



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA

TESIS

**APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA
CULTURAL DE UN SISTEMA TIPO AXELROD MODIFICADO**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
MENCIÓN FÍSICA**

AUTOR

Br. JANET KIMBERLY RODRIGUEZ RODRIGUEZ

ASESOR

Dr. DOMINGO WALTER KEHUARUCHO CARDENAS

ORCID: 0000 0002 1009 1618

CUSCO-PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación/tesis titulado: "APLICACIÓN DE LA ENTROPIA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA CULTURAL DE UN SISTEMA TIPO AXELROD MODIFICADO" presentado por: JANET KIMBERLY RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

con Nro. de DNI: 24003950, para optar el título profesional/grado académico de MAESTRO EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por...1... veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de...8%...

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje | Evaluación y Acciones | Marque con una (X) |
|----------------|---|--------------------|
| Del 1 al 10% | No se considera plagio. | X |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las correcciones. | — |
| Mayor a 31% | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | — |

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 17 de MARZO de 2025

Firma

Post firma: D. WALTER KAHUARICHO CARDENAS

Nro. de DNI: 23884606

ORCID del Asesor: 0000-0002-1009-1618

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:438904044?locale=es-MX

Submissions/oid: 27259:438904044?locale=es-MX ✓

JANET KIMBERLY RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA CULTURAL DE UN SISTEMA TIPO AXELROD MODI...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:438904044

122 Páginas

Fecha de entrega

12 mar 2025, 8:00 p.m. GMT-5

22.615 Palabras

Fecha de descarga

25 mar 2025, 9:59 a.m. GMT-5

127.929 Caracteres

Nombre de archivo

APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA CULTURAL DE UN SISTEMA TIP....docx

Tamaño de archivo

1.6 MB

8% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Small Matches (less than 40 words)

Top Sources

- 8%  Internet sources
- 3%  Publications
- 3%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA DE POSGRADO

INFORME DE LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES A TESIS

Dra. NELLY AYDE CAVERO TORRE, Directora (e) General de la Escuela de Posgrado, nos dirigimos a usted en condición de integrantes del jurado evaluador de la tesis intitulada **APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA CULTURAL DE UN SISTEMA TIPO AXELROD MODIFICADO** de la Br. Br. **JANET KIMBERLY RODRIGUEZ RODRIGUEZ**. Hacemos de su conocimiento que el (la) sustentante ha cumplido con el levantamiento de las observaciones realizadas por el Jurado el día **QUINCE DE ABRIL DE 2025**.

Es todo cuanto informamos a usted fin de que se prosiga con los trámites para el otorgamiento del grado académico de MAESTRO EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA.

Cusco, 21 de Abril del 2025

DRA. YENY MÁRITZA ACCOSTUPA QUISPE
Primer Replicante

MGT. MIRIAM HAYDEE ROMERO PEÑA
Segundo Replicante

DR. PASTOR RAUL CHURA SERRANO
Primer Dictaminante

MGT. SAYRI TUPAC GARCIA ROCA
Segundo Dictaminante

PRESENTACIÓN

Señor Director de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del Jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco, Maestría en Ciencias con Mención en Física, pongo a vuestra consideración el presente trabajo de tesis intitulado “APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA DE BOLTZMANN EN LA DINÁMICA CULTURAL DE UN SISTEMA TIPO AXELROD MODIFICADO”, para optar al Grado Académico de Maestro en Ciencias con mención en Física.

En el presente trabajo, se ha utilizado el modelo de interacción de agentes culturales tipo el modelo de Axelrod, con la finalidad de aplicar la entropía de Boltzmann en un sistema complejo como es la red de agentes culturales interactuantes.

Se ha diseñado un programa de simulación para tal fin y como resultado de este trabajo, se hace la interpretación del cambio de fase de la evolución de la entropía al variar el número de rasgos culturales en una red compleja.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi pueblo Andino-Amazónico-Aymara que me ha dado el contenido de mi modo de ser y estar en esta vida.

INDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| PRESENTACIÓN..... | 2 |
| ÍNDICE DE FIGURAS:..... | 10 |
| ÍNDICE DE TABLAS:..... | 13 |
| GLOSARIO:..... | 14 |
| RESUMEN..... | 16 |
| ABSTRACT..... | 16 |
| INTRODUCCIÓN..... | 17 |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 21 |
| 1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA..... | 21 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 26 |
| a. PROBLEMA GENERAL..... | 30 |
| b. PROBLEMAS ESPECÍFICOS..... | 30 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 31 |
| 1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 33 |
| a. OBJETIVO GENERAL..... | 33 |
| b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 33 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 2.1. BASES TEÓRICAS..... | 34 |
| 2.1.1. Conceptos antropológicos..... | 34 |
| 2.1.1.1. Antropología..... | 34 |
| 2.1.1.2. Sociología..... | 35 |
| 2.1.1.3. Sociedad..... | 36 |
| 2.1.1.4. Comunidad humana..... | 36 |
| 2.1.1.5. Cultura..... | 36 |
| 2.1.2. Conceptos físicos y matemáticos..... | 37 |
| 2.1.2.1. Sociofísica..... | 38 |
| 2.1.2.2. Tabla de verdad..... | 38 |
| 2.1.2.3. Elementos de la teoría de la probabilidad..... | 41 |
| 2.1.2.3.1 Permutación..... | 41 |
| 2.1.2.3.2 Combinación..... | 41 |
| 2.1.2.4. La lógica de la teoría cuántica..... | 42 |
| 2.1.2.5. Energía..... | 43 |
| 2.2. MARCO CONCEPTUAL..... | 44 |
| 2.2.1. Sistemas complejos..... | 44 |
| 2.2.2. Atributo cultural y Rasgo cultural..... | 44 |
| 2.2.3. Modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997)..... | 45 |

