposure; Sensitivity; Adaptive capacity; vulnerability Index.

1. Introducción

Este artículo trata de aproximarnos al conocimiento de las afectaciones observadas del clima sobre el paisaje que sustenta el Parque Arqueológico de San Agustín y sus relaciones con la actividad socioeconómica que se realiza en su entorno próximo; puesto que se trata de una dinámica con vínculos prácticos y teóricos de evidente trascendencia para sostenibilidad cultural, social, ecológica, económica de uno de los lugares más significativos del Huila y Colombia. Con ayudas de simulaciones con modelo construidos con paquetes computacionales NETLOGO, WEKA; el Programa R, para graficar el comportamiento de temperatura con datos registrados por el IDEAM de la estación del parque Arqueológico de San Agustín durante del periodo comprendido de los años 2000 al 2020; El QGIS para identificar la cobertura vegetal por medio de registro satelital y su proyección hasta el año 2025 sobre la dinámica de la cobertura vegetal con énfasis en cobertura de bosque muy saludable, por ultimo realizar una estimación del índice de vulnerabilidad a que está sometida la población de la zona y el paisaje. lo que permitió ajustar los programas para los modelos de simulación utilizado en este proyecto de investigación.

El cambio climático genera variabilidad bruscas en la temperaturas y régimen de lluvias que perturban el ecosistema (Alteri, Miguel A., 2013) comprometiendo la vida en su conjunto, en cuanto afecta diversidad vegetal, complejidad del paisaje, manejo del suelo y existencia del agua. En un estudio previo sobre la misma región (Serrano Vasquez, 2016) se propone potenciar la capacidad de resistir y recuperar, frente a la incertidumbre de estos fenómenos de variabilidad climática, generar turismo cultural sostenible que priorice el bienestar de la comunicad que habita esta zona y que sea compactibles con el denominado agroturismo.

Según lo propuesto el en Panel Intergubernamental sobre el cambio climático, por sus siglas en inglés (IPCC, 2014) pagina 572, evaluamos cambio climático debido a la variabilidad climática como función de la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa de sus habitantes.

En este estudio sobre cambio climático resultó relevante para conocer la evolución del paisaje (Gavier, 2018) para simular la dinámica en la transformación del bosque a la agricultura (Brown, 2008), quien desarrolló un modelo espacio-temporal de la dinámica de maximización de la utilidad de cultivos frente a la cobertura forestal. La toma de decisiones de los agricultores se basa en preferencias personales que están representadas por la importancia relativa de los diversos factores que influyen en los agricultores en la toma de decisiones sobre el uso de la tierra.

2. Problema de investigación.

El parque Arqueológico de San Agustín es un patrimonio cultural de la humanidad

desde 1995, su entorno próximo está constituido por tres veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda; este entorno ubicado en el macizo colombiano tradicionalmente se ha caracterizado por ser un territorio verde. Pero en los últimos años se percibe un deterioro ambiental que pone en peligro las crecientes actividades ecoturísticas, agroecológicas y factores que afectan la calidad de vida de los habitantes nativos. Este articulo corresponde al proyecto de tesis (Montealegre, 2021) y se relaciona en el numeral 13 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU en la Agenda 2030, en lo que se refiere Acción por el Clima y conservación del bosque. Se ha desarrollado la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo afecta la variabilidad climática y actividades antrópicas el entorno próximo del parque arqueológico de San Agustín, Huila?

El objetivo general se definió como: "Estimar los Riesgos causados por la variabilidad climática y las prácticas socioculturales adversas que afectan la sostenibilidad ambiental a mediano plazo del paisaje constituido por el entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila, como zona de vida"; a través de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el estado del paisaje del entorno próximo del Parque Arqueológico de San Agustín Huila.
- Construir un modelo para cobertura vegetal y afectaciones climáticas sobre paisaje del entorno próximo al parque Arqueológico de San Agustín
- Establecer el Índice de Riesgo derivado de los impactos climáticos y antrópicos que afectan la zona de vida de este entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila.

La ejecución de este proyecto de investigación se justificó porque este paisaje es vulnerable a la variabilidad climática y antrópica, pues el aumento de las temperaturas afecta la existencia de nacederos, los sombríos, los senderos, ambientes apropiados para la vida, afecta la calidad de los cultivos y provoca la proliferación de malas hierbas y plagas. Los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas.

La variabilidad climática es real y amenaza con socavar la sostenibilidad social y ambiental de este patrimonio cultural de la humanidad, en particular la del paisaje que soporta el ecoturismo y turismo cultural en esta región de Sur del Huila, por esta razón la modelización de la evolución de la cobertura vegetal es muy importante para crear estrategias de mitigación sobre los efectos negativos del fenómeno del niño y de la niña.

3. Referentes teóricos

3.1 Marco Conceptual

Es fundamental aclarar los siguientes conceptos tomados del IPCC 2014, los cuales lo

relacionamos a seguir:

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.

Antrópico: hace referencia al efecto ambiental provocado por la acción del hombre.

Exposición: La presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.

Impactos: Efectos en los sistemas naturales y humanos, los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos.

Paisaje: Entorno geográfico superficial, integrado por componentes naturales y complejos de diferente rango taxonómico que es formado bajo la influencia de los procesos naturales y de la actividad modificadora del hombre.

Peligro: Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

Riesgo: Potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro.

Sensibilidad: Es el grado en el que un sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio, interno, externo o un grupo de ellos. La medida determina el grado en el que un sistema se puede ver afectado por un estrés, son las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos por un determinado fenómeno.

Variabilidad climática: Es una medida del rango en que los elementos climáticos, como temperatura o lluvia, varían de un año a otro.

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

3.2 Estado del Arte.

Estudiamos con detalle los siguientes documentos que nos sirven como antecedentes para este estudio del paisaje del entorno del Parque de San Agustín:

En (Villalba Corredor & Malagón, 2011) se hace un estudio en el parque arqueológico como un lugar mágico con estructuras funerarias, elementos escultóricos como guardines e íconos para la comunidad de la región, como la Fuente de Lavapatas.

En (Álvarez, Bateman, Quintero, & Ramírez, 2007) se hace un estudio relacionando la conservación en el Parque de San Agustín y su área de influencia, considerando los siguientes: la caracterización de las categorías de bienes arqueológicos que constituyen el Parque; el diagnóstico de su estado actual; los principios y criterios que rigen la conservación y los programas y proyectos que deben ser desarrollados en los próximos años.

En (Lasso Valderrama & Nelly Yunda, 2017) se realizó la evaluación y seguimiento al Plan de Ordenación y Manejo de la Microcuenca de la Quebrada el "Quebradón" ubicada en el municipio de San Agustín Huila, con el objetivo de verificar los avances y el porcentaje de cumplimiento de cada uno de los programas y proyectos planteados en dicho plan, las cuales garantizarían en gran medida la solución a los problemas ambientales presentados en su momento.

En (Perdomo Quesada & Polania Pérez, 2019) se implemento un modelo matemático y computacional utilizando autómatas celulares que permitió observar la dinámica en cuanto al cambio de cobertura que sufrió el complejo de humedales ubicado en el oriente de Neiva de un registro del año 1961, el cual muestran cambios de cobertura que evidencian el drástico decrecimiento que han tenido las zonas verdes y los cuerpos de agua.

En (Serrano Vasquez, 2016) se propone que el turismo cultural en los municipios de San Agustín e Isnos sea sostenible, involucrando a la comunidad con alternativas, tales como inversión social y evitar el sobrecupo de turistas, para controlar las afectaciones ambientales. De esta manera se beneficia directamente a la población de la región.

En (IPCC, 2014) este grupo Intergubernamental de expertos, establece una metodología para la estimación de la variabilidad climática, con base en la adaptación y la vulnerabilidad a que están sometidos los ecosistemas.

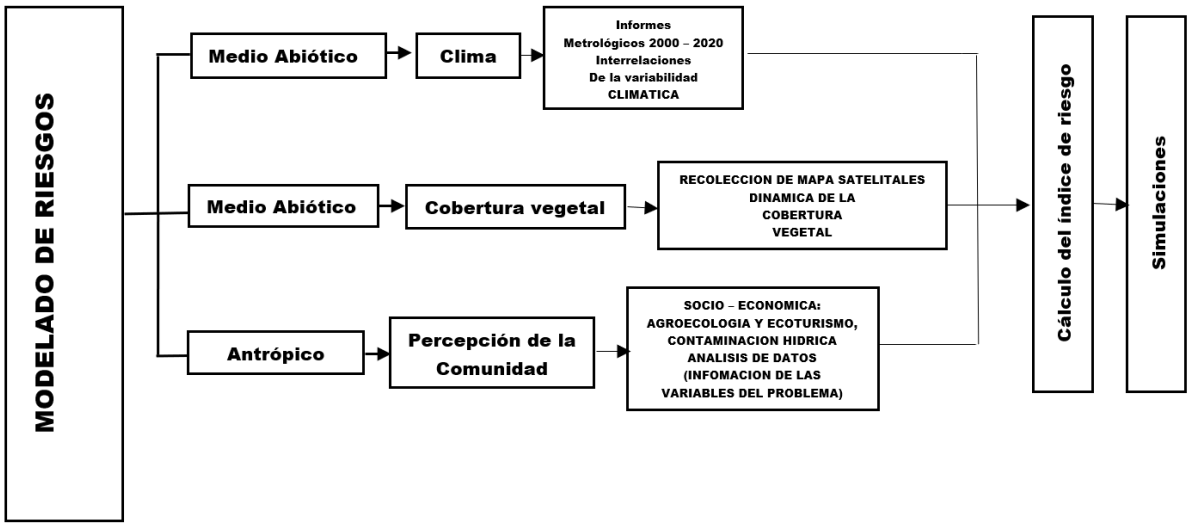
4. Metodología

El Parque Arqueológico de San Agustín tiene coordenadas 1°55'00"N 76°14'00"O, está ubicado en un sector del Macizo Colombiano al sur del departamento del Huila, cubre un área de aproximadamente 78 hectáreas a una altitud de 1.730 m s. n. m., Distancia del casco urbano: 2.5 Kms. al Oeste del poblado de San Agustín y a 33 kilómetros de la población de

Pitalito en el Huila y a 220 kilómetros de la ciudad de Neiva, la capital departamental. Es considerado como la Necrópolis más grande del mundo y declarada por la Unesco como Patrimonio de la Humanidad

La metodología empleada en el presente trabajo de investigación es correlacional, descriptiva no experimental; en la que se recopilaron datos, se describieron y se realizaron modelizaciones dinámicas entre la variabilidad climática y la evolución de este paisaje con sus nexos antrópicos y aplicando la metodología descrita en la siguiente figura.

Figura 1. Modelo Metodológico



Se consultaron estudios previos sobre la historia, el estado de desarrollo socio-económico del entorno cercano. A partir de salida de campo se identificaron las variables del problema, se recopilaron y seleccionan datos a partir de: entrevistas a los habitantes, productores agropecuarios, operadores de turismo, comunidades nativas y sus organizaciones comunitarias. Para completar el diagnóstico y la visión de los actores sociales se aplicaron y procesaron 40 encuestas.

Para el estudio del paisaje y sus afectaciones climáticas se estudiaron datos de temperatura del IDEAM, plan de manejo del ICANH, conocimiento y evolución de los estados de la cobertura del suelo con imágenes satelitales de la zona comprendida por las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda del Municipio de San Agustín.

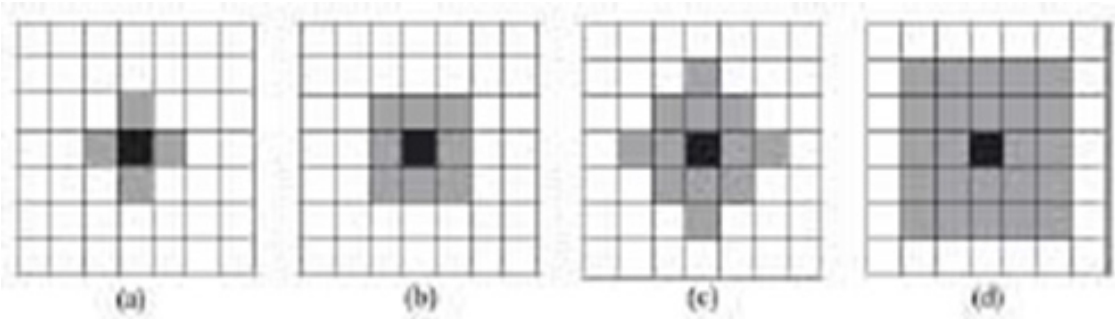
Como última etapa de este proceso y siguiendo la metodología propuesta por el IPCC 2014, se puedo estimar el índice de Riesgo de vulnerabilidad actual y la simulación dinámica de sus escenarios posibles, según se adoptan conductas que favorezcan o desfavorezcan la ruta hacia la sostenibilidad ambiental.

5. Resultados y análisis

5.1 Autómatas Celulares

Para describir la evolución del paisaje adoptamos el modelo de los autómatas celulares (AC), como sistema dinámico discreto compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Estos estados pasan de uno a otro en instante tiempo discreto o con valores enteros que cuantifican intervalos regulares. Los cambios que presentan las celdas están determinados por una expresión matemática, que es sensible a los estados de las celdas vecinas, la cual se le conoce como regla de transición local. (Reyes Gómez, 2011).

Figura 2. Vecindad de Autómatas Celulares



Fuente. https://sites.google.com/site/manualnetlogo/

Función Local. Es la regla de evolución que determina el comportamiento del AC. Se conforma de una célula central y sus vecindades. Define como debe cambiar de estado cada célula dependiendo de los estados anteriores de sus vecindades. Puede ser una expresión algebraica o un grupo de ecuaciones (Reyes Gómez, 2011, pág. 4).

5.2 Cadenas de Markov

Se representan mediante matrices de probabilidades de transición, designada por Pij, (Scherer, 1972), representa la probabilidad de moverse del estado i al estado j en tiempo t , representado por la expresión ϖ_i (t), y la probabilidad de un cambio de uso de i a j durante un intervalo de tiempo (t,t+1) como P_ij (t,t+1), entonces la probabilidad de que esa parcela esté en una categoría de uso j en el tiempo (t+1), será dada por la expresión probabilística siguiente:

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} \pi_i(t) * P_{ij}(t, t+1), \qquad (1)$$

donde (n) es el número total de categorías de uso. Simplificando, se tiene

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P. \qquad (2)$$

$$\text{donde, } P_{ij} = P\left(X_{n+1} = s_j \middle| X_n = s_i\right) \Longrightarrow P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

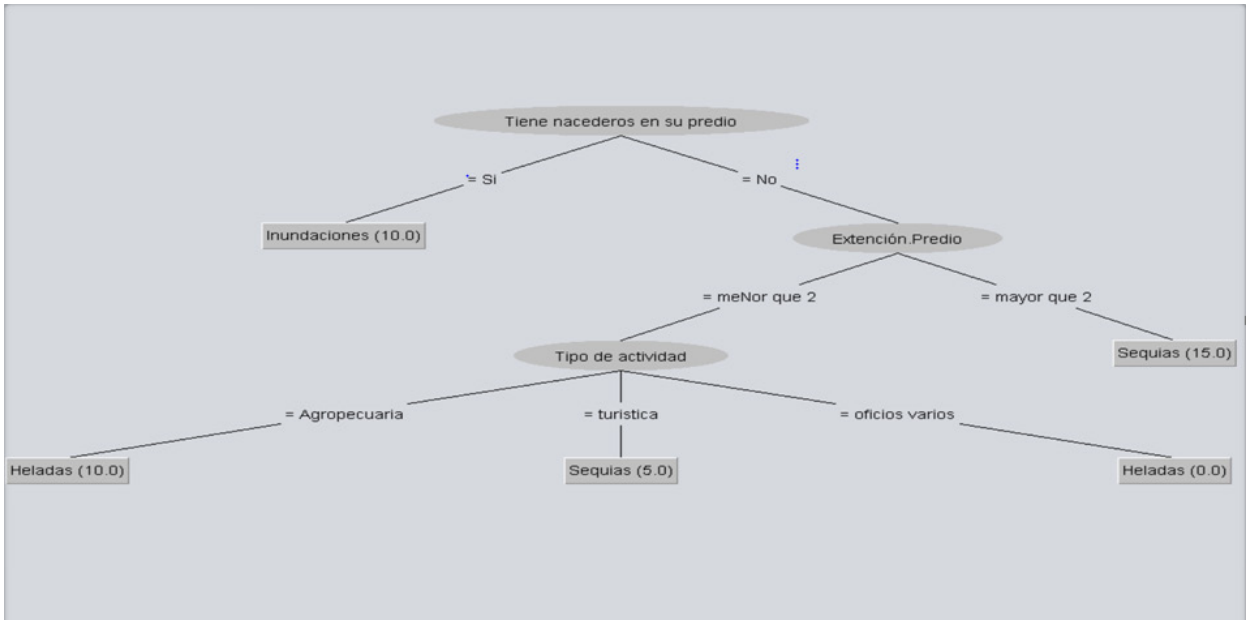
5.3 Análisis de resultados

5.3.1 Percepción de los habitantes.

Para completar la percepción que tiene los habitantes de esta zona se aplicó una encuesta a 40 propietarios escogidos entre las 174 familias mencionadas por la Juntas de Acción Comunal que habitan en las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda. Con los resultados de estas encuestas se construye el árbol de decisión de este problema, el cual se describe a continuación.