| | |
|--|----|
| “Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado” | |
| 2.2.4. Interacción..... | 50 |
| 2.2.5. Entropía..... | 52 |
| 2.2.6. Entropía de Boltzmann..... | 54 |
| 2.2.7. Grados de libertad..... | 55 |
| 2.2.8. Transición de fase..... | 55 |
| 2.2.9 Autómata celular..... | 55 |
| 2.2.10. Vecindad de Von Neumann..... | 55 |
| 2.2.11. Grilla espacial (red, rejilla, entramado, cuadrícula)..... | 56 |
| 2.2.12. Condición de contorno periódica..... | 56 |
| 2.2.13. Riqueza cultural..... | 58 |
| 2.2.14. Diversidad cultural..... | 58 |
| 2.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE)..... | 58 |
| 2.3.1. The Dissemination of Culture. R. Axelrod. Published 1 April..... | 58 |
| 2.3.2. Intracultural diversity in a model of social dynamics A..... | 60 |
| 2.3.3. Statistical physics of social dynamics..... | 61 |
| 2.3.4. Statistical mechanics of complex networks..... | 64 |
| 2.3.5. Sociophysics: A review of Galam models..... | 66 |
| 2.3.6. Thermodynamics and Statistical mechanics for complex..... | 68 |
| CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| 3.1. HIPÓTESIS..... | 70 |
| a. Hipótesis general..... | 70 |
| b. Hipótesis específicas..... | 70 |
| 3.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES..... | 70 |
| CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA..... | 71 |
| 4.1. Introducción..... | 71 |
| 4.1.1. Naturaleza compleja de un ente cuántico..... | 72 |
| 4.1.2. Analogía de la Naturaleza hipersensible de los entes cuánticos y de la dinámica cultural..... | 84 |
| 4.1.3. Naturaleza relacional como el contenido de realidad..... | 87 |
| 4.2. Tipo y nivel de investigación..... | 88 |
| 4.3. Construcción del algoritmo de simulación en base al modelo de Axelrod..... | 89 |
| 4.3.1. Algoritmo aplicado..... | 94 |
| 4.3.2. Uso pertinente de la entropía de Boltzmann en la medida de la diversidad de un sistema intercultural..... | 96 |
| 4.4. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN..... | 104 |
| 4.4.1. Construcción del algoritmo de simulación a través del modelo modificado de diseminación cultural de Axelrod..... | 104 |
| 4.5. TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN..... | 107 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 108 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN..... | 108 |
| 5.2. COMPLEJIDAD Y TEORÍA CUÁNTICA..... | 109 |
| 5.3. COMPRENSIÓN DE LA OBJETIVIDAD..... | 110 |
| 5.4. ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO..... | 110 |
| 5.5. EVOLUCIÓN DE LA ENTROPÍA: ENTROPÍA EN FUNCIÓN DE LOS RASGOS CULTURALES..... | 111 |
| 5.6. PROPIEDADES COMPLEJAS DEL SISTEMA DE AGENTES CULTURALES... | 116 |
| 5.7. AUTOORGANIZACIÓN..... | 119 |
| 5.8. EMERGENCIA..... | 124 |
| 5.9. NO CENTRALIDAD CULTURAL..... | 125 |
| 5.10. TRANSICIÓN DE FASE..... | 125 |
| 5.11. SOCIEDAD Y COMUNIDAD..... | 129 |
| 5.12. DISCUSIONES FINALES..... | 130 |
| CONCLUSIONES:..... | 131 |
| SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES:..... | 133 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 134 |
| ANEXOS | |
| a. Matriz de consistencia | |

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Red cuadrada bidimensional

Figura 2: Red toroidal (**fuentes:** [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRgVzjnXcWUhaA5r3ltMqI3u_xkJx7ASpckvCWEsChY4E2i3UdGkRdHs5gut0W_MCRT4&usqp=CAU)

[q=tbn:ANd9GcRgVzjnXcWUhaA5r3ltMqI3u_xkJx7ASpckvCWEsChY4E2i3UdGkRdHs5gut0W_MCRT4&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRgVzjnXcWUhaA5r3ltMqI3u_xkJx7ASpckvCWEsChY4E2i3UdGkRdHs5gut0W_MCRT4&usqp=CAU))

Figura 3: Tablas de verdad.

Figura 4: Red bidimensional utilizada en el modelo de Axelrod.

Figura 5: Función de onda del átomo de hidrógeno (**Fuente:**

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen_Density_Plots.png/)

Figura 6: Vecindad de Von Neumann de la celda central.

Figura 7: Red Toroidal.

Figura 8: Proceso de interpretación espacial del ente cuántico.

Figura 9: Pozo de potencial infinito.

Figura 10: Distribución del átomo de hidrógeno en el espacio físico. (**fuentes:**

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3F%3Dn1uFMOD1JgU&psig=AOvVaw2x2J6D_PmzujqMJ3iLPgH5&ust=1733927729480000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCOiymaW2nYoDFQAAAAAdAAAAABAJ

Figura 11: Interacción de la partícula con su entorno.

Figura 12: Interacción compleja de la partícula con su entorno y entre las partículas del entorno.

Figura 13: Niveles asociados a los estados.

Figura 14: Constructo cultural

Figura 15: Primeros cuatro vecinos del agente cultural.

Figura 16: Distribución de los distintos vectores culturales.

Figura 17: Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 5x5, $F=3$ y $q_c=3,539$.

Figura 18: Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 10x10, $F=3$ y $q_c=9,165$.

Figura 19: Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 15x15, $F=3$ y $q_c=10,835$.

Figura 20: Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 20x20, $F=3$ y $q_c=11,987$.

Figura 21: Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 5x5 y $q=30$.

Figura 22: Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 10x10 y $q=30$.

Figura 23: Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 15x15 y $q=30$.

Figura 24: Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 20x20 y $q=30$.

Figura 25: Transición de fase.

Figura 26: Transición de fase.

Figura 27: Curva teórica de la entropía.

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Microestados culturales posibles.

Tabla 2: Medida de la Entropía, Microestados y número de microestados culturales para 20 unidades de tiempo de una red de dimensión 20×20 , $F=3$ y $q=30$.

Tabla 3: Valor promedio y desviación estándar de la diversidad cultural.

GLOSARIO:

- **Lógica dialógica:** La lógica dialógica es esencial en contextos donde el entendimiento y la construcción del conocimiento son objetivos primordiales que se producen a través de la unidad y confrontación de los contrarios, considerando la lógica del tercero incluido como elemento principal de la indeterminación para su respectiva determinación.
- **Disciplinarietà:** Es la determinación de una disciplina como rama del conocimiento autónoma e independiente que tiene su propio enfoque, teorías y metodologías. Por ejemplo, la física, la psicología y la sociología son consideradas disciplinas.
- **Interdisciplinarietà:** La interdisciplinarietà es un enfoque integracionista que combina conocimientos, métodos y perspectivas de diferentes disciplinas que interactúan para abordar un problema o tema específico de manera más completa, pero sin modificar las metodologías disciplinarias.
- **Multidisciplinarietà:** La multidisciplinarietà es un enfoque que implica la colaboración y el trabajo conjunto de diferentes disciplinas para abordar un tema o problema en paralelo, pero cada disciplina se mantiene en su propia perspectiva y metodología.
- **Transdisciplinarietà:** La transdisciplinarietà es un enfoque que va más allá de la simple colaboración entre disciplinas (como en la multidisciplinarietà) y la integración y combinación de conocimientos (como en la interdisciplinarietà). Se centra en la creación de un nuevo conocimiento que trasciende las fronteras de las

metodologías de las disciplinas existentes modificándolas, de-construyéndolas y destruyéndolas, buscando soluciones a problemas complejos que no pueden ser abordados adecuadamente desde la perspectiva reduccionista de una sola disciplina.

- **No linealidad del tiempo:** Las interacciones con el entorno generan cambios y/o transformaciones que de-estructuran y de-construyen el modo de ser del sujeto, por lo que el tiempo no transcurre del mismo modo para cada sujeto.
- **Macroestado:** Diversidad cultural medida por la entropía de Boltzmann como una propiedad emergente del sistema intercultural complejo.
- **Microestado:** Riqueza cultural de una configuración obtenida del espacio muestral.
- **Complejo-complicado:** Un sistema complejo es producto de sus interacciones colectivas y se manifiesta a través de propiedades emergentes, en tanto que un sistema complicado es producto de su relación entre sus componentes donde el todo es la suma de sus partes. Ejemplos: el cuerpo humano cuya emergencia es la vida, y una computadora que solo es ensamblable y cuyo funcionamiento depende de la respuesta de sus componentes.
- $VC(\vec{r}, t)$: vector cultural del agente ubicado en la posición \vec{r} y en el instante t .

RESUMEN

En el presente trabajo se hace el estudio de la dinámica de un sistema intercultural bajo el modelo de Axelrod modificado aplicando la entropía de Boltzmann, como una forma de medida de la diversidad cultural del sistema, al presentar una transición de fase desde una dinámica cultural homogénea a una heterogénea donde la diversidad cultural alcanza un valor que no excede el valor máximo de la diversidad cultural. En el proceso de estudio se ha evidenciado el comportamiento del sistema bajo las propiedades de emergencia y autoorganización como formas de expresión dinámica de su comportamiento complejo enmarcado dentro de una lógica dialógica de unidad y lucha de contrarios de categorías, que si bien se puede entender como inconexas se entrelazan coherentemente en todo el proceso dinámico interactivo, produciendo la propiedad de no centralidad cultural como contenido dinámico del sistema intercultural. Lo que implica que la dinámica cultural presenta una dialéctica: estabilidad global e inestabilidad puntual.