El árbol de decisión se construye maximizando el valor esperado en la categorización de las variables dependientes e independientes del problema. Este árbol se construye categorizando variables con las reglas "Si-Entonces", particularmente se usa herramienta de minería de datos, en este caso mediante una encuesta hemos escogido el software WEKA para obtener un árbol de decisión para el problema de la sostenibilidad ambiental del paisaje que está en el entorno del Parque Arqueológico de San Agustín (Huila).

Figura 3. Árbol de decisión usando el algoritmo J48 obtenido de WEKA



WEKA nos arroja los siguientes resultados, el cual generara un recuadro con el resumen del árbol generado, con respecto a las opiniones de los encuestados dice:

- Si una persona tiene nacederos en su predio entonces tiene problemas de

Inundaciones en sus cultivos.

- Si no tiene nacederos en su predio, entonces para conocer las afectaciones de vulnerabilidad climática, dependerá de la Extensión del predio.
- Si la Extensión del predio es menor a 2 HA, Entonces dependerá del tipo de actividad a la que se dedican.
- Si la actividad es agropecuaria tendrán problemas de heladas.
- Si una persona tiene nacederos en su predio entonces tiene problemas de Inundaciones en sus cultivos dependerá de la extensión del predio.
- Si la Extensión del predio es menor a 2 HA, Entonces dependerá del tipo de actividad a la que se dedican.
- Si la actividad es agropecuaria tendrán problemas de Heladas.
- Si la extensión de predio es mayor a 2HA, entonces tendrá problema de Sequia sus cultivos.

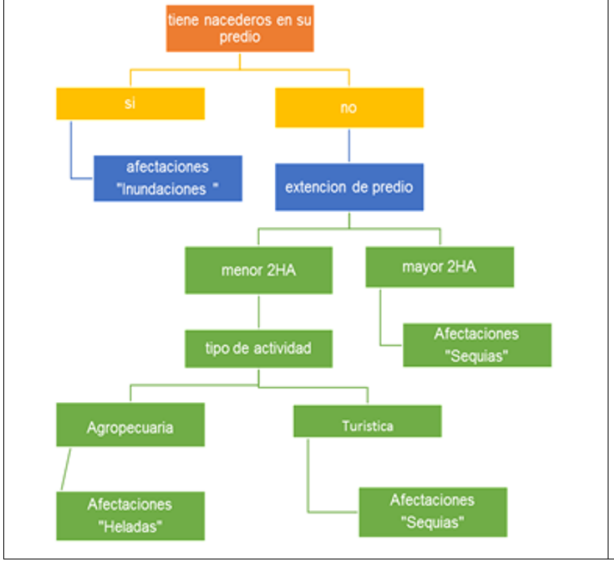
Se observa que el sistema experto categorizó como variable de salida la existencia de nacederos en los predios como es natural en los problemas de sostenibilidad de este tipo de paisajes.

La construcción de los árboles de decisión comienza con la pregunta: ¿Qué variable de entrada debe ser la raíz del árbol?. Cada variable de entrada es evaluada usando un examen estadístico para determinar qué tan bien esta variable clasifica los patrones de entrenamiento, por medio de la entropía. Para aclarar la percepción que tienen los habitantes de esta zona adoptamos el concepto de entropía, medida de la teoría de la información medida S, que se define como:

$$Entropia\ (S) = \sum_{i=1}^{i} -p_i log_2(p_i) \qquad (4)$$

Ahora se procede a evaluar la entropía promedio de cada una de las variables de entrada y así poder calcular la ganancia de información del sistema con la respectiva variable. La variable de entrada que proporcione la mayor ganancia de información al sistema será el nodo inicial y resulta el siguiente árbol de decisión, se calcula la entropía de la información, para ello se calcula la entropía de la variable de salida:

Figura 4. Ganancia de entropía con el Árbol de decisión



variable de salida:

$$E(S) = -\sum_{n=1}^{i} p_i \ log_2 \ (p_i) \quad (5)$$

$$SP_1 = -\frac{10}{40} log_2 \left(\frac{10}{40}\right) - \frac{30}{40} log_2 \left(\frac{30}{40}\right) \quad (6)$$

$$SP_1 = 0{,}81$$

$$S_3 = -\frac{14}{20} * \log_2 \frac{14}{20} - \frac{1}{20} \log_2 \frac{1}{20} = 0{,}516 \text{ Agropecuario} \quad (7)$$

$$S_4 = -\frac{4}{20} * \log_2 \frac{4}{20} - \frac{1}{20} \log_2 \frac{1}{20} = 0{,}680 \text{ Turistico} \quad (8)$$

Procedemos a calcular su ganancia:

$$Agropecuario = 0{,}576 * 15 = 8{,}64$$

$$Turistico = 0{,}680 * 5 = 3{,}40$$

$$Total = \frac{12{,}04}{40} = 0{,}31$$

$$Ganancia = 0{,}81 - 0.31 = 0{,}509$$

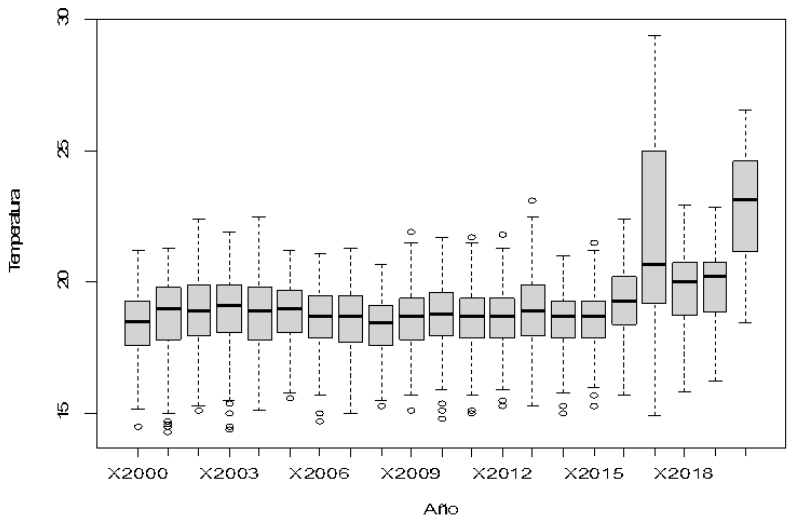
La ganancia de información es una propiedad estadística que mide que tan bien una variable dada separa los patrones de entrenamiento para seleccionar las variables candidatas en cada paso del crecimiento del árbol.

Primero nos centramos en el estudio de la minería de datos, para analizar las percepciones de la gente y así marcar en detalle los conceptos más importantes de esta metodología para clasificar la información basado en las encuestas como soporte para hallar el índice de Riesgo.

5.3.2 Variabilidad Climática

A partir de datos climatológicos de los años 2000 y 2020 proporcionados por el IDEAM en la estación Parque Arqueológico, se realizó el siguiente análisis sobre la variabilidad climática afecta la zona de estudio. Se estudio la serie temporal X_t para analizar la temperatura media diaria, es decir, 7605 datos diarios.

Figura 5. Diagrama de caja por año



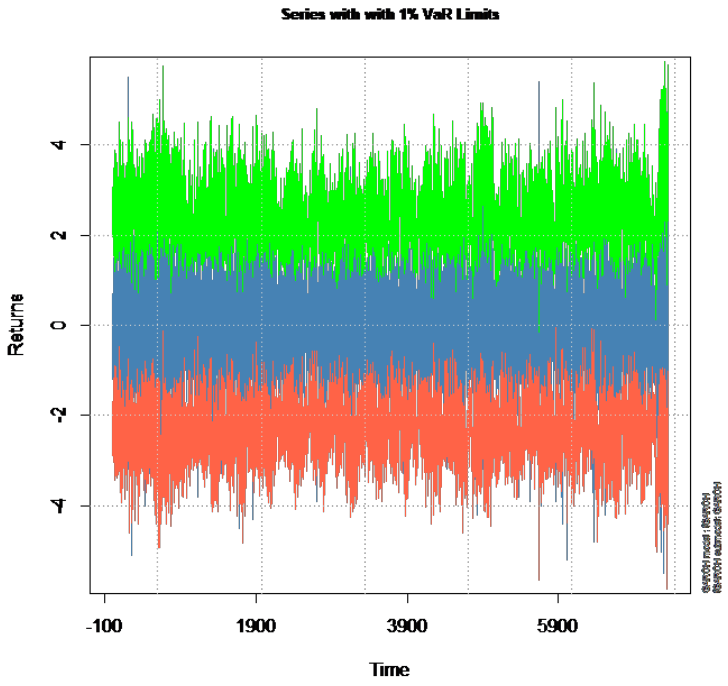
Al realizar una regresión lineal a los datos en cuestión se observa, que en promedio la temperatura diaria en la estación meteorológica del parque San Agustín es de 17.353°C con un incremento diario de 0.0006°C. En el año 2017 la variación de temperatura con respecto a la media fue de 1.65°C.

la mediana de la temperatura para cada año no varía drásticamente desde el año 2000 hasta el año 2016, presentando varios valores atípicos que expresan las bajas y altas temperaturas fuera de lo normal.

En los cuatros últimos años se ha presentado un incremento significativo en las temperaturas diarias, incluyendo la mediana por año, donde hay que tener en cuenta que el año 2017 se presentó el fenómeno del niño en el cual la temperatura media fue de 19°C.

Para ello apartir de la serie temporal X_t referente a la temperatura estudiamos las series de variaciones R_t, $R_{t+1}=X_t-X_{t-1}$. La variabilidad y volatilidad se observa en la siguiente figura 6 obtenida en con R-project a partir de los datos proporcionados por el IDEAM, la variabilidad es de color azul, y la volatilidad de color verde y rojo.

Figura 6. volatilidad y variabilidad



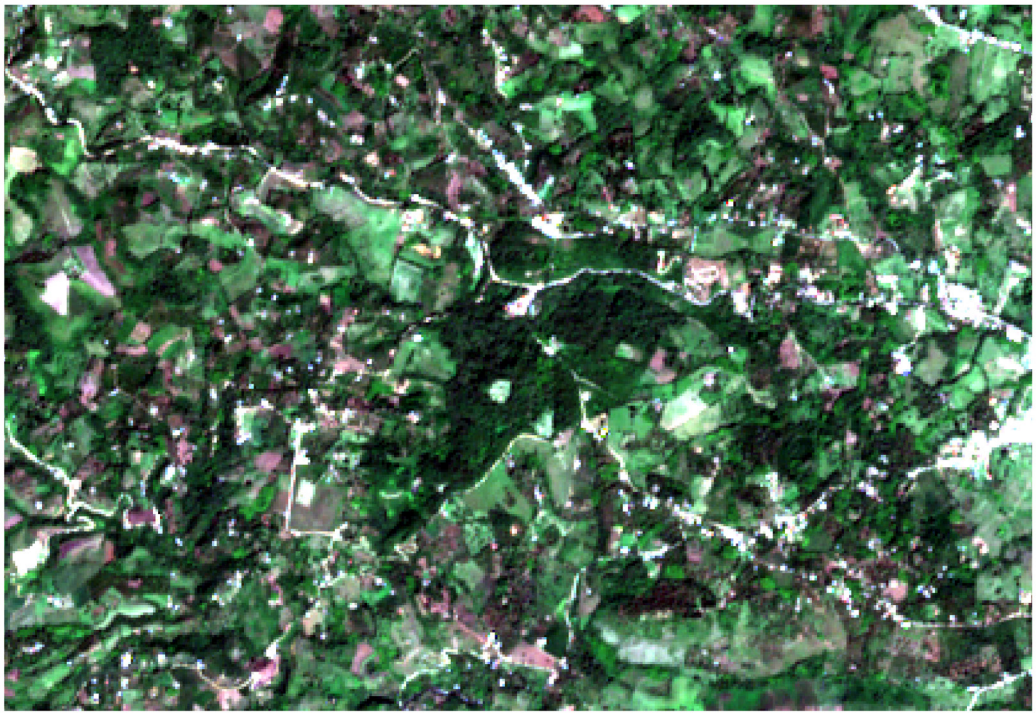
5.3.3 Dinámica de la cobertura vegetal

Con el propósito de analizar los patrones y tendencias de los cambios que tiene el material vegetativo alrededor del parque arqueológico de San Agustín, con especial énfasis las áreas que tienen mayor densidad de material vegetativo, se analiza la distribución espacial de distintas categorías de material vegetativo y su evolución durante los últimos años.

Donde se lleva a cabo un análisis multi-temporal de las coberturas del material vegetativo registradas en la imagen satelital seleccionada.

Las categorías de material vegetativo seleccionadas para las áreas de estudio se toman del NDVI - Índice de vegetación de diferencia normalizado.

Figura 7. Cobertura del material vegetativo



Donde el índice de vegetación cuyo resultado oscila entre -1 y 1, cuyos valores menores a 0,1 se interpreta como suelos desnudos o muerto, mayores a estos va en relación equivalente a la cobertura vegetal, indican la actividad de las diversas coberturas, así, los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que, los valores grandes (de 0,6 a 0,8), matorrales, bosque templado y tropicales, selva y actividad agrícola.

Tabla 1. Categorías del análisis multitemporal

	Valor NDVI	Descripción
	Valor < 0	El material inanimado/muerto, por ejemplo: Carreteras, viviendas o las plantas muertas.
	0 < valor < 0.33	Material vegetativo no saludable.
	0.33 < valor < 0.66	Material vegetativo saludable.
	0.66 < valor	Material vegetativo muy saludable

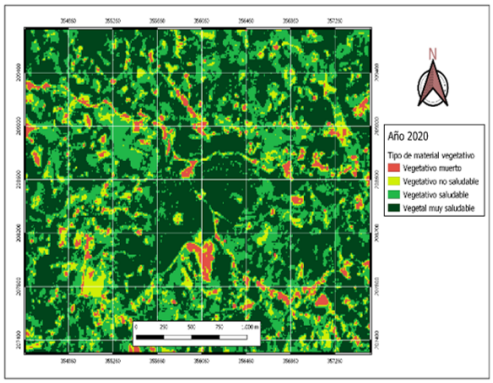
El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinando los píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales.

Del estudio satelital se obtiene el siguiente resumen de categorías de los años 2015, 2017 y 2020, nos permite evaluar que material vegetativo han reemplazado a otros, además del

crecimiento o decrecimiento de cada uno, lo que se deriva del análisis estadístico.