Palabras clave: entropía de Boltzman, dinámica cultural, modelo de Axelrod, comportamiento complejo

ABSTRACT

In this paper the dynamics of an intercultural system are studied under the modified Axelrod model applying Boltzmann entropy, as a measure of the system's cultural diversity. This model presents a phase transition from a homogeneous to a heterogeneous cultural dynamic, where cultural diversity reaches a value that does not exceed the maximum value of cultural diversity. The study process has revealed the system's behavior under the properties of emergence and self-organization as forms of dynamic expression of its complex behavior, framed within a dialogical logic of unity and struggle of opposites of categories. Although these categories can be understood as unconnected, they are coherently intertwined throughout the interactive dynamic process, producing the property of cultural non-centrality as the dynamic content of the intercultural system. This implies that cultural dynamics present a dialectic: global stability and punctual instability.

Keywords: Boltzmann entropy, cultural dynamics, Axelrod model, complex behavior

INTRODUCCIÓN

El conocimiento científico-tecnológico moderno contemporáneo establecido por una disciplinarianidad occidental sobre los diversos campos aparentemente inconexos, se constituye en un peligro al negar la necesaria transdisciplinarianidad (*Basarab, 1996*) en la construcción del conocimiento de la complejidad con la que se manifiesta la materialidad y subjetividad de los hechos y/o acontecimientos, en los cuales se manifiesta el intrincamiento de los distintos aspectos, tales como el biológico, físico y cultural (*Lupasco, 1963*).

Vivimos bajo el paradigma reduccionista de la simplificación cuyas consecuencias nocivas privan a la ciencia moderna de toda posibilidad de reflexión crítica sobre sí misma en cuanto parte de una totalidad objetivista, anulando la necesaria diversidad en la multiformidad de criterios de complementariedad de los distintos sistemas de conocimiento del ente en estudio (objeto físico), aislando reduccionisticamente los cuerpos o sistemas de estudio de sus medios y/o entornos con los cuales coexisten; sin responsabilizarse de las consecuencias de sus “descubrimientos”, debido a la incapacidad de concebir la realidad en su complejidad inherentemente antropológica (*Basarab, 1996*).

El pensamiento complejo nos permite construir conocimiento en concordancia y coherencia a las necesidades vitales primordiales del sujeto histórico cuyo modo de ser y estar es en comunidad viviente. La dinámica humana no depende únicamente de los avances científicos y tecnológicos los cuales no siempre resuelven los problemas que nos aquejan sino que a veces los complican innecesariamente. La producción de demasiadas cosas útiles deviene en demasiadas personas inútiles (*Marx, 2002*).

La ciencia es una de las formas de interpretar la exterioridad, pero existe una gran diversidad de interpretaciones o sistemas de conocimiento que muestran, cada una de ellas, parte de la complejidad del “objeto”, permitiendo entender a la exterioridad desde la complejidad del intrincamiento de los campos del conocimiento humano complementariamente.

El principio ético fundamental es la VIDA, y todos los campos del conocimiento humano y del desarrollo tecnológico deben partir desde este principio con el propósito de garantizar las condiciones de producción y reproducción de la vida. No es nada descubrir algo nuevo, hay que descubrir para qué se descubre (Dussel, 2019).

Los campos del conocimiento humano no son independientes, existe una relación de interdependencia entre ellos para abordar coherentemente la complejidad de un problema, por tanto la disciplinariedad, la interdisciplinariedad y la multidisciplinariedad no son suficientes para tal fin; la transdisciplinariedad a través de sus tres pilares: los niveles de realidad, la lógica del tercero incluido y la complejidad, induce a tomar conciencia de la necesidad de utilizar criterios de la Física para enriquecer la interpretación de los procesos humanos en la comprensión de un mundo para el cual estén incluidos todos los saberes a través de sus distintas formas interculturales en su diversidad interactuante (Basarab, 1996).

Surge entonces una pregunta, ¿podría la Física servir como un instrumento que permita contribuir en el conocimiento del comportamiento humano de las sociedades o comunidades humanas?, es decir, ¿a través de la Física se pueden estudiar los sistemas sociales o comunitarios, o parte de su contenido dinámico como manifestaciones de sistemas complejos?

Existen en el mundo más de 7700 millones de seres humanos interactuando (según los datos de Census.gov (2021)) dando lugar a comportamientos emergentes a distintas escalas. Es decir, la comunidad de hombres esta compuesta por seres humanos, pero su comportamiento no se reduce al comportamiento de un ser humano. En cualquier sistema se generan propiedades emergentes propias de su existencia específica como complejo de elementos interactuantes en complejidad.

En general, la idea central de usar la Física para describir lo humano o sus complejas manifestaciones en su dinámica cultural se basa en considerar las comunidades de hombres como sistemas de “partículas” con diversas clases de interacciones complejas. La humanidad requiere auto-organizarse para su sobrevivencia fundamentada en los principios humanos de complementariedad, reciprocidad y equivalencialidad como formas prácticas del modo de SER y ESTAR humanos: la comunidad. Dinámica auto-organizativa que se desenvuelve en procesos de-constructivos interculturales complejos relacionados con la no linealidad del tiempo.

La aplicación de la Física a la dinámica cultural nace de los aportes o enfoques novedosos de la Física a la Sociología conocida como Sociofísica, dentro de la cual también se estudia la dinámica cultural de un sistema tipo, el modelo de Axelrod (Parravano, 2013).

Antropólogos, sociólogos, historiadores, economistas, politólogos concuerdan en la idea de la evolución de sistemas sociales como producto de la interacción de sus elementos, y para su interpretación se plantean y formulan metodologías usadas en Física. Por ejemplo, la transición de comunidades de caza a comunidades agrícolas puede ser descrita a través del concepto de transición de fase tal como en un sistema físico (Castellano, 2009).

En primera aproximación, la Física Clásica puede acercarnos al entendimiento del comportamiento humano colectivo a través de la Física Estadística Clásica como método que puede aproximarnos a la interpretación de la dinámica compleja de los sistemas tales como sociedades, comunidades, agrupaciones, colectividades humanas como sistemas de elementos interactuantes.

El presente trabajo de investigación busca aplicar algunas categorías de la Física Estadística al estudio de la dinámica cultural de agentes tipo el modelo de Axelrod (*sistema dinámico espacio-temporal*) perteneciente a la clase de autómatas celulares (sistemas de elementos con tiempo, espacio y estado discretos), para interpretar esas interacciones.

A través de un programa de simulación en donde interactúan agentes culturales dotados de atributos y rasgos culturales que representan a sujetos históricos, se aplica la entropía de Boltzmann para medir la dinámica de la diversidad cultural de una comunidad humana en base a la cual se puede realizar la interpretación de dicha dinámica mediante el modelo de Axelrod con el propósito de enriquecer el conocimiento del comportamiento humano.

Lo que se busca es observar propiedades emergentes y autoorganizativas en el sistema intercultural a través de un programa de simulación coherente con la dinámica cultural real. Las propiedades del sistema pueden ser caracterizadas por un parámetro de medida de su diversidad cultural, la entropía. Es así como la medida de la entropía permite interpretar la dinámica cultural del sistema complejo.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

No existe argumentación humana posible cuya raíz de enunciación no sea la vida misma. El contenido último de toda argumentación es la vida. La vida es un don que la naturaleza ha dado, entre otras especies, al hombre, y su carácter sagrado impele asumir que lo supremo para el hombre es el hombre como producto de la naturaleza. Por tanto, los distintos campos y sistemas de argumentación tienen como sentido primero, de práctica y técnica, el cuestionamiento crítico de los problemas humanos.

La crítica situación en la que se encuentran las condiciones de producción y reproducción de la vida humana plantean la necesidad urgente de interrogarse sobre el hombre y sus hechos, su cultura y su dinámica histórica desde una comprensión de su existencia compleja, y no complicada, de su viaje sideral en el tiempo y el espacio.

Esta intención de abordar el conocimiento del hombre y sus problemáticas dinámicas exige la concurrencia transdisciplinaria de todos los campos disciplinarios del conocimiento humano, incluyendo a la Física, que haga posible un mejor entendimiento de su totalidad existencial. Ésto solo es posible a través de un enfoque transdisciplinario de entrelazamiento de las distintas disciplinas del conocimiento humano.

Es en este sentido transdisciplinario que los métodos desarrollados por la Física pueden ser de suma utilidad para el enriquecimiento de la interpretación, al aplicarse al estudio, de los sistemas humanos y sus problemáticas complejas, que en la actualidad son objeto de estudio en las áreas de aplicación científica de la Física: Sociofísica, Econofísica y Antropofísica. Estos

enfoques han mostrado resultados coherentes en el modelamiento de diversas situaciones humanas: comunitarias, sociales, políticas, culturales, educativas, conflictuales, segregacionales, etc. (Castellano, 2009), puesto que todos estos campos de la dinámica humana contienen como forma de producirse el concepto fundamental de *interacción*, que se manifiesta en todos los campos del conocimiento físico del comportamiento de la materia.

Este concepto se remonta a los orígenes del mecanicismo físico y del método científico consolidado por Descartes, Kepler, Galileo, Leibnitz y Newton, los intentos de explicación del comportamiento humano desde el punto de vista de la Física Moderna; sin embargo, la interpretación trasciende el ámbito de la ciencia clásica y se inserta en los ámbitos de la teoría cuántica compartiendo su lógica dinámica.

Posiblemente fue un filósofo inglés llamado Thomas Hobbes el primero en desarrollar una teoría reduccionista de la sociedad basada en principios mecanicistas que publicó en su obra maestra *Leviatán* en 1651, quien pensaba que para entender el funcionamiento de la sociedad había que entender el funcionamiento de los individuos a los que consideraba como partículas o como piezas de engranajes que debían ajustarse para formar una máquina complicada que sería la sociedad.

Auguste Comte (1798-1857), considerado como el padre de la Sociología (cuyo primer nombre fue Física Social), estaba muy influenciado por el mecanicismo newtoniano y galileano y pensaba que la Física podía aplicarse a todos los fenómenos naturales, incluyendo los sociales.

Después de Comte, varios científicos y pensadores que contribuyeron al desarrollo de la Mecánica Estadística y de la Termodinámica como Maxwell, Boltzmann, Gibbs, Fisher y otros, establecieron analogías y paralelismos entre las leyes de las ciencias duras (física) y ciencias blandas (humanas), algunas de esas analogías e ideas como el de comparar la sociedad con una máquina, a través de los conceptos de: eficiencia, entropía, transiciones de fase, puntos críticos, etc, han sido usados por otros científicos sociales como parámetros de medida de la dinámica social (Castellano, 2009).