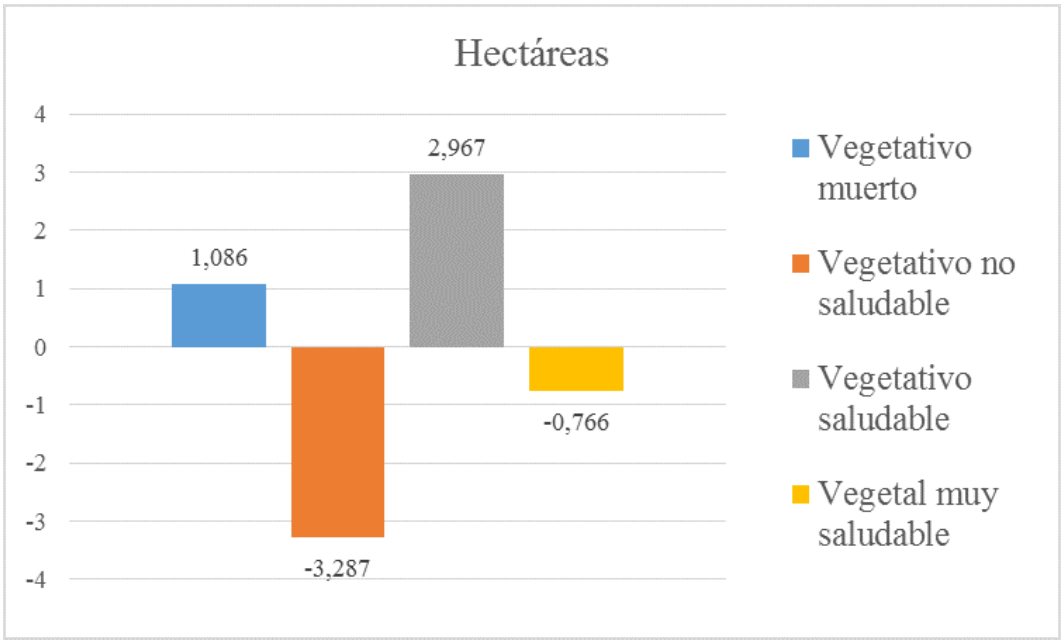
Tabla 2. Tipo de material vegetativo y mapa materia vegetativo

año	Extensión porcentaje	Vegetativo muerto	Vegetativo no saludable	Vegetativo saludable	Vegetativo muy saludable
2015	ha	1,873	11,944	25,235	45,771
	%	2,2	14,1	29,8	54,0
2017	ha	2,888	11,472	26,231	44,232
	%	3,4	13,5	30,9	52,1
2020	ha	2,959	8,657	28,202	45,005
	%	3,5	10,2	33,2	53,1



El análisis de ganancia y pérdida neta por categoría de uso del suelo 2015, 2017 y 2020 se muestra en la figura 8, con un incremento significativo del material vegetativo muerto (1,086 ha) y el área del material vegetativo saludable (2,967 ha), y pérdidas significativas en las coberturas de material vegetativo no saludable (3,287 ha) y material vegetativo muy saludable (0,766 ha).

Figura 8. Ganancia y pérdida neta por categoría de material vegetativo



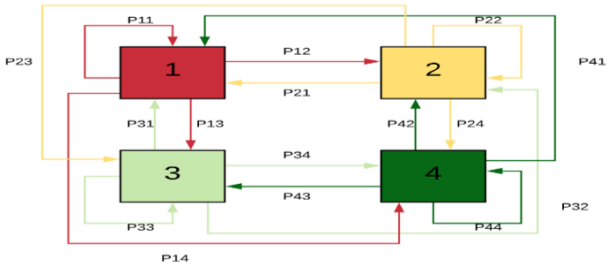
El análisis propuesto permite evaluar los factores territoriales que pueden aumentar los impactos o ganancias de cobertura vegetal. Los resultados del análisis de la evolución histórica del material vegetativo son instrumentales en la construcción de los modelos territoriales para escenarios futuros, en particular en la proyección de los usos del suelo en el escenario tendencial y para estimar los riesgos e índice de vulnerabilidad al cambio climático.

A partir de la clasificación del material vegetativo alrededor del parque, se simuló el cambio en la cobertura de material vegetativo, para lo cual, se consideró un escenario futuro

(2025). Se hace asumiendo que la dinámica de los cambios tiene un comportamiento que se puede explicar como un proceso estocástico, mediante una cadena de Markov

La probabilidad y transición de los estados de las áreas de material vegetativo a través de proceso de Markov:

Figura 9. Diagrama de transición de estados



$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} \pi_1(t) * P_{ij}(t, t+1) \qquad (10)$$

$$P_{ij} = P\left(X_{n+1} = s_j \middle| X_n = s_i\right) \Rightarrow P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{pmatrix} \qquad (11)$$

Con las cuatro categorías de material vegetativo 1 (muerto), 2 (no saludable), 3 (saludable) y 4 (muy saludable). Si iniciamos con el estado (4) que puede ser considerado como el estado natural, no intervenido, el sistema puede cambiar al (3 y 2), un estado intervenido con actividades agrícolas o al estado (1), actividades urbanas y sus relacionados; también se puede dar el caso de que no cambie y permanezca en el (4). El proceso entonces se puede describir como una serie de valores de estados.

Que en síntesis produce la transición entre 2015 y 2022 de la cobertura en sus 4 categorías (Montealegre, 2021).

Tabla 3. Matriz de probabilidad de transición entre 2015-2020

Material vegetativo	Muerto	No saludable	Saludable	Muy saludable	Total
Muerto	**0.3603**	0.3136	0.2454	0.0806	0.9999
No saludable	0.1036	**0.2469**	0.492	0.1575	1
Saludable	0.0314	0.1389	**0.4345**	0.3952	1
Muy saludable	0.01	0.0519	0.2978	**0.6403**	1
Total	0.5053	0.7513	1.4697	1.2736	3.9999

En esta matriz el año de entrada 2015 se lee en las filas y el año de salida 2020 se lee en las columnas. De acuerdo con esta matriz de probabilidad de transición para un período de 5 años, las probabilidades de permanencia de superficie en cada tipo de material vegetativo son: del 64% para el material vegetal muy saludable, del 30% para el material vegetativo saludable, del 25% para el material vegetativo no saludable y del 36% para el material vegetativo muerto. Mostrando aumento de la cobertura muerta y disminución de la muy

saludable.

Para estudiar el índice deforestación Td futuro se obtuvo en la siguiente matriz de transición 2020 al 2025.

Material vegetativo	Muerto	No saludable	Saludable	Muy saludable	Total
Muerto	1,066	0,928	0,726	0,239	2,959
No saludable	0,897	2,137	4,260	1,363	8,657
Saludable	0,887	3,916	12,254	11,145	28,202
Muy saludable	0,449	2,337	13,405	28,815	45,005
Total	3,299	9,318	30,645	41,562	84,823

Los valores en la diagonal marcados en negrita representan las superficies que se mantendrán estables entre 2020 y 2025. Los valores transversales representan las superficies de intercambio entre las clases de uso de suelo.

$$\mathrm{Td} = \left[\left(\frac{41{,}562}{45{,}005}\right)^{\frac{1}{5}} - 1\right] * 100\% = -1{,}579\%. \quad (12)$$

Esto significa una pérdida de material vegetativo muy saludable.

5.3.4 Índice dinámico de riesgos de la vulnerabilidad

De los resultados anteriores se obtiene la siguiente Síntesis mostrada en la tabla 4 sobre los factores de riesgos que afectan la sostenibilidad de este paisaje:

Tabla 4. Síntesis de los tipos de riesgos con respectos a los factores

Tipo de riesgo	Grado de Exposición (GE)	Sensibilidad (S)	Capacidad de Adaptación (CA)
Económica	Pequeños propietarios no participan del turismo en la zona.	Pérdida de bosque nativo y crecimiento del material vegetativo muerto.	Variedad de café resistentes a plagas.
Socio-cultural	Pequeños propietarios sin programas para cobertura saludable.	Población sin servicio gas domiciliario.	Edad relativamente joven de los propietarios.
Ambiental	Pérdida de nacederos y cobertura vegetal.	Vertimiento de aguas servidas a las fuentes hídricas	Dominancia de nuevas variedades de cultivos.

Para establecer el Índice de Riesgo derivado de los impactos climáticos y antrópicos que afecta la zona de vida en el entorno próximo al Parque Arqueológico de San Agustín Huila, adoptamos la metodología de AR5 del (IPCC, 2014), la cual tiene en cuenta estas

afectaciones para la sobrevivencia de la cobertura vegetal muy saludable.



$$I^E = W^{b_1} * E^1 + W^{b_2} * E^2 + W^{b_3} * E^3 = \frac{1}{5} * 0.12 + \frac{1}{4} * 0.2 + \frac{1}{4} * 0.4 = 0.9 \quad (16)$$

$$I^V = W^{b_1} * C^1 - W^{b_2} * C^2 = \frac{4}{5} * 0.20 - \frac{3}{5} * 0.22 = 0.16 \quad (12)$$

$$C^2 = W^{b_1} * C^1 + W^{b_2} * C^2 = (0.2 * 0.10) + (0.2 * 0.2) = 0.22 \quad (14)$$

$$0.12 + \frac{1}{4} * 0.28 = 0.20 \quad (13)$$

$$C^2 = W^{b_1} * 2^1 + W^{b_2} * 2^2 + W^{b_3} * 2^3 + W^{b_4} + 2^4 = \frac{1}{4} * 0.38 + \frac{1}{4} * 0.2 + \frac{1}{4} *$$

Por la variabilidad climática asumimos como índice de peligro del 25%, Ip= 0,25

R = Riesgo = Peligro * (Vulnerabilidad + Exposición) = 0.25 * (0.19 + 0.6) = 0.20 = 20% (17)

Tabla 5. Tabla de Categorías de Riesgo

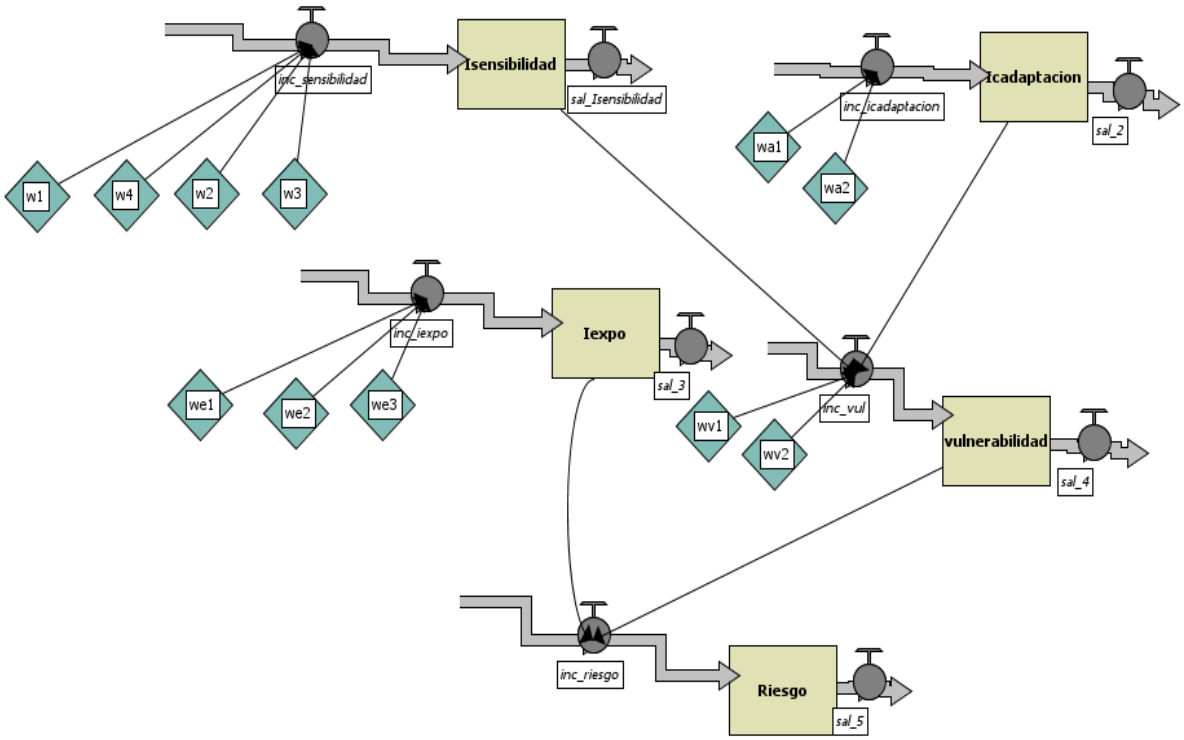
Riesgos	
Categorías	Rango
Baja	0 < p < 0,2
Baja media	0,2 < p < 0,4
Media	0,4 < p < 0,6
Media Alta	0,6 < p < 0,8
Alta	0,8 < p < 1

Adoptando como tabla 5. La tabla de categorías para estos riesgos, resulta un riesgo medio bajo, que no deja de ser significativo dada que la zona de estudio es potencialmente ecoturística y protege el un patrimonio cultural de la humanidad.

5.3.5 Dinámica para escenarios del índice de vulnerabilidad

De la expresión dinámica correspondiente al índice de vulnerabilidad, variando los pesos en dicha formula, podemos obtener un diagrama de sistema que oriente la comunidad de las veredas Mesitas, La Estrella y Nueva Zelanda para la decisiones que conduzca a la sostenibilidad ambiental de este paisaje, según se adopte planes y programas interrelacionando voluntades de las organizaciones que existen en la comunidad y las instituciones del estado que tiene como fin de sostener con cobertura muy saludable el entorno del parque Arqueológico de San Agustín. Resulta la siguiente representación para escenarios futuros:

Figura 10. Sistema dinámico del Índice de Vulnerabilidad



6. Conclusiones

El índice de vulnerabilidad sobre este paisaje de la región estudiada a la fecha esta en la categoría medio baja, significa que los agentes implicados aún pueden tomar decisiones que conduzcan al sostenimiento pleno de la cobertura muy saludable. La tendencia es hacia un deterioro de la cobertura vegetal muy saludable. Esto a su vez afecta a la sostenibilidad al parque Arqueológico, que se evidencia en el deterioro en la fuente del Lavapatas.

Entre los factores antrópicos se destacan las afectaciones en las familias residentes que poco están vinculadas a los servicios ecoturísticos, porque han sido desplazados por foráneos que compran las tierras a un alto costo.

Carencia de planes y programas cooperativos entre los agentes que intervienen para la sostenibilidad de este paisaje: Juntas Comunales, Comité de Cafeteros, El Cabildo Indígena, Alcaldía de San Agustín, el ICANH y la CAM.

Referencias

- Alteri, Miguel A. (2013). Agroecologia y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones al cambio climático. Lima, Perú: Redagress.
- Álvarez, M. P., Bateman, C., Quintero, I., & Ramírez, P. (2007). Plan de manejo del parque arqueológico de. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e.
- Brown, D. (2008). Spatio Temporal model Shifting cultivation and forest cover. Dynamical Environmental Develoment Economic , 643-671.
- CENICAFÉ. (2011). Variabilidad Climática y la floración del café en Colombia. Fondo Nacional del Café.
- Gallopin, G. (2003). Sostenibilidad y desarrollo sostenible: Un enfoque Sistémico, CEPAL Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Gavier, G. P. (2018). Modelos del paisaje y región . Universidad de Buenos Aires.
- IPCC. (2014). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Lasso Valderrama, D. P., & Nelly Yunda, D. (2017). Evaluación y seguimiento al Plan de Ordenación y manejo de la microcuenca Quebrada el “Quebradón” San Agustín Huila. Pitalito, Huila: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Leff, E. (2012). Pensamiento ambiental latinoamericano: patrimonio de un saber para la sustentabilidad. UNAM, México.
- Montealegre, Joan (2021). Tesis maestría Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Surcolombiana.
- Olaya Amaya, Alfredo. (2003). Ecosistemas estratégicos del Huila. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Perdomo Quesada, K. Y., & Polania Pérez , P. (2019). dinámica para la sostenibilidad y resiliencia del humedal. Neiva, Huila: Universidad Surcolombiana.
- Pita Merino, L. (2007). Implementación de un modelo dinámico. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Reyes Gómez, D. A. (25 de Agosto de 2011). Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares. FES Acatlán. Obtenido de Fernando Sancho Caparrini: http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf.
- Santos Rocha, A. C. (2010). implementación de un modelo de autómata celular para Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Serrano Vasquez, C. E. (2016). Intereses, motivaciones y su importancia en el desarrollo de un turismo cultural sostenible. Turismo y patrimonio cultural, 561-564.
- U., W. (1999). Lenguaje de programación Netlogo , ccl.northwestern.edu/netlogo
- Villalba Corredor, L. S., & Malagón, A. (2011). Biodeterioro de la fuente de Lavapatas, parque arqueológico de San Agustín-Huila. Colombia. Ge-conservación, n. 2, páginas 65-80.