En la actualidad, una importante cantidad de científicos, se encuentran abordando los problemas, las dinámicas, las formas de interacción de la complejidad humana, desde la lógica de la física cuántica. Entre los trabajos más destacados desde su argumentación se tienen los estudios de la mente y conciencia humana desarrollados por el físico matemático Roger Penrose (Penrose, 2020) o el físico cuántico Alan Wolf (Wolf, 2006), temas que son imposibles sin considerar la dinámica histórica humana y que ésta es imposible sin abordar el concepto de interculturalidad como una forma de interacción cuya lógica manifiesta una analogía con la lógica cuántica.

Desde este marco de referencia se justifica el tratamiento de problemas como los que se generan en la complejidad de la vida humana, aplicando categorías y herramientas de la Física Estadística al campo de la dinámica humana; comprendiendo e investigando la vida humana, adecuando estas aplicaciones en la interpretación del contenido complejo viviente. Así lo muestran Serge Galam, Lászlo Barabasi, Claudio Castellano entre otros, con sus trabajos: *Statistical mechanics of complex networks*, *Reviews of Modern Physics*; R. Albert and A.L. Barabasi, Vol. 74, No. 1. (2002), con su obra *Statistical physics of social dynamics* *Rev. Mod.*

Phys. 81, 591 (2009); C. Castellano et al., en Sociophysics, A Physicist's Modeling of Psychological Phenomena y S. Galam, Springer (2012), (2008) Sociophysics: A review of Galam models, S. Galam; etc.

Si bien es cierto que, la dinámica de grupos humanos o proto humanos antecede al estudio y modelamiento estadístico de los fenómenos físicos de muchos cuerpos, la física a través de los métodos establecidos en la Física Estadística puede contribuir en el enriquecimiento de la interpretación y el modelamiento de la dinámica compleja que se desarrolla en las colectividades humanas.

Muchos de los fenómenos que se presentan y se generan en los sistemas humanos responden a una multiplicidad compleja de interacciones, tanto en calidad como en cantidad, y la aplicación de herramientas de la Física Estadística es pertinente y adecuada para la comprensión y entendimiento de la dinámica compleja humana, en cuyo seno los fenómenos que se presentan son el resultado de causas colectivas debidas a la complejidad con que se desenvuelven las distintas interacciones de sus elementos que para el caso del presente trabajo de investigación los llamamos sujetos culturales.

Si bien se hace el estudio de las interacciones básicas de las partículas físicas, el carácter viviente de los sistemas humanos hacen aun más compleja su naturaleza interactiva. Entendemos la categoría *vida* como una manifestación que excede de lejos una conceptualización biológicamente reduccionista, puesto que la vida se produce, sine qua non, como propiedad emergente de la complejidad que involucra historia y cultura, además de comportamiento cuántico.

Como muestra la experiencia humana, la dinámica de las interacciones entre sujetos culturales, de una sociedad o de una comunidad, no necesariamente conduce a una homogeneidad cultural, manifestando en su evolución transiciones de fase como propiedades emergentes, dependiendo esta situación, del valor de los parámetros específicos que caracterizan a la población. Este comportamiento es análogo al comportamiento de algunos sistemas físicos de muchos cuerpos que muestran medidas equivalentes relativas a los observables físicos de sistemas colectivos.

Destacados sociólogos, politólogos y economistas, como Thomas Schelling (2006) y Robert Axelrod (1997), propusieron modelos basados en agentes para explicar diversos fenómenos sociales colectivos considerados como procesos colectivos emergentes usuales en diversos sistemas dinámicos y, por tanto, susceptibles de ser abordados por la Física.

En un artículo Robert Axelrod (Axelrod, 1997), propuso un modelo que ha recibido considerable atención de los físicos Castellano (Castellano, 2009) y Barabási (Barabási, 2002). Axelrod describe en este modelo el proceso de propagación de la cultura entre agentes interactivos en un sistema social. Modelo que simula la difusión cultural; es decir, cómo se difunde la cultura dentro de una sociedad, proponiendo un mecanismo según el cual las personas se vuelven más parecidas culturalmente cuanto más interactúan, con la posibilidad de que la tendencia a converger dependa del valor de ciertos parámetros culturales, dando lugar a la posibilidad de una transición de fase; entre dos manifestaciones completamente opuestas: el consenso y la polarización.

Las metodologías utilizadas para la medición de estas transiciones de fase tienen distinta naturaleza, por ejemplo, Mario Cosenza utiliza la medida del área de mayor dominio

cultural sobre la red de interculturalidad como la medida del grado de homogeneidad (Cosenza, 2007). Sin embargo, es posible contribuir con el estudio de la dinámica cultural desde la construcción de nuevas metodologías que puedan enriquecer, comparar, consolidar y legitimar los resultados de los distintos campos de interpretación de la dinámica humana ya desarrollados, utilizando y/o aplicando categorías y conceptos físico-estadísticos, como la entropía de Boltzmann, en el estudio de la evolución dinámica cultural en la diseminación cultural, dentro del marco conceptual de los autómatas celulares desarrollado por Axelrod.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se cuenta con el modelo de diseminación cultural de Axelrod sobre una red cuadrada bidimensional. Basado en este modelo, se busca describir e interpretar la dinámica cultural utilizando parámetros generados por las interacciones entre los sujetos culturales. Estos parámetros estarían relacionados con magnitudes de sistemas físicos, utilizados dentro del contexto de la física estadística, de tal manera que, se puede contribuir a su entendimiento complejo.

Esta dinámica puede ser modelada aplicando categorías físicas tales como:

- **Entropía intercultural**, que se entiende como el grado de diversidad cultural o sea el número de microestados culturales distintos que habitan un espacio cultural de muchos sujetos, útil para el estudio y la medida de la dinámica de la diversidad cultural que se produce por la multiplicidad de formas de interacción.
- **Grados de libertad**, que están relacionados con la cantidad de configuraciones distintas de microestados culturales posibles.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

- **Microestado cultural**, Vector cultural obtenida de la combinación de los rasgos culturales.
- **Macroestado cultural**, Diversidad cultural medida por la entropía de Boltzmann como una propiedad emergente.
- **Configuración de microestado cultural**, es la forma específica que tienen los distintos microestados culturales.
- **Transición de fase**, que puede relacionarse con el cambio súbito de la diversidad del sistema intercultural desde una homogeneidad hacia una heterogeneidad cultural.
- **Energía**: es una propiedad que, potencialmente, tiene todo sistema sea físico, biológico, químico, humano, etc; y, puede ser entendida como la capacidad de transformación de estado.

Todas estas analogías evidencian y posibilitan entender, describir y establecer relaciones entre variables físicas y variables sociológicas que permiten modelar, simular y evaluar la dinámica cultural basada en la interacción de agentes autómatas tipo Axelrod distribuidos en una red toroidal, como se muestra en la figura 2.

La dinámica cultural involucra un número grande de elementos interactuantes los cuales componen un sistema intercultural. Cada elemento se puede considerar como un sujeto cultural que puede ser representado por un vector cultural de dimensión n , tipo Axelrod:

$$VC = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n);$$

donde cada componente a_i representa una dimensión o característica cultural llamada atributo cultural. Cada atributo cultural está determinado por uno de los rasgos culturales que posee dicho atributo.

Es decir, por ejemplo, si el atributo cultural a_i es un dialecto de la amazonía, entonces este atributo puede poseer k rasgos culturales como posibilidades de determinación:

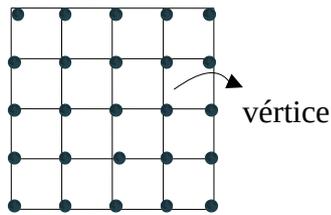
a_{i1} : Shipibo, ..., a_{ij} : Ashaninka, ..., a_{ik} : Matsigenka

Los vectores culturales definidos de este modo, producen un número máximo k^n de configuraciones distintas, que a su vez definen el espacio muestral con k^n grados de libertad.

Cada sujeto cultural es representado por un vector de estado cultural del espacio muestral y es distribuido aleatoriamente sobre los vértices de las celdas de una red cuadrada, figura 1.

Figura 1

Red cuadrada bidimensional



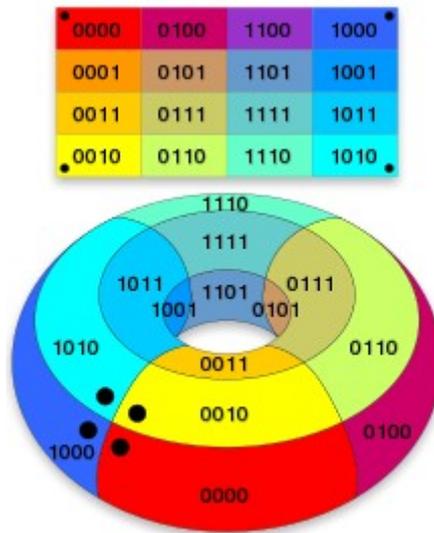
Nota. Cada vértice de la red representa un vector cultural. *Elaboración propia.*

Al unir los lados opuestos de esta red cuadrada se obtiene una red cuadrada toroidal (esta idea ha sido inspirada del mapa de Karnaugh utilizada para simplificar funciones lógicas, cada celda representa las combinaciones de los estados de cada variable lógica, en este caso

tiene cuatro variables y cada variable dos estados lógicos 0 y 1, por lo que se obtiene 16 combinaciones, los cuales se muestran en la figura 2) donde se distribuyen los vectores de estado cultural garantizando de esta forma la interacción de cada uno de los sujetos culturales con uno de sus cuatro primeros vecinos de acuerdo al modelo de Axelrod.

Figura 2

Red toroidal



Nota. Mapa de Karnaugh de cuatro variables lógicas. *Red cuadrada toroidal.* Fuente *Wikipedia.*

En la figura 2, cada vértice de la red está constituida por un vector cultural de cuatro atributos, cada uno de los cuales con dos rasgos culturales, lo que implica que el espacio muestral tiene $2^4=16$ configuraciones, combinaciones o microestados culturales.