Modelado de la autoorganización ambiental

Fecha de recepción: 15-12-24 / Fecha de aceptación: 03-05-25

Mauro Montealegre Cárdenas
Ph.D. Matemáticas y Profesor Titular Usco

Correo electrónico: mmonteal@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1577-5971

Joan Manuel Montealegre Hermosa
Mg. Ingeniería Ambiental y Proyecto Ondas MinTic Usco

Correo electrónico: joan.montealegre@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6956-3783

Jasmidt Vera Cuenca
Doctorado Complejidad y Profesora Titular Usco

Correo electrónico: jasmidt.vera@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8965-0661

Resumen

En este artículo proponemos un método centrado en los modelos complejo para integrar los procesos resilientes y adaptativos frente al reto de la sostenibilidad ambiental, J. Holland (2004). En particular los procesos emergentes de la variabilidad climática que conducen sistemas autoorganizadas con funciones cruzadas en ciclos adaptativos: exploración, conservación, liberación y reorganización. Corresponden modelo de C. Holling (2011) sobre ciclos que refleja los cambios súbitos en el proceso de adaptación climática.

Palabras clave: **Sostenibilidad y vulnerabilidad ambiental, procesos resilientes, procesos adaptativos, adaptación climática.**

Abstract

In this article, we propose a method focused on complex models to integrate resilient

and adaptive processes in response to the challenge of environmental sustainability (J. Holland, 2004). Specifically, we address the emerging processes of climate variability that lead to self-organized systems with cross-functional roles in adaptive cycles: exploration, conservation, release, and reorganization. These align with C. Holling's (2011) model of cycles, which reflects sudden changes in the process of climate adaptation.

Keywords: Environmental sustainability and vulnerability, resilient processes, adaptive processes, climate adaptation.

1. Pensamiento Resiliente

C. Holling (2011) ilustra en la figura 1 la complejidad del modelamiento de la sostenibilidad ambiental mediante procesos resilientes y adaptativos, G. Gallopín (2006). Proceso que J. Holland (2004) describe a través de cuatro propiedades básicas para estos sistemas adaptativos complejos: agrupación, no linealidad, diversidad y flujo, de las que surgen propiedades emergentes que se autoorganizan con funciones cruzadas en ciclos de exploración, conservación, liberación y reorganización, como ilustra en la siguiente figura 1, en la cual el eje y está la cantidad de capital acumulado en términos nutrientes y carbono y en el eje x el grado de conexión entre las variables hacia un sistema más organizado.

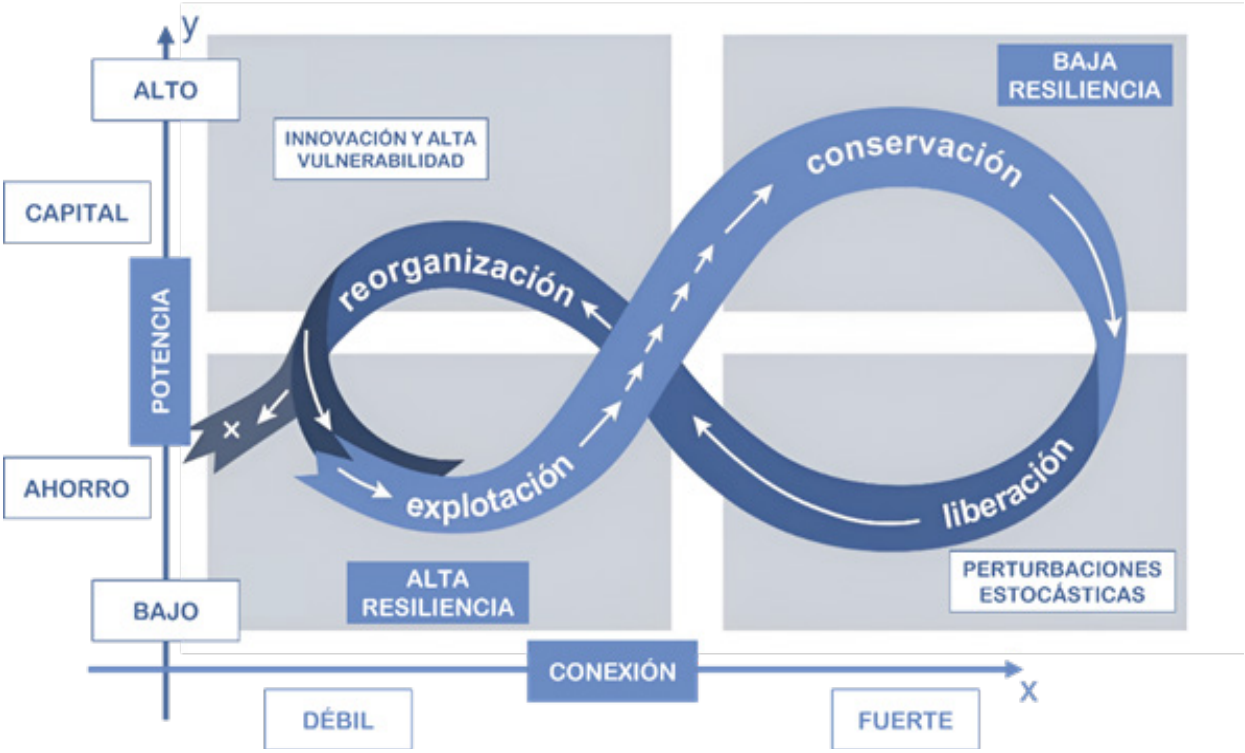


Figura 1. Sistema socio-ecológico del ciclo adaptativo de un ecosistema y su flujo, Holling C. (2011)

2. Vulnerabilidad ambiental

La vulnerabilidad ambiental depende del incremento del CO_2 en la atmosfera, consumo del agua y crecimiento de población. En este contexto el conflicto de servicios ecosistémicos y los intereses de los muchos agentes económicos A_E y ecológicos $A_{E\sqsubset}$), quienes interactúan básicamente con el siguiente cambio de variable,

$$\begin{cases} x = \left(1 - A_{E\sqsubset}\right)^{-1} y \\ y = A_{E\sqsubset} x \end{cases}$$

para evaluar la resiliencia en Agricultura, Infraestructura, Planificación, Salud.

En ecosistemas a través del mercado del carbono, eficiencia energética, planificación y buen uso del suelo, se estima el índice de impacto I, donde I=B-∑⟨H,V⟩ -⊏-M, donde B son los beneficios, H azar, V vulnerabilidad, ⊏ adaptación y M mitigación, ver Alexander,E.R , Geographic information systems, klawer Acad. Press 1995.

3. Resilencia Lineal

La medida de la resiliencia más utilizada y fácilmente calculado se basa en los valores propios en la cuenca de atracción de un sistema lineal en torno de un equilibrio de $\frac{dN}{dt} = f(N)$ con $f(N^k) = 0$ y $x(t) = N(t) - N^k$ en el siguiente sistema bidimensional,

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad x(0) = x_0$$

Con solución única $x(t) = e^{-At}x_0$. Cuando los valores propios de A son todos negativos entonces $e^{-At} \to 0$ y la solución de equilibrio $x^*=0$ es asintóticamente estable, por ello para casi todas las condiciones iniciales se tiene

$$\lim_{t\to\infty} e^{-\lambda_1(A)t}\, x(0) \propto w_1$$

donde $\lambda_1(A)$ es el valor propio de A con la parte real más grande y w_1 es el vector propio correspondiente. Por lo tanto, x es aproximadamente proporcional a w_1 y decae tanto como $-\lambda_1(A)t$ para t grande, y la magnitud de x disminuye por el factor $\frac{1}{e}$ en un intervalo de tiempo de longitud $-\frac{1}{Re(\lambda_1(A))}$.

La resilencia inicial es la razón de retorno al equilibrio para matriz diagonal es Arnoldi, Loreau y Haegeman (2016), $R_0 = \inf_{|x_0|=1} \left(-\frac{d}{dt}|e^{tA}x_0|\,|_{t=0}\right)$, para el caso no diagonal es $R_0 = -\frac{1}{2}\lambda_{dom}(A + A^T)$, se define reactividad como el opuesta de R_0.

La resiliencia asintótica relacionada con el tamaño de la cuenca de atracción se define como,

$$R_\infty = \inf_{|x_0=1|}\left(\lim_{t\to\infty} -\frac{1}{t}\ln|e^t A x_0|\right) = -\lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}Re\big(\lambda_1(A)\big) = -Re\big(\lambda_{\text{dom}}(A)\big)$$

La sensibilidad de la resiliencia se debe a las afectaciones súbitas en el ecosistema, Rafikul, A (2016), con valores propios v_1 y w_1 de A se calcula:

$$\frac{\partial\lambda_i(A)}{\partial a_{ij}} = \frac{v_1 w_1^T}{v_1^T w_1}, \quad esto\ es \quad \frac{\partial(\text{resiliencia})}{\partial a_{ij}} = -Re\left(\frac{v_1 w_1^T}{v_1^T w_1}\right),$$

Que es un punto de inflexión entre el espacio de operaciones seguras y el espacio de cambios críticos.

La variabilidad determinística está asociada a $\frac{dx}{dt} = Ax + Re\big(e^{-i\omega t}v\big)$ cuya solución es $v_0 = \sup|(w-A)^{-1}|, w \in R$. Si en lugar de única afectación es remplazada por perturbaciones ambientales persistentes la ecuación diferencial es estocástica, $dx = Axdt + T\xi(t)dt$ donde $\xi(t)$ es ruido blanco con estado estacionario x_*. El correspondiente modelo estocástico lineal es dx=Axdt+Tdw(t), con w(t) un movimiento browiano en función de x_*.

El exponente de Lyapunov expresado con la norma de Frobenius $|\Sigma|_F = \sqrt{Traza(\Sigma\Sigma^T)}$ es

$$v_s = \sup_{\substack{|\Sigma|_F=1\\ \Sigma\geq 0}} |-\widehat{A^{-1}}(\Sigma)|_F$$

y la invariabilidad es $I_s = \frac{1}{2}v_s^{-1}$, donde v_s es el mayor valor estacionario de la matriz de covarianza Σ=TT^T y operador $\hat{A}(\sqsubset_*) = A\sqsubset_* + \sqsubset_* A^T = -\Sigma$, o sea $\hat{A}(\sqsubset_*) + \Sigma = 0$, resuelta de covarianza estacionaria $\sqsubset_* = -\left((\hat{A})^{-1}\Sigma\right)$.

4. Resiliencia No Lineal

La detección del umbral resiliente se visualiza como puntos de bifurcación de tipo catástrofes o histéresis, los seres vivos en su estructura diversa se desarrollan lejos del equilibrio y corresponden a fenómenos fuertemente invertibles y disipativos que intercambian energía y materia con su entorno; estos sistemas lejos del equilibrio son autoorganizados y son tan complejos como el fenómeno de histéresis del oscilador Van der Pol, Bar-Yum (1997),

$$\ddot{y} + \varepsilon(y^2 - 1)\dot{y} + y = 0$$

que según Benitez y Bolos (2009) es equivalente al sistema

$$\begin{cases} \dot{y} = \left[\varepsilon\left(y - \frac{y^3}{3}\right) - x\right] \\ \dot{x} = y \end{cases}$$

y por la trasformada de Lienard se obtiene

$$\ddot{y} + \varepsilon(y^2 - 1)\dot{y} = \frac{d}{dt}\left[\dot{y} + \varepsilon\left(\frac{y^3}{3} - 1\right)\right], \text{ esto es } \begin{cases} \dot{y} = w - \varepsilon F(y) \\ \dot{w} = -y \end{cases}$$

del primer sistema y bajo incertidumbres este sistema estocástico, Njoseh y Mamadu (2016) es:

$$\begin{cases} dX_t^2 = \left[X_t^1 - \frac{1}{3}X_t^3 - X_t^2\right] + \varphi(X_t^1)dw_t \\ dX_t^1 = [X_t^2]dt \end{cases}$$

donde φ(t) intensidad del ruido blanco

5. Procesos Adaptativos

Los modelos resilientes no lineales básicamente estudian la adaptación a través de las isoclínas del siguiente modelo tridimensional de Lotka-Volterra del tipo Holling, para una cadena alimenticia en el caso de no superar el umbral de Hopf, Muratoni S. and Sergio Rinaldi (1989).

En el caso del lado derecho de la siguiente modelo y figura 2, Zeeman M.L.(1990), se ilustra el paso a través del fenómeno de histéresis catastrófica

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x) - f_1(x)y \\ \frac{dy}{dt} = f_1(x)y - f_2(x)z - d_1 y, conf_i(u) = \frac{a_1 u}{(1 + b_i u)} \\ \frac{dz}{dt} = f_2(x)z - d_2 z \end{cases}$$

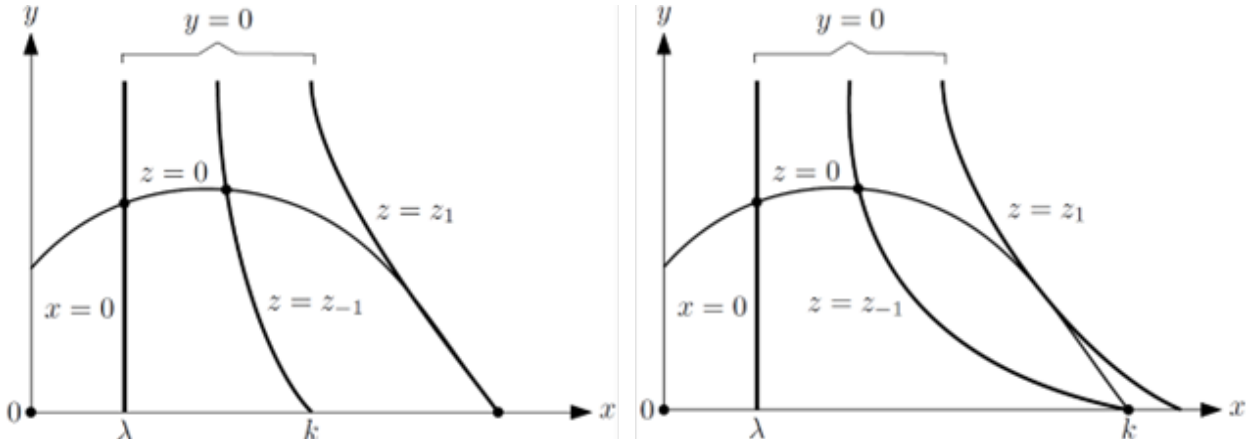


Figura 2. Bifurcación de Hopf en espacio x, y contra b_1 en la variable x, Zeeman M.L.(1990)

Este modelo que permite construir versión estocástica por la interacción sostenible entre s agentes, biodiversidad ecosistémica, tales que,

$$\sum_{i=1}^{s} x_i^t = N, \forall t > 0$$

donde N es el tamaño de la población N, donde x_i^t es el tamaño de la población de la especie i en el tiempo t y $x_{k,i}^t$ es la interacción entre ellas, resulta el siguiente modelo de evolución en diferencias finitas a partir de la tasa de crecimiento $\frac{1}{N}\frac{dN}{dt}$:

$$x_i^{t+1} = N \frac{\sum_{k=1}^{s} x_{k,i}^t + b}{\left(\sum_{k=1}^{s}\left(\sum_{i=1} x_{k,i}^t + b\right)\right)}$$

que según la ley de los grandes números es el proceso estocástico discreto siguiente:

$$x_i^{t+1} = N \frac{\bar{\lambda} x_i^t + \sigma\sqrt{x_i^t}\xi_i^t + b}{\sum_{j=1}^{s}\left(\bar{\lambda} x_j^t + \sigma\sqrt{x_j^t}\xi_j^t + b\right)}$$

Con modelo continuo expresado en términos de fluctuaciones de Langevin como

$$\dot{x_\iota} = f_i(x) + \sum_{j=1}^{s} B_{ij}(x)\xi_{ij}$$

donde ξ_{ij} es gaussiano de Wiener,

$$f_i(x) = b\left(1 - \frac{x_i}{N}\right) \; y \; B_{ij}(x) = B_{ij}(\bar{x}) = \left(\xi_{ij} - \frac{x_i}{N}\right)\sqrt{x_i}$$

Modelo que deriva la siguiente ecuación de evolución probabilística Fokker-Planck-Kolmogorov para la función potencial f_i,

$$\dot{P}(\underline{x}, t) = -\sum_{i=1}^{s} \partial_i \left[-f_i P(\underline{x}, t) + D \sum_j \partial_j \left(g_{ji} \dot{P}(\underline{x}, t) \right) \right],$$

el coeficiente de dispersión es $D = \frac{\sigma}{2}$, también

$$g_{ij}(\underline{x}) = g_{ji}(\underline{x}) = \sum_k B_{ik} B_{kj} = \left(\xi_{ij} - \frac{x_j}{N}\sqrt{x_i}\right)$$

$$\text{se deduce } b\left(1 - \frac{x^{\lambda}}{N}\right) P(x) = D\frac{d}{dx}\left(\left(x - \frac{x^2}{N}\right) P(x)\right), \text{ y entonces}$$

$$P(x) \sim x^{B-1}\left(1 - \frac{x}{N}\right)^{B\left(x - \frac{1}{N}\right) - 1}.$$

Cuando $\beta = \frac{b}{D}$ se obtienen la siguiente distribución de probabilidades cuando $N \to \infty$:

$$P(x) = \frac{\mu^{\beta}}{\upsilon(\beta) x^{1+\beta}} \quad \text{con} \quad \mu = \frac{\beta s}{N}.$$

La tragedia de los bienes comunes

El extractor individualmente tiende a extraer el máximo de recursos y todos pensando lo mismo ocasionarán la crisis de la "tragedia de los comunes", Weitz, Joshua S. 2016:

$$\begin{cases} \max_{c_t} \pi = \sum \delta^t \, \pi_t(B_t, c_t) \\ \text{sujeto a} \\ B_{t+1} - B_t = F(c_t) \text{ con } F \text{ logística y } c_0 = A \\ \delta = \dfrac{1}{1+\rho}, \rho \quad \text{tasa intertemporal} \end{cases}$$

Correspondiente al siguiente modelo estocástico, J.M. Conrad y Smith (1999)

$$\begin{cases} \max_{s_i} E_0\{\sum_{t=1}^{T} \rho^t[N(X_t) - N(S_t)]\} \\ \text{Sujeto a} \\ X_{t+1} = z_{t+1}G(S_t) \\ con\ z_t\ estocástica, x_0\ dado, E_{(z_t+1)} = 1\ y\ \sigma_z^2 > 0 \end{cases}$$

Donde X_t es la población o biomasa, $Y_t = X_t\left(1 - e^{\{qE_t\}}\right)$ es la función de producción que corresponde a la cosecha, $C_t = cE_t$ es la función de costos en término del esfuerzo E_t y $S_t = X_t - Y_t$ es el escape con distribución $G(S_t) = S_t e^{r\left(1-\frac{S_t}{k}\right)}$ y beneficio $\pi_t = PY_t - \frac{c}{q}[\ln X_t - \ln S_t] = N(X_t) - N(S_t)$.

En Flores-Bazan, Anaya y Tammer (2022), se establece que si P^s es la probabilidad del escenario s y conociendo la optimización de demanda de recursos naturales w^s en término de las reservas de energía Q_0 y Q_1^s, la oferta en escenario s resulta el siguiente problema de optimización robusto:

$$\begin{cases} \min_{Q_s} \Sigma_s P^s[c_0 Q_0 + c_1 (Q_1)^s] \\ \text{sujeto a} \\ w^s = Q_0 + Q_1^s,\ Q_1^s \geq 0\ , 0 \leq Q_0 \leq Q_1^S, \qquad \forall s \in S \end{cases}$$

Para la aptitud de un ecosistema resulta apropiada de probabilidades optima de Pareto, Newman, E.J. 2004:

$$P(S_i) = \left(\frac{a-1}{\min s_i}\right)\left(\frac{s_i}{\min s_i}\right) \text{con} \frac{1}{1-q} = \frac{1}{\alpha}$$

$$\alpha = i - n\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{s_i}{\min s_i}\right)\right]^{-1}, \sigma = \sqrt{n}\left[\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{s_i}{\min s_i}\right)\right]^{-1}$$

Para esta clase de problemas también es útil el método de optimización de máxima entropía para estimación de parámetros y validación de modelos de acuerdo al siguiente proceso de control, Oliva 2003 y Eysenbach B. and Levine S. 2004:

$$\begin{cases} \min_P \sum_{i=1}^{n} w_i \sum_{i=T_0}^{t_i} f(y_{it} - d_{it}) \\ \text{sujeto a} \\ y_t = \underset{Il \leq p \leq ul}{c(S_t, p, u_t)} \\ \text{con } u_0, p, u_e \text{ positivos} \end{cases}$$

Donde d_t son los datos de la serie, y_t es la salida del sistema real, S_t son las variables de estados, u_t son las variables de control , f es una función de ajuste mínimo cuadrados y peso relativo de cada serie $w_i = \frac{1}{\sigma^2}$ y con la hipótesis de estimación de parámetros observable; la calibración es explicita mediante optimizando de la información con máxima probabilidad del método de Monte Carlo.

6. Conclusión

Relacionamos modelos matemáticos básicos sobre la sostenibilidad de sistemas ambientales para aproximarnos cualitativamente la capacidad de resiliencia y adaptación de los agentes que intervienen y en los cuales existe un nivel de umbral que se interpreta como parámetro de sostenibilidad. Metodológicamente estudiamos la evolución de los sistemas que aproximan al fenómeno, primero como sistemas internos que son lineales y luego considerando las interacciones ambientales con el entorno, con modelos no lineales con diversos agentes y son expresión de la biodiversidad, estos también tienen versión estocástica. Dada la limitación de recursos para la sobrevivencia, es necesario optimizar procesos que correspondan a la Bioeconomía, entre ellos los que favorezca la cooperación como es el caso el modelo de las tragedias de los comunes.

Referencias

- Al Hdaibat, B, y W Govaerts. 2013. "MatCont tutorial on starting up homoclinic orbits from Bogdanov-Takens point."
- Arnoldi, Jean-François, Michel Loreau, y Bart Haegeman. 2016. "Resilience, Reactivity and Variability: A Mathematical Comparison of Ecological Stability Measures."
- Bak Per, 1987. Self organized critical, Physical Letters
- Bar-Yum, Y. 1997. "Dynamic of Complex Systems." Reading: Addison-Wesley.
- Benitez and Bolos (2009). Invariant Manifold B.V.d.P, chaos solitons and fractal https://doi.org/10.1063/1.4915528
- Brown, Eric, Jeff Moehlis, y Philip Holmes. 2004. On the Phase Reduction and Response Dynamics of Neural Oscillator Population. https://doi.org/10.1162/089976604322860668
- Conrad, Jon M. 1999. Resource Economics. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511814587
- Eysenbach B. and Levine S. 2004. MaxEnt R, Maxima Entropia
- Fernández, Miguel A. 2004. "Control Del Caos." Universidad de La Rioja.
- Flores-Bazan, Fabian, Eladio Ocaña Anaya, y Christiane Tammer. 2022. Special Issue International Seminar on Optimization and Related Areas.
- Gallopín, Gilberto C. 2006. Linkages Between Vulnerability, Resilience, and Adaptive Capacity.
- Gavier, Gregorio. 2017. "Introducción de Los Modelos En La Ecología Del Paisaje y La Región, Ecologia Regional UBA Argentina." Ecology.
- Holland, John. 2004. El Orden Oculto: De cómo La Adaptación Crea La Complejidad.
- Holling, Crawford S. 2011. "Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems." Ecosystems https://doi.org/10.1017/9781009177856.038
- Holling, Crawford S 2011. "Resilience and Stability of Ecological Systems." Annual Review of Ecology and Systematics.
- Holmes, Philip, John L. Lumley, and Gal Berkooz. 1996. Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge Monographs on Mechanics.
- Kalinin, Nikita. 2020. "Pattern Formation and Tropical Geometry." Frontiers in Physics
- Kampis, George. 1991. Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science: A New Framework for Dynamics, Information and Complexity. Vol. 6. Elsevier.
- Lara, Michel De. 2022. Introduction to One and Two-Stage Stochastic and Robust Optimization.
- Lensman, Todd. 2020. "Mixed Taxation and the Atkinson-Stiglitz Theorem.
- Maldonado, Jorge Higinio et al. 2008. Economía de Recursos Naturales-Aplicaciones de La Economía Computacional a La Solución de Problemas Dinámicos. https://doi.org/10.57784/1992/26228
- Mayumi, K. (2001). The origens of Ecoloical Economics, Routledge London.

- Njoseh, Ignatius N, y Ebimene J Mamadu. 2016. Variational Topic-Perturbatio Nigerian Journal of Mathematics and Applications.
- Newman, E.J. 2004. Power Laws, Pareto distributions and Zipf¨ law
- Rafikul, A (2006). On the sensibility analysis of engivalues.
- Oliva, Rogelio. 2003. Model Calibration as a Testing Strategy for System Dynamics Models. European Journal of Operational Research 151.
- Weitz, Joshua S. 2016. Oscillating Tragedy of the Commons in Replicator Dynamics with Game-Environment Feedback. Proceedings of the National Academy of Sciences 113.
- Zeeman M.L. (1990) Lotka Volterra tridimentional, IMA.

Neuroplasticidad Curricular: un enfoque de aprendizaje en Redes

Fecha de recepción: 12-12-24 / Fecha de aceptación: 05-02-25

Edinson Oswaldo Delgado Rivas
Magister Complejidad e Investigador Uninavarra

Correo electrónico: oswaldodelgador@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4736-0436

Carlos Javier Martinez Moncaleano
Magister Complejidad e investigador Corhuila

Correo electrónico: carlos.martinez@usco.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8165-5989

Sandra L. Navarro Parra
Docente investigadora Uninavarra

Correo electrónico: rectoria@uninavarra.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7335-1811

Carlos Eduardo Maldonado
Ph.D. Filosofía y profesor Titular Udelbosque

Correo electrónico: maldonado.carloseduardo@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9262-8879

Resumen

El currículo educativo, tradicionalmente concebido como una estructura rígida y lineal, debe evolucionar hacia un modelo dinámico y flexible, capaz de adaptarse a los cambios del entorno y a las necesidades de los estudiantes. Inspirada en la neuroplasticidad cerebral, la neuroplasticidad curricular plantea una nueva forma de entender el aprendizaje,

donde el conocimiento se autoorganiza en función de la experiencia, la interacción y la interdisciplinariedad. Así como el cerebro fortalece sus conexiones sinápticas para mejorar el procesamiento de la información, el currículo debe favorecer la integración de saberes y metodologías para potenciar la construcción del conocimiento.

En este contexto, el conectoma curricular emerge como una herramienta clave para visualizar y estructurar las interacciones entre disciplinas, estrategias pedagógicas y tecnologías educativas. Un currículo neuroplástico no se basa en asignaturas aisladas, sino en redes de aprendizaje que permiten trayectorias personalizadas y experiencias significativas. Los proyectos interdisciplinares representan una manifestación concreta de esta flexibilidad, promoviendo la sinapsis curricular, es decir, la conexión activa entre distintas áreas del conocimiento para generar aprendizajes más profundos y aplicables a la realidad.

Sin embargo, la implementación de un currículo neuroplástico enfrenta retos significativos, como la resistencia al cambio en los modelos educativos tradicionales, la falta de formación docente en enfoques neuroeducativos y las barreras tecnológicas y estructurales. No obstante, las oportunidades son amplias: el uso de la inteligencia artificial y el análisis de datos pueden facilitar la personalización del aprendizaje, la interdisciplinariedad puede generar soluciones innovadoras a problemas complejos, y la neurociencia ofrece herramientas para mejorar la experiencia educativa.

En conclusión, comprender el currículo como un sistema vivo implica un cambio de paradigma en la educación. La flexibilidad, la interconexión y la capacidad de aprendizaje continuo deben convertirse en principios de una nueva concepción curricular que prepare a los estudiantes no solo para enfrentar los retos del presente, sino también para construir activamente el futuro. Abandonar la rigidez y la estandarización en favor de estructuras adaptativas permitirá que la educación evolucione al ritmo de los cambios sociales y tecnológicos, proporcionando herramientas para el desarrollo integral de los estudiantes en un mundo en constante transformación.

Palabras clave: Neuroplasticidad curricular, conectoma curricular, Curriculum no lineal, Complejidad y Educación

Abstract

The educational curriculum, traditionally conceived as a rigid and linear structure, must evolve into a dynamic and flexible model capable of adapting to environmental changes and student needs. Inspired by brain neuroplasticity, curricular neuroplasticity proposes a new way of understanding learning—where knowledge self-organizes through experience, interaction, and interdisciplinarity. Just as the brain strengthens synaptic connections to enhance information processing, the curriculum should foster the integration of knowledge and methodologies to support knowledge construction.

In this context, the curricular connectome emerges as a key tool to visualize and structure the interactions between disciplines, pedagogical strategies, and educational technologies. A neuroplastic curriculum is not based on isolated subjects, but on learning networks that enable personalized pathways and meaningful experiences. Interdisciplinary projects serve as a concrete expression of this flexibility, promoting curricular synapses—active connections among different areas of knowledge that lead to deeper and more applicable learning.

However, implementing a neuroplastic curriculum presents significant challenges, such as resistance to change in traditional educational models, lack of teacher training in neuroeducation approaches, and technological or structural barriers. Nonetheless, the opportunities are vast: artificial intelligence and data analysis can support personalized learning; interdisciplinarity can foster innovative solutions to complex problems; and neuroscience offers tools to enhance educational experiences.

In conclusion, understanding the curriculum as a living system requires a paradigm shift in education. Flexibility, interconnectedness, and continuous learning must become the guiding principles of a new curricular vision that prepares students not only to face present challenges but also to actively build the future. Moving away from rigidity and standardization in favor of adaptive structures will allow education to evolve at the pace of social and technological change, equipping students with the tools for holistic development in a constantly transforming world.

Keywords: Curricular neuroplasticity, curricular connectome, nonlinear curriculum, complexity and education.

1. Introducción: el currículo, un sistema vivo con capacidad de aprender

Durante mucho tiempo, el currículo ha sido concebido como una estructura rígida y estandarizada, diseñada para transmitir conocimientos de manera uniforme y secuencial. Este modelo tradicional responde a una lógica de orden y previsibilidad, en la que el aprendizaje se estructura de manera lineal, con objetivos predefinidos y contenidos fijos. Sin embargo, en un mundo caracterizado por la incertidumbre, la aceleración del conocimiento y la constante transformación social, este enfoque se torna insuficiente. La educación enfrenta el desafío de evolucionar hacia modelos más flexibles y adaptativos, capaces de responder a la diversidad de los estudiantes y a las cambiantes exigencias del entorno (Davis & Sumara, Dennis, 2006).

Desde la perspectiva de los sistemas complejos, el currículo no puede seguir viéndose

como un simple conjunto de asignaturas y contenidos fragmentados, sino como un sistema vivo con la capacidad de aprender, evolucionar y reconfigurarse en función de las interacciones y experiencias educativas, (C. E. Maldonado, 2015). Así como los organismos biológicos se adaptan a su medio a través de procesos de retroalimentación y ajuste continuo, el currículo debe permitir, análogamente, la emergencia de nuevas conexiones entre saberes, metodologías y experiencias. Este cambio de paradigma implica superar la rigidez estructural y promover un modelo curricular dinámico, en el que la interdisciplina, la creatividad y la innovación sean principios fundamentales (Doll, 1993) (Davis et al., 2015).

En este orden de ideas, se entiende que el reconocimiento del currículo como un sistema vivo, permite integrar procesos de actualización constante. Lejos de ser una simple lista de contenidos predeterminados, el currículo debe construirse en diálogo con el contexto, incorporando estrategias que favorezcan el pensamiento crítico, la autonomía y la resolución de problemas. En este sentido, la flexibilidad curricular no significa ausencia de estructura, sino la capacidad de generar estructuras adaptativas que evolucionen en función de las necesidades y desafíos emergentes, es decir, propiciar un currículo adaptativo, el cual responda a los constantes y diversos cambios del contexto (L. Stenhouse, 1975) (Brusilovsky & Peylo, 2003).

Por otra parte, para lograr un currículo más adaptable, es fundamental reconocer la importancia de las conexiones entre distintos saberes. La educación tradicional ha tendido a fragmentar el conocimiento en disciplinas aisladas, lo que dificulta una comprensión integral de la realidad. En cambio, un currículo concebido como un sistema vivo fomenta la interrelación de áreas del conocimiento y promueve enfoques interdisciplinarios y transdisciplinarios que reflejen la complejidad del mundo contemporáneo.

Planeado lo anterior, es menester considerar el entramado de divergencias lógicas de distintas disciplinas; tener en cuenta los aportes disciplinares y generar diálogos de que sean acordes a la necesidad de resolver de problemas contextuales desde una integración de saberes (Cardozo, 2023). El currículo desde la interdisciplinariedad, ha de ser, entonces, una herramienta educativa que guie, de una manera plausible, dinámica y no lineal, los procesos de enseñanza – aprendizaje.

En este sentido, se expone una revisión en la base de datos Scopus la cual revela que existe un creciente interés en la intersección entre neurociencias y educación, evidenciado en 5971 investigaciones publicadas en las últimas tres décadas que exploran cómo los avances en el estudio del cerebro pueden optimizar los procesos de enseñanza y aprendizaje, (ver figura 1). Esta tendencia sugiere que la educación está transitando hacia modelos basados en la evidencia neurocientífica, con el fin de mejorar la personalización del aprendizaje y fomentar una enseñanza más efectiva, alineada con los procesos cognitivos y emocionales de los estudiantes.

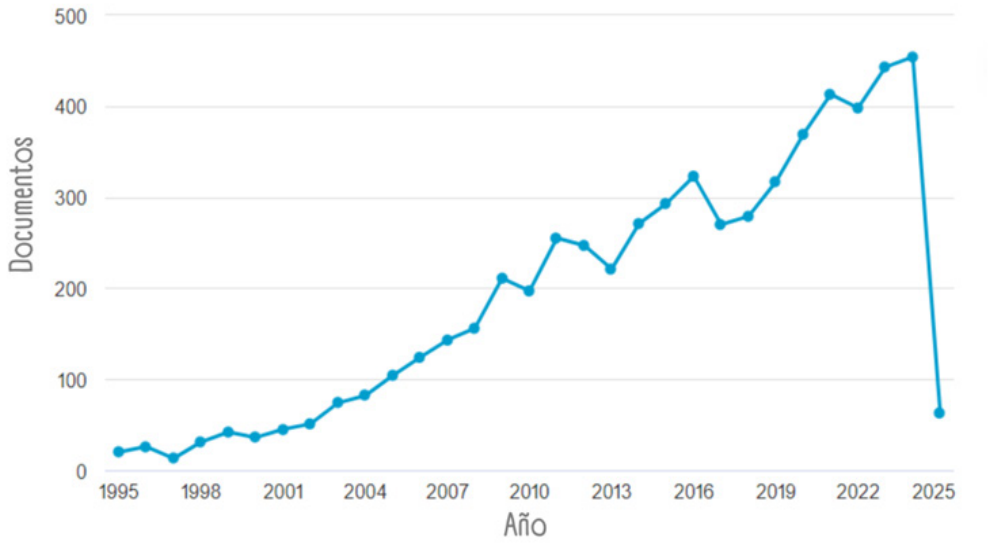


Fig 1. Tendencia de publicaciones por año en Neurociencia y Educación. Fuente: base de datos Scopus

El desarrollo de un currículo flexible y adaptativo requiere de metodologías innovadoras que permitan una mayor interacción y participación de los estudiantes en su proceso de aprendizaje. Se puede tener en consideración estrategias como el aprendizaje basado en proyectos, el aprendizaje por indagación y el aprendizaje colaborativo, siendo estos enfoques clave para la construcción de experiencias significativas, puesto que favorecen la participación activa de los estudiantes y los desafían a encontrar soluciones a problemas reales, favoreciendo el desarrollo de habilidades esenciales para su futuro académico y profesional.

Habiéndose expuesto lo anterior, se entiende, entonces, que una innovación curricular va de la mano con un innovación educativa, lo cual se logra por medio de "un proceso y una actitud reflexiva intencionada, deliberada, institucionalizada, técnica, pedagógica y política que introduce cambios cualitativos en un contexto educativo particular con el objetivo de mejorar la calidad y equidad de la educación en el establecimiento educativo donde se produce" (Tapia, 2022).

Otro aspecto fundamental en la construcción de un currículo vivo es la incorporación de la tecnología como un medio para facilitar la personalización del aprendizaje. La digitalización ha transformado la forma en que se accede al conocimiento, permitiendo que los estudiantes puedan aprender a su propio ritmo y explorar contenidos según sus intereses y necesidades. Plataformas de aprendizaje en línea, simulaciones interactivas y recursos digitales han abierto nuevas posibilidades para diseñar experiencias educativas más diversas e inclusivas (Teran-Pazmiño et al., 2024).

Asimismo, la flexibilidad del currículo también implica la necesidad de evaluar de manera

diferente el aprendizaje. Los modelos tradicionales de evaluación, basados en pruebas estandarizadas y memorización de contenidos, no reflejan adecuadamente el desarrollo de habilidades y competencias clave. En su lugar, es necesario promover estrategias de evaluación formativa y auténtica que permitan a los estudiantes demostrar su comprensión a través de la aplicación del conocimiento en contextos reales. Portafolios, proyectos integradores y rúbricas de desempeño pueden ser herramientas valiosas para valorar el aprendizaje de manera más integral y significativa (Delgado R. et al., 2025).

Por otra parte, la implementación de un currículo adaptativo requiere un cambio en la forma en que se concibe el papel del profesor. Más que un transmisor de conocimientos, el profesor se convierte en un facilitador del aprendizaje, un guía que acompaña a los estudiantes en la construcción de sus propios saberes. Esto demanda una formación continua y una disposición a la innovación pedagógica, explorando nuevas estrategias y herramientas que favorezcan la adaptación del currículo a las necesidades del contexto (Jurado V., 2016) (Maldonado, C, 2017) .

Un currículo concebido como un sistema vivo también debe responder a la diversidad del estudiantado. La educación inclusiva es un componente esencial en este enfoque, ya que reconoce las distintas maneras en que los estudiantes aprenden y se desarrollan (C. E. Maldonado, 2015). Diseñar currículos flexibles implica considerar las diferencias individuales y generar oportunidades de aprendizaje que atiendan a la variedad de estilos, ritmos y capacidades de los estudiantes. En este sentido, el uso de recursos accesibles, estrategias diferenciadas y entornos de aprendizaje diversos contribuye a garantizar una educación equitativa y de calidad para todos.

2. De las Neurociencias a los Enfoques Pedagogicos Emergentes

Los avances en neurociencias han transformado la comprensión del aprendizaje y su relación con el desarrollo humano, revelando que el cerebro funciona como un sistema dinámico e interconectado. Lejos de ser una estructura rígida, opera de manera holística, integrando conocimientos, emociones y actitudes en un todo inseparable. Si bien la carga genética establece ciertas predisposiciones, el desarrollo de las capacidades cognitivas, afectivas, sociales y motrices depende en gran medida del entorno. La interacción, la mediación y la estimulación constante potencian la plasticidad neuronal, favoreciendo la construcción de nuevas conexiones sinápticas y, con ello, el fortalecimiento de las habilidades intelectuales. En contraste, la falta de estímulos adecuados puede limitar o incluso atrofiar el desarrollo cerebral. Esto implica que los procesos educativos deben diseñarse teniendo en cuenta la naturaleza adaptativa del cerebro, promoviendo experiencias de aprendizaje enriquecidas que potencien el desarrollo integral del estudiante, (Holland, J., 1992) (Maldonado, C, 2017).

El avance de las neurociencias ha permitido una nueva forma de comprender la educación

y el diseño curricular, dando lugar a conceptos innovadores como el neurocurrículo.

¿Qué es el Neurocurrículo?

El neurocurrículo se refiere al diseño y estructuración del currículo educativo basado en principios neurocientíficos. Su propósito es integrar el conocimiento sobre el funcionamiento del cerebro y los procesos de aprendizaje para optimizar la enseñanza. En este sentido, un neurocurrículo toma en cuenta aspectos como la plasticidad cerebral, las emociones, la motivación, la memoria y la atención, con el fin de diseñar estrategias pedagógicas que potencien el aprendizaje y favorezcan el desarrollo integral del estudiante (Pherez et al., 2018).

Un neurocurrículo se fundamenta en la idea de que la enseñanza debe estar alineada con la forma en que el cerebro aprende mejor. Por ello, incorpora metodologías activas, aprendizaje basado en la experiencia, ambientes enriquecidos y estrategias que estimulan la consolidación del conocimiento mediante la repetición, la emoción y la conexión con el entorno (Giuseppe et al., 2022).

2.1 Neuroplasticidad Curricular: una analogía conceptual

Concebir el currículo como un cerebro en evolución implica reconocer que el aprendizaje no es lineal ni predecible, sino un proceso complejo, emergente y en permanente construcción, donde la interdisciplinariedad, la innovación y la flexibilidad son esenciales para garantizar una educación significativa y pertinente en el siglo XXI (Izhikevich, 2007) (Mayer, 2011).

En este sentido, al realizar una migración conceptual bioinspirada, trasladamos principios biológicos al diseño curricular y establecemos correspondencias entre el funcionamiento del cerebro y la estructura del aprendizaje. En este marco, las neuronas representan las disciplinas y conocimientos, los elementos fundamentales del currículo que, al igual que las células nerviosas, no operan de manera aislada, sino en interconexión constante. Las sinapsis, por su parte, simbolizan las interacciones y metodologías que permiten la transferencia y construcción del conocimiento, funcionando como los espacios donde se generan conexiones significativas entre saberes, docentes, estudiantes y contextos de aprendizaje (Pherez et al., 2018).

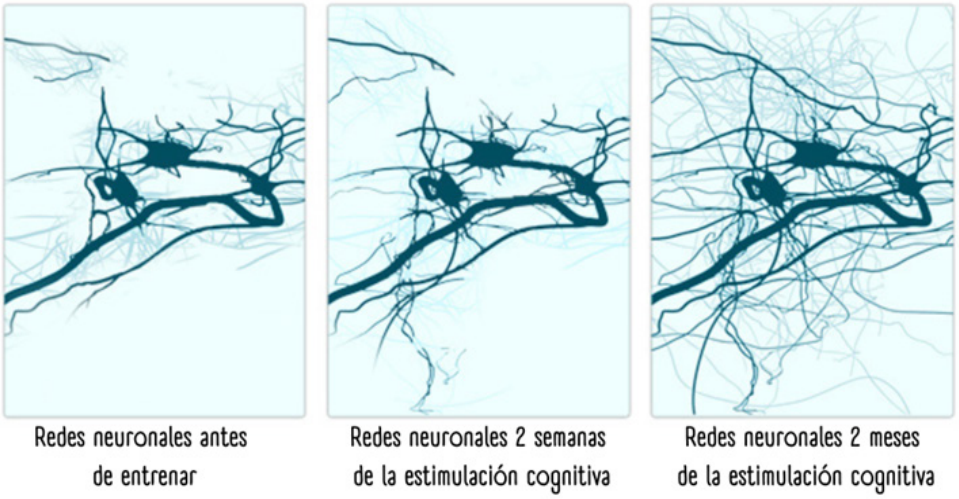


Fig 2. Neuroplasticidad de las redes neuronales durante el proceso de aprendizaje. Fuente: Imagen tomada de https://www.cognifit.com/es/plasticidad-cerebral

La figura 2 representa el proceso de neuroplasticidad en redes neuronales durante el aprendizaje, estableciendo una analogía con la evolución del currículo como un sistema vivo y adaptable. En su estado inicial, antes de cualquier intervención, el currículo rígido y fragmentado se asemeja a una red neuronal con pocas conexiones, donde las disciplinas operan de manera aislada y la integración del conocimiento es limitada. Sin embargo, tras un período de estímulos, metodologías activas e interacciones interdisciplinarias, el currículo comienza a mostrar signos de plasticidad, fortaleciendo sus conexiones y permitiendo una mayor integración entre saberes, estrategias y experiencias de aprendizaje. Después de un proceso continuo de reconfiguración y ajustes, al igual que una red neuronal tras meses de estimulación cognitiva, el currículo se transforma en un entramado dinámico e interconectado, optimizando la transferencia del conocimiento y fomentando una educación más flexible y significativa. Esta evolución refleja el principio de la neuroplasticidad curricular, donde la adaptación constante a nuevas demandas y contextos fortalece la enseñanza, permitiendo que los estudiantes desarrollen habilidades en entornos diversos y cambiantes (Kolb et al., 2011).

Es decir, la plasticidad sináptica, clave en la capacidad del cerebro para reorganizarse y fortalecerse a partir de la experiencia, se refleja en la adaptabilidad del currículo, concebido como un sistema vivo que evoluciona y se reconfigura de acuerdo con las necesidades educativas (Izhikevich, 2007) (Marron et al., 2013).

Entre tanto, la neuroplasticidad curricular es un concepto que traslada la idea de plasticidad cerebral al currículo educativo, proponiendo que este, al igual que el cerebro, debe tener la capacidad de adaptarse, reorganizarse y fortalecerse en función de las necesidades de los estudiantes y del contexto educativo. Se basa en la idea de que el currículo no debe ser una estructura rígida e inmutable, sino un sistema dinámico y en constante evolución.

Considerando lo anterior, un currículo neuroplástico es aquel que permite la interconexión de saberes, la interdisciplinariedad y la flexibilidad en los procesos de enseñanza-aprendizaje. De este modo, no solo se estructura a partir de áreas del conocimiento, sino que se organiza en redes de aprendizaje que facilitan la transferencia de información, la creatividad y la innovación. La sinapsis curricular, entendida como la conexión activa entre disciplinas y metodologías, es un componente clave de esta concepción.

Diferencias Claves:

1. Enfoque: Mientras que el neurocurrículo se centra en el diseño del currículo a partir del conocimiento sobre el funcionamiento del cerebro, la neuroplasticidad curricular enfatiza la capacidad del currículo para transformarse y adaptarse.
2. Propósito: El neurocurrículo busca optimizar la enseñanza con base en la neurociencia, mientras que la neuroplasticidad curricular busca garantizar que el currículo evolucione de manera flexible y contextualizada.
3. Aplicación: El neurocurrículo se enfoca en la incorporación de estrategias pedagógicas basadas en la neurociencia, mientras que la neuroplasticidad curricular implica un rediseño profundo del currículo como un sistema dinámico.

Es decir, el neurocurrículo es el diseño educativo fundamentado en la neurociencia, mientras que la neuroplasticidad curricular es la capacidad del currículo de adaptarse y evolucionar en respuesta a su entorno. Ambos conceptos son complementarios y fundamentales para una educación alineada con los procesos del aprendizaje humano.

2.2 Conectoma Curricular: Tejiendo Redes de Aprendizaje

El conectoma curricular puede definirse como el mapa dinámico que representa las interacciones entre saberes, metodologías y experiencias de aprendizaje que configuran la estructura del conocimiento en un entorno educativo. Así como el conectoma en neurociencia representa la red de conexiones neuronales que permiten el flujo de información en el cerebro, el conectoma curricular establece las relaciones entre disciplinas, enfoques pedagógicos y contextos de aprendizaje. En este sentido, el currículo deja de ser una simple organización lineal de contenidos fragmentados y se convierte en un sistema interconectado, donde los elementos no existen de manera aislada, sino que se influyen y potencian mutuamente. Este modelo permite que el aprendizaje emerja de la interacción entre diferentes áreas del conocimiento, promoviendo la interdisciplinariedad y la adaptabilidad a contextos cambiantes.

El currículo, por lo tanto lejos de ser una estructura lineal y rígida, debe concebirse como un ecosistema dinámico e interconectado, donde el conocimiento fluye a través de múltiples conexiones y relaciones. En este contexto, el conectoma curricular emerge como una representación de esta complejidad, visualizando el entramado de interacciones entre disciplinas, metodologías y experiencias de aprendizaje. Así como el conectoma en neurociencia mapea las conexiones neuronales que facilitan el procesamiento de la información en el cerebro, el conectoma curricular traza las interdependencias entre distintos saberes y estrategias pedagógicas, fomentando un aprendizaje más holístico y adaptable (Hodgkin & Huxley, 1952). Su configuración implica identificar y fortalecer las conexiones entre asignaturas, contextos, modelos, estrategias pedagógicas y experiencias

educativas, promoviendo una integración más orgánica y significativa del aprendizaje. En lugar de estructuras rígidas, este enfoque sugiere un modelo en red, donde los estudiantes pueden transitar entre distintos nodos de conocimiento según sus intereses, ritmos y necesidades. Además, facilita la incorporación de metodologías activas como el aprendizaje basado en proyectos, el pensamiento de diseño y la resolución de problemas complejos, impulsando una educación experiencial, flexible y contextualizada, capaz de responder a los desafíos del mundo real.

Para establecer una analogía bioinspirada entre las partes de una neurona y un conectoma curricular en un proyecto interdisciplinar, podemos considerar la estructura de la siguiente manera, (ver figura 3):

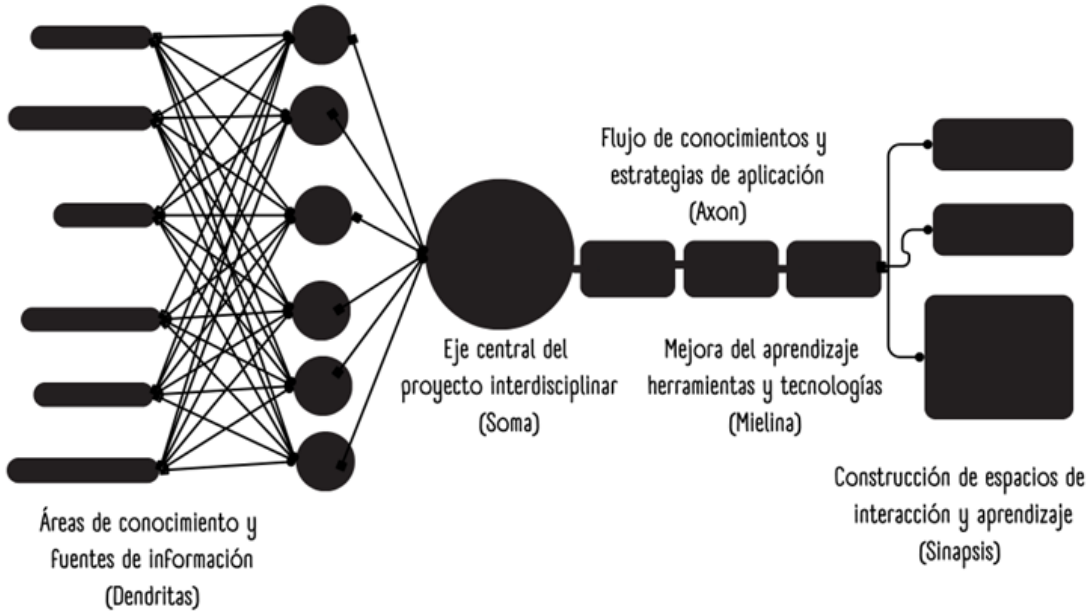


Fig 3. Modelo de Conectoma curricular. Fuente: elaboración propia

- Cuerpo celular (soma): Eje central del proyecto interdisciplinar. El soma de la neurona es el centro donde se procesa la información y se generan respuestas. En un proyecto interdisciplinar, este rol lo cumple el eje temático central, que articula las distintas disciplinas y define la dirección del aprendizaje, asegurando que los saberes converjan en torno a un propósito común.
- Dendritas: Áreas del conocimiento y fuentes de información. Las dendritas captan señales provenientes de otras neuronas, al igual que el proyecto interdisciplinar recibe influencias de diversas disciplinas, metodologías y fuentes de información. Estas conexiones iniciales enriquecen el proyecto con múltiples perspectivas, permitiendo una aproximación integral al problema o desafío planteado.
- Axón: Flujo de conocimientos y estrategias de implementación. El axón transmite

señales desde el soma hacia otras neuronas, facilitando la comunicación dentro del sistema nervioso. En un proyecto interdisciplinar, el axón representa las estrategias de implementación y el desarrollo secuencial del proyecto, garantizando que los aprendizajes fluyan entre las distintas áreas y fases del trabajo.

- Sinapsis: Espacios de interacción y construcción de aprendizaje. La sinapsis es el punto de encuentro donde las neuronas intercambian información. En el conectoma curricular de un proyecto interdisciplinar, las sinapsis representan los espacios de integración entre disciplinas, donde se generan aprendizajes significativos a través de la colaboración, el trabajo en equipo y la resolución de problemas reales.
- Mielina: Herramientas y tecnologías potenciadoras del aprendizaje. La mielina facilita una transmisión más rápida y eficiente de los impulsos nerviosos. De manera análoga, en un proyecto interdisciplinar, las herramientas tecnológicas, el aprendizaje basado en datos y el uso de inteligencia artificial permiten optimizar la conexión entre saberes, acelerando la innovación y mejorando la experiencia educativa.

Esta analogía propone una perspectiva donde se concibe un proyecto interdisciplinar como un sistema dinámico complejo, donde los saberes no operan de manera aislada, sino que se fortalecen mutuamente, generando un aprendizaje más profundo y contextualizado y en el que existe una "colaboración disciplinar", la cual permite mejorar los procesos educativos (Holland, 2005) (Chacón Corzo et al., 2012).

En este sentido, para fortalecer el conectoma curricular y potenciar un aprendizaje más dinámico e interconectado, es fundamental adoptar estrategias innovadoras que permitan la personalización y flexibilidad del proceso educativo. El aprendizaje personalizado ofrece a cada estudiante la posibilidad de avanzar a su propio ritmo, adaptando los contenidos y metodologías a sus intereses y necesidades. Las trayectorias flexibles complementan este enfoque, permitiendo que los estudiantes transiten entre diferentes disciplinas y experiencias de aprendizaje, en lugar de seguir rutas predefinidas y homogéneas. La inteligencia artificial, por otra parte, juega un papel clave al analizar grandes volúmenes de datos educativos para ofrecer recomendaciones, identificar patrones de aprendizaje y optimizar los procesos formativos en tiempo real. De la misma manera, las estrategias basadas en datos y la analítica del aprendizaje permiten una evaluación continua y adaptativa, brindando a docentes e instituciones información valiosa para mejorar la toma de decisiones pedagógicas, con base en evidencias empíricas.

2.3 Sinapsis Curricular y Proyectos Interdisciplinares: Aprender Conectando Saberes

Los proyectos interdisciplinares representan un mecanismo esencial para activar y reforzar conexiones entre diversas áreas del conocimiento, favoreciendo un aprendizaje más

significativo y contextualizado. Al integrar diferentes disciplinas en torno a problemáticas reales, estos proyectos permiten que los estudiantes construyan conocimiento de manera holística, desarrollando habilidades de pensamiento crítico, resolución de problemas y creatividad. En lugar de abordar los saberes de manera fragmentada, la interdisciplinariedad facilita la conexión entre conceptos, metodologías y enfoques, promoviendo una educación más alineada con los desafíos del mundo actual. Además, estos proyectos fomentan el trabajo colaborativo y la aplicación del conocimiento en contextos reales, consolidando la idea de que el aprendizaje no ocurre en compartimentos estancos, sino a través de interacciones dinámicas y flexibles (Jurado V., 2016).

Desde esta perspectiva, la sinapsis curricular emerge como un proceso clave en la construcción de aprendizajes significativos, basado en la interconexión entre disciplinas, metodologías y experiencias educativas. Así como las sinapsis neuronales permiten la transmisión de información en el cerebro, la sinapsis curricular facilita la transferencia y aplicación del conocimiento entre distintos campos, enriqueciendo la comprensión y la capacidad de resolver problemas de manera integral. Este proceso no solo fortalece la cohesión del currículo, sino que también estimula la curiosidad y la autonomía en el aprendizaje, motivando a los estudiantes a explorar conexiones entre distintos ámbitos del saber. De este modo, la sinapsis curricular y los proyectos interdisciplinares constituyen estrategias fundamentales para transformar el currículo en un ecosistema dinámico, interconectado y adaptativo, capaz de responder a las demandas de un entorno educativo en constante evolución (Tyler et al., 1967) (Orbe, 2011) (C. E. Maldonado, 2016) .

3. Los proyectos interdisciplinares como laboratorios de sinapsis curricular

Los proyectos interdisciplinares funcionan como laboratorios de sinapsis curricular, donde el conocimiento se construye a través de la interacción entre distintas disciplinas, metodologías y experiencias de aprendizaje. Así como en el cerebro las sinapsis permiten la transmisión de información y fortalecen las conexiones neuronales, en la educación, estos proyectos activan y consolidan redes de saberes, promoviendo un aprendizaje más integrado, significativo y adaptable (Galeana, L., 2006).

En estos laboratorios, el currículo deja de ser un conjunto de asignaturas aisladas y se convierte en un entramado dinámico, donde los estudiantes exploran problemas desde múltiples perspectivas, conectando conceptos de diversas áreas del conocimiento. Este enfoque promueve el pensamiento crítico, la creatividad, la sinergia y la capacidad de transferir aprendizajes a situaciones nuevas y complejas. Además, impulsa la colaboración y el trabajo en equipo, esenciales para la resolución de desafíos contemporáneos (C. Maldonado, 2023).

Al concebir los proyectos interdisciplinares como espacios de sinapsis curricular, se

propone una educación más cercana a la realidad, en la que el aprendizaje no solo responde a estándares predefinidos, sino que se reconfigura constantemente en función de las experiencias y demandas del entorno. De este modo, el currículo se transforma en un ecosistema vivo, capaz de evolucionar, adaptarse y fortalecer sus conexiones para generar un conocimiento más creativo y significativo en torno a la multiplicidad de contextos (De BONO, 1992).

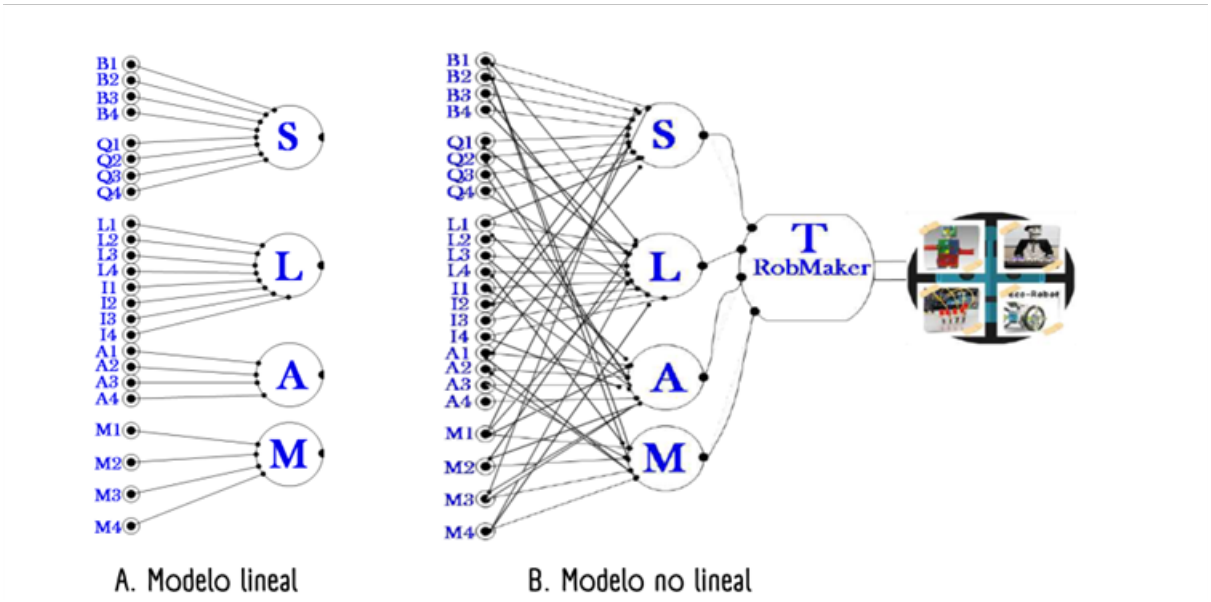


Fig 4. A) Conectoma curricular de un currículo lineal – tradicional. B) Conectoma curricular de un currículo no lineal e interconectado. Fuente: elaboración propia

Un ejemplo concreto de transformación curricular puede observarse en el diseño de un ciclo de formación en educación STEM. En la parte A de la figura, se muestra un currículo tradicional, estructurado de manera lineal y fragmentada, donde las asignaturas de biología (B), Química (Q), Literatura (L), Artes (A), matemáticas (M), y tecnología (T) se imparten de forma aislada, con escasas conexiones entre sí. En este modelo, los estudiantes adquieren conocimientos de cada disciplina de manera independiente, lo que dificulta su integración y aplicación en contextos reales. En contraste, en la parte B, se presenta una propuesta de diseño interconectado a través del proyecto interdisciplinar RobMaker, una iniciativa de robótica educativa que integra diversos campos del conocimiento. En este enfoque, los estudiantes aplican principios matemáticos y físicos, elementos de literatura, artes, biología y química, en la construcción de robots, programando algoritmos para resolver desafíos específicos y desarrollando habilidades en pensamiento computacional y resolución de problemas. Esta estructura en red permite que los saberes se interconectan de manera creativa, promoviendo un aprendizaje significativo, colaborativo y basado en la experimentación. Además, el proyecto RobMaker fomenta la creatividad y la innovación, fortaleciendo la capacidad de los estudiantes para abordar problemas del mundo real

desde una perspectiva interdisciplinaria (Arciniegas et al., 2013) (Delgado R., 2018).

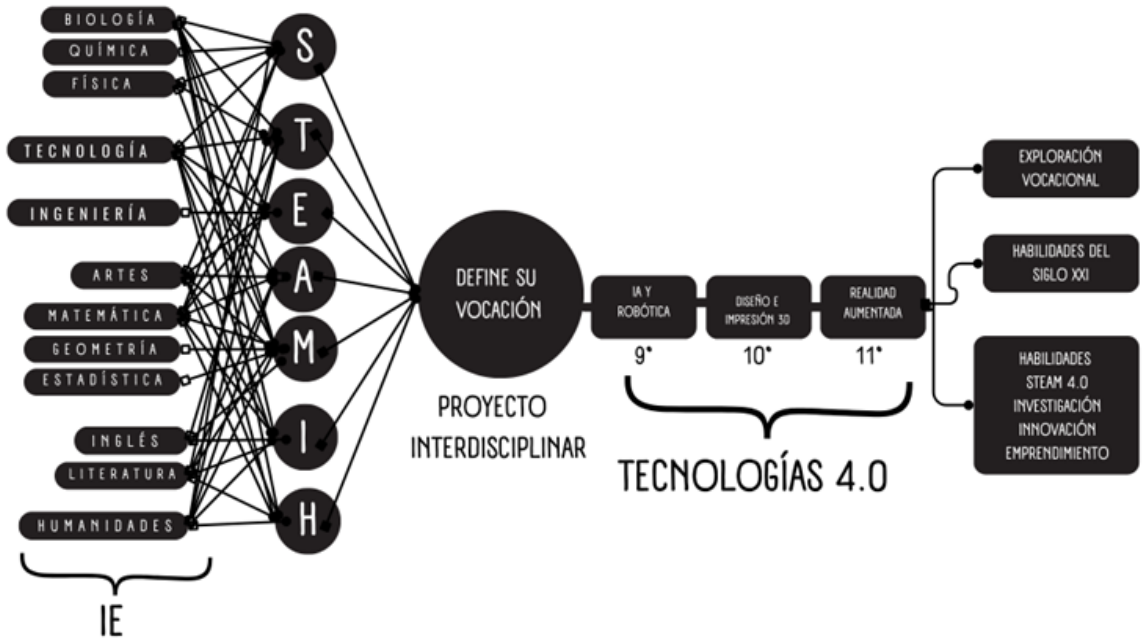


Fig 5. Conectoma curricular de un currículo interconectado, a través de un proyecto interdisciplinar en tecnologías 4.0. Fuente: elaboración propia

En la figura 5, se presenta un caso particular en donde se aplica el diagrama de conectoma curricular y el proceso de sinapsis curricular se materializa en la implementación de proyectos interdisciplinarios en Tecnologías 4.0, los cuales actúan como generadores de conexiones significativas entre saberes, metodologías emergentes y experiencias activas de aprendizaje. En este contexto, el conectoma curricular se configura como una red estructurada de interacciones entre disciplinas, permitiendo que la inteligencia artificial, la robótica, el diseño, la impresión 3D y la realidad aumentada no solo se aborden de manera aislada, sino que converjan en un ecosistema de aprendizaje integral (EDS/ ROBOTICS, 2020).

Por su parte, la sinapsis curricular ocurre cuando estos conocimientos se articulan en torno a un proyecto de apropiación tecnológica, en el cual los estudiantes exploran aplicaciones prácticas de estas herramientas al tiempo que reflexionan sobre la evolución de las profesiones desde el siglo XIX hasta el presente. A través de este enfoque, el currículo trasciende su estructura convencional y se convierte en un sistema dinámico y adaptativo, donde las interacciones entre áreas del conocimiento potencian el desarrollo de habilidades en investigación, innovación y emprendimiento (Meneses et al., 2023). La implementación de estos proyectos no solo fortalece el aprendizaje experiencial, sino que también facilita la generación de nuevas rutas de exploración académica, promoviendo una educación más flexible, interconectada y alineada con los desafíos del siglo XXI (Ramírez Montoya et al., 2023).

4. Retos y Oportunidades: El Desafío de un Currículo Neuroplástico

La transición hacia un currículo dinámico y flexible, capaz de responder a los cambios del entorno y a las necesidades de los estudiantes, enfrenta múltiples desafíos que requieren una transformación profunda en la manera en que concebimos la educación. Entre los principales retos se encuentran la resistencia al cambio, la falta de formación docente en estrategias pedagógicas basadas en la neurociencia y las limitaciones tecnológicas y estructurales presentes en las instituciones educativas que dificultan la implementación de modelos de aprendizaje más adaptativos.

Por tanto, uno de los obstáculos más significativos es la resistencia a cambiar los modelos educativos rígidos, arraigados en estructuras tradicionales que priorizan la estandarización del conocimiento y la enseñanza lineal. Muchos sistemas educativos continúan operando bajo un enfoque donde el currículo es concebido como un conjunto fijo de contenidos, lo que dificulta la adopción de enfoques interdisciplinarios y metodologías más flexibles. Superar esta resistencia requiere un cambio de paradigma, impulsado tanto por políticas educativas innovadoras como por una mayor concienciación sobre la importancia de la adaptabilidad en el aprendizaje.

Asimismo, otro reto fundamental es la falta de formación docente en estrategias de enseñanza basadas en la neurociencia y en modelos pedagógicos dinámicos. La enseñanza sigue centrada en métodos tradicionales que no siempre toman en consideración cómo se generan los procesos de aprendizaje y de retención de la información, siendo fundamental brindar oportunidades de formación continua a los docentes para que incorporen enfoques como el aprendizaje experiencial, la enseñanza basada en redes de conocimiento y la aplicación de principios de la neuroeducación en el diseño curricular.

Las dificultades tecnológicas y estructurales representan una dificultad para la implementación de modelos flexibles de enseñanza. La infraestructura educativa en muchas instituciones no está diseñada para favorecer la integración de metodologías activas, el acceso a recursos tecnológicos avanzados o la creación de entornos de aprendizaje conectados e interdisciplinarios, dadas una limitantes físicas y presupuestales. Es necesario invertir en tecnología, espacios flexibles y herramientas digitales que faciliten la interconexión del conocimiento y permitan la construcción de trayectorias de aprendizaje personalizadas.

Superar estos desafíos requiere un esfuerzo conjunto entre docentes, instituciones, gobiernos y comunidades educativas. Solo a través de una visión compartida y de un compromiso con la transformación del currículo como un sistema vivo y adaptativo, será posible consolidar un modelo educativo que responda a las necesidades del siglo XXI y prepare a los estudiantes para enfrentar un mundo en constante evolución.

Por otra parte, a medida que la educación avanza hacia modelos más flexibles y

personalizados, emergen múltiples oportunidades que pueden transformar el currículo en un ecosistema de aprendizaje dinámico e interconectado. Entre estas oportunidades destacan el uso de la inteligencia artificial y el big data para la personalización del aprendizaje, la creación de entornos educativos más inclusivos y adaptativos, y la aplicación de los avances en neurociencia para mejorar la experiencia de aprendizaje en distintos niveles educativos.

El uso de la inteligencia artificial (IA) representa una de las herramientas más poderosas para personalizar el aprendizaje y adaptar el currículo a las necesidades individuales de los estudiantes. A través del análisis de datos en tiempo real, es posible identificar patrones de aprendizaje, dificultades y fortalezas, permitiendo a los docentes ajustar estrategias y recursos educativos de manera más precisa. La IA también puede facilitar la creación de trayectorias de aprendizaje personalizadas, donde cada estudiante avanza a su propio ritmo, potenciando su desarrollo y fomentando la autonomía en la adquisición del conocimiento.

Otra gran oportunidad es la creación de entornos de aprendizaje más inclusivos, adaptativos, personalizados y conectados. La tecnología y las nuevas metodologías pedagógicas permiten diseñar espacios educativos que respondan a la diversidad de estilos de aprendizaje, promoviendo la equidad y la participación activa y colaborativa de todos los estudiantes. El currículo puede estructurarse como una red de conocimiento interconectada, donde las barreras entre disciplinas se difuminan y se favorece la colaboración, el pensamiento crítico y la creatividad. Además, las herramientas digitales y los entornos virtuales amplían las posibilidades de acceso a la educación, facilitando el aprendizaje en cualquier momento y lugar.

Por último, los avances en neurociencia aplicada a la educación ofrecen un enorme potencial para mejorar la experiencia de aprendizaje en diferentes niveles educativos. La comprensión de cómo el cerebro procesa, retiene y recupera la información permite diseñar estrategias didácticas más eficaces, alineadas con los procesos cognitivos y emocionales del estudiante. La incorporación de principios de la neuroeducación en el currículo posibilita una enseñanza más significativa, en la que el aprendizaje no solo es efectivo, sino también motivador y sostenible a largo plazo.

Aprovechar estas oportunidades implica repensar el currículo desde una perspectiva más dinámica, interconectada, no lineal y centrada en el estudiante. La integración de la tecnología, la neurociencia y el enfoque inclusivo puede convertir la educación en un proceso más flexible y enriquecedor, capaz de responder a los desafíos de un mundo en constante cambio.

Uno de los desafíos más grandes de la educación contemporánea es lograr que el currículo no solo transmita información, sino que fomente la construcción de conocimiento de manera significativa y contextualizada en el que el educando forme parte activa de su proceso de formación. Un currículo adaptable permite diseñar trayectorias de aprendizaje

personalizadas, donde los estudiantes pueden explorar distintos caminos en función de sus intereses, habilidades y estilos de aprendizaje.

No obstante, transformar el currículo en un sistema adaptativo implica superar múltiples retos. La resistencia al cambio, la rigidez de las estructuras educativas tradicionales y la falta de formación docente en enfoques neuroeducativos pueden limitar la implementación de modelos curriculares más flexibles. Sin embargo, las oportunidades son inmensas: el uso de la inteligencia artificial, la analítica del aprendizaje y la personalización de la educación pueden potenciar la adaptabilidad curricular, brindando experiencias de aprendizaje más alineadas con las necesidades individuales y colectivas.

5. Conclusión: Hacia una Educación que Aprende y se Reinventa

Si adoptamos la mirada de la ciencia de la complejidad, el currículo no es una estructura estática ni un simple contenedor de información, sino un sistema vivo, que aprende, evoluciona y se transforma en función de sus interacciones con el entorno y a los cambios y a las necesidades del mismo. Al igual que los sistemas biológicos y las redes neuronales, el currículo debe poseer plasticidad, es decir, la capacidad de adaptarse y reorganizarse a partir de la experiencia y la retroalimentación.

Al igual que el cerebro humano, el currículo debe ser un organismo vivo, en constante evolución, capaz de aprender y reconfigurarse en función del contexto y de quienes participan en él. La neuroplasticidad curricular no es solo una metáfora, sino una necesidad para construir una educación más pertinente, inclusiva y significativa, donde el conocimiento no se limite a compartimentos estancos, sino que fluya en redes interconectadas, preparándonos mejor para los desafíos del futuro.

Pensar el currículo desde la complejidad nos obliga a abandonar la rigidez y asumir la incertidumbre como una parte constante esencial del aprendizaje. Así como en los sistemas vivos, la diversidad, la retroalimentación y la interacción son claves para la evolución del conocimiento. Un currículo neuroplástico, adaptable y en constante transformación, no solo responde a los desafíos del presente, sino que anticipa y da forma a las condiciones del futuro.

En definitiva, comprender el currículo como un sistema vivo implica un cambio de paradigma en la educación. La flexibilidad, la interconexión y la capacidad de aprendizaje continuo deben convertirse en principios rectores de una nueva concepción curricular que prepare a los estudiantes no solo para enfrentar los retos del presente, sino también para construir activamente el futuro. Abandonar la rigidez y la estandarización en favor de estructuras adaptativas permitirá que la educación evolucione al ritmo de los cambios sociales y tecnológicos, proporcionando herramientas para el desarrollo integral de los estudiantes en un mundo en constante transformación.

Referencias

- Arciniegas, C. M. A., Bedoya, D. P. G., & Urbina, L. M. A. (2013). Competencia creatividad e innovación: Conceptualización y abordaje en la educación. Katharsis, 15, Article 15. https://doi.org/10.25057/25005731.245
- Brusilovsky, P., & Peylo, C. (2003). Adaptive and Intelligent Web-based Educational Systems.
- Cardozo, S. (2023). Una aproximación a la interdisciplinariedad como estrategia de enseñanza-aprendizaje desde la perspectiva de docentes universitarios. Revista científica en ciencias sociales, 5(1), 35-43.
- Chacón Corzo, M. A., Chacón, C. T., & Alcedo S., Y. A. (2012). Los proyectos de aprendizaje interdisciplinarios en la formación docente. Revista mexicana de investigación educativa, 17(54), 877-902.
- Davis, B., Sumara, Dennis, & Luce-Kapler Rebecca. (2015). Engaging Minds Cultures of Education and Practices of Teaching. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315695891/engaging-minds-brent-davis-dennis-sumara-rebecca-luce-kapler
- Davis, B., & Sumara, Dennis. (2006). Complexity and Education Inquiries Into Learning, Teaching, and Research (1st Edition). https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203764015/complexity-education-brent-davis-dennis-sumara
- De BONO, E. (1992). El Pensamiento Creativo Edward de Bono. https://www.academia.edu/45568249/El_Pensamiento_Creativo_Edward_de_Bono
- Delgado R., E. O. (2018). ROBOTICA MAKER: Una Estrategia Sintética de Aprendizaje desde las Ciencias de la Complejidad. REPOSITORIO DE TESIS DE LA MAESTRÍA EN ESTUDIOS INTERDISCIPLINARIOS DE LA COMPLEJIDAD. https://repositoriotesiscomplejidad.blogspot.com/2022/03/robotica-maker-una-estrategia-sintetica.html
- Delgado R., E. O., CHIAPPE LAVERDE, ANDRES, & VERA SAGREDO, ANGELICA. (2025). Cybernetics of self-regulation, homeostasis, and fuzzy logic: Foundational triad for assessing learning using artificial intelligence. https://www.researchgate.net/publication/388441874_Cybernetics_of_self-regulation_homeostasis_and_fuzzy_logic_foundational_triad_for_assessing_learning_using_artificial_intelligence
- Doll, W. E. (with Internet Archive). (1993). A post-modern perspective on curriculum. New York : Teachers College Press. http://archive.org/details/postmodernperspe0000doll
- EDS/ROBOTICS. (2020, junio 9). Tecnología 4.0: Beneficios y Aplicaciones en la industria 2022. EDS Robotics. https://www.edsrobotics.com/blog/tecnologia-4-0/
- Galeana, L. (2006). Aprendizaje basado en proyectos. Revista Ceupromed, 1(27), 1-17.
- Giuseppe, T., Perasso, G., Mazzeo°, C., Maculan, A., Vianello, F., Paoletti, P., & Paoletti, F. (2022). Envisioning the future: A neuropsycho-pedagogical intervention on resilience predictors among inmates during the pandemic. RICERCHE DI PSICOLOGIA, 45. https://doi.org/10.3280/rip2022oa14724
- Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A

quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. The Journal of Physiology, 117(4), 500-544. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764

- Holland, J. H. (2005). El Orden Oculto. Fondo de Cultura Economica USA.
- Holland, J., J. H. (1992). Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001
- Izhikevich, E. M. (2007). Dynamical systems in neuroscience: The geometry of excitability and bursting. MIT Press.
- Jurado V., F. (2016). Hacia la renovación de la formación de los docentes en Colombia: Ruta tradicional y ruta polivalente. Pedagogía y saberes, 45, 11-22.
- Kolb, B., Muhammad, A., & Gibb, R. (2011). Searching for factors underlying cerebral plasticity in the normal and injured brain. Journal of Communication Disorders, 44(5), 503-514. https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2011.04.007
- L. Stenhouse. (1975). An Introduction To Curriculum Research And Development. http://archive.org/details/stenhouseanintroductiontocurriculumresearchanddevelopment
- Maldonado, C. (2017). Educación compleja: Indisciplinar la sociedad. https://www.researchgate.net/publication/320719357_Educacion_compleja_Indisciplinar_la_sociedad
- Maldonado, C. (2023). ¿Qué significa el pensamiento crítico en la era de la inteligencia artificial? XXI, 10-11.
- Maldonado, C. E. (2015). Pensar la complejidad, pensar como síntesis. Cinta de moebio, 54, 313-324. https://doi.org/10.4067/S0717-554X2015000300008
- Maldonado, C. E. (2016). Pensar como la naturaleza. Una idea radical. Uni-pluriversidad, 16(2), 41-51.
- Marron, E. M., Adrover-Roig, D., sanchez-cubillo, I., Miranda, R., & Periáñez, J. (2013). Bases neuroanatómicas del aprendizaje y la memoria (pp. 63-94).
- Mayer, E. A. (2011). Gut feelings: The emerging biology of gut–brain communication. Nature Reviews Neuroscience, 12(8), 453-466. https://doi.org/10.1038/nrn3071
- Meneses, A. L. T., Novay, E. G. Z., & Meneses, S. P. T. (2023). Las herramientas tecnológicas en el desarrollo de habilidades y destrezas en la asignatura de Emprendimiento y Gestión. Revista Imaginario Social, 6(1), Article 1. https://revista-imaginariosocial.com/index.php/es/article/view/92
- Orbe, A. (2011, diciembre 11). Breve Historia de la Neurociencia. Sinapsis. https://sinapsis-aom.blogspot.com/2011/12/breve-historia-de-la-neurociencia.html
- Pherez, G., Vargas, S., & Jerez, J. (2018). Neuroaprendizaje, una propuesta educativa: Herramientas para mejorar la praxis del docente1. Civilizar Ciencias Sociales y Humanas, 18(34), 149-166.
- Ramírez Montoya, M. S., García Peñalvo, F. J., Navarro Parra, S., & Jerónimo Montes, J.

Referencias

A. (2023). Estrategias de innovación para ambientes de aprendizaje. Innovación e investigación educativa. https://hdl.handle.net/11285/650037

- Tapia, V. O. (2022). Innovación educativa: Propuesta conceptual, paradigmática y dimensiones de acción. Revista Ensayos Pedagógicos, 17(2), Article 2. https://doi.org/10.15359/rep.17-2.5
- Teran-Pazmiño, E. M., Cadena-Morales, L. S., González-González, L. P., Guamán-Sánchez, N. de J., & León-Flores, M. C. (2024). Tecnología y Personalización del Aprendizaje. Revista Científica Retos de la Ciencia, 1(4), Article 4. https://doi.org/10.53877/rc.8.19e.202409.10
- Tyler, R. W., Gagné, R. M., & Scriven, M. (1967). Perspectives of curriculum evaluation. Rand McNally.




LaSalle
Universidad


Una obra de los Hermanos de La Salle
#300años
de experiencia en educación