Las categorías físicas de tiempo y espacio son consecuencias de las interacciones, no pueden tener existencia fuera de ellas, por tanto, el tiempo de evolución dinámica se relaciona con el número de interacciones entre sujetos culturales de la red.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

Cada cierto número de interacciones se procede a la medida de la entropía de Boltzmann que se encuentra relacionada directamente con la diversidad cultural.

Luego se procede a obtener datos de la entropía en función del tiempo y la cantidad de población para graficar y evaluar la evolución de la diversidad cultural del sistema en el tiempo.

Habiendo descrito los criterios fundamentales por los cuales se desarrolla la presente investigación, se aplica la entropía de Boltzmann como forma de medida de la diversidad cultural de un sistema que permite observar y medir la dinámica cultural aplicando como mecanismo de interacción el algoritmo de Axelrod.

En base a este algoritmo se simula la interacción cultural de los sujetos de la red toroidal por medio del lenguaje de programación RStudio.

a. PROBLEMA GENERAL

¿Es posible aplicar la entropía de Boltzmann al estudio de la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado?

b. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿De qué modo influye el número de rasgos culturales en la transición de fase del sistema?
- ¿Es posible mostrar una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente existe una cantidad importante de trabajos de investigación contruidos en base al modelo dinámico de Axelrod fundamentado en los autómatas celulares. Sin embargo, la aplicación de conceptos y/o categorías físicas para el estudio de la dinámica cultural de agentes basada en este modelo aún es un campo abierto, y relativamente nuevo, a la investigación transdisciplinaria. Esta posibilidad de establecer puentes de interconexión entre los campos de conocimiento entre las ciencias “duras” y las ciencias “blandas” se encuentra fundamentada en la analogía que se evidencia en la lógica del desenvolvimiento de las dinámicas tanto del mundo de la cuántica como del mundo de la interculturalidad humana. Ambos mundos son, principalmente, hipersensibles como formas de comportamiento complejo con que se manifiesta lo real en la realidad.

La incompletitud de todo sistema de conocimiento, al hacer el estudio de la problemática de un sistema complejo, en cualquiera de sus niveles, conduce a pensar y plantear, evitando el criterio reduccionista, la necesidad de investigar metodológicamente una problemática considerando el contorno contextual que lo constituye. Las redes de relaciones e interconexiones, entre los sistemas de una complejidad, de los subsistemas de un sistema y del sistema con otros sistemas, manifiesta la intrincada naturaleza de interacción perpetua entre las partes del todo.

Así como los componentes internos de un sistema complejo se encuentran en permanente interrelación, el sistema de sistemas de conocimiento se intrincan para enriquecer la interpretación de la complejidad de lo real. Es así que el pensamiento complejo se constituye como el principal factor de aglutinamiento de los modos simplificados y simplificadores del pensar disciplinario, para trascenderlos, proponiendo conceptos y categorías, aparentemente “nuevas”, de entendimiento de lo complejo: autoorganización, complementariedad, reciprocidad, equivalencialidad. Es decir, se legitima la necesidad

de un enfoque transdisciplinario del conocimiento para la obtención de la totalidad del fenómeno en estudio como consecuencia del reconocimiento de las propiedades de un sistema complejo, que se constituyen como producto de las multivariadas interrelaciones e interconexiones entre los elementos del sistema, a través de las llamadas propiedades emergentes.

En mérito al intrincamiento entre los sistemas de conocimiento para entender la complejidad, los métodos utilizados en la física estadística y la lógica de la teoría cuántica relativos a los sistemas físicos pueden ser aplicados en un sistema dinámico cultural donde los componentes son agentes culturales considerados como elementos complejos provistos de atributos culturales que interactúan entre sí de acuerdo al grado de afinidad de sus rasgos culturales.

El presente proyecto construye una metodología de medida de la intensidad de la interculturalidad y sus consecuencias a través de la Entropía que es una categoría de la física estadística, puesto que este sistema de conocimientos involucra conceptos, leyes y variables físicas que se relacionan con el comportamiento de sistemas de muchos elementos interactuantes, los cuales presentan relaciones entre variables físicas que podrían presentar comportamiento análogo con las propiedades de una red intercultural de muchos agentes en su contexto global complejo.

La necesidad de entender la evolución espacio-temporal de la diversidad cultural generada por la interacción de agentes culturales de una red cultural en el comportamiento de su dinámica humana, implica distintos sistemas de observación del fenómeno dinámico de carácter complejo en su comportamiento, en este caso concreto, la de la diversidad cultural que se asocia con el concepto de entropía como forma de su medida.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

La construcción de un método desde los conceptos físicos para la interpretación de la evolución dinámica de un sistema intercultural, contribuirá a tener una mirada compleja y no simplemente aditiva, y/o reduccionista, del problema propuesto, enriqueciendo la forma de interpretarlo.

El desarrollo de esta propuesta permitirá proporcionar una herramienta que contribuirá a una complejización, más que cuantitativa, cualitativa de la dinámica de los sistemas interculturales.

La tendencia transformadora del pensamiento complejo transdisciplinario, permite entender que en la dinámica compleja se encuentra encubierta la lógica de la naturaleza hipersensible del mundo cuántico, por tanto la dinámica de un sistema intercultural se desenvuelve bajo la lógica cuántica.

En este proyecto se aplica la entropía de Boltzmann en la medida de la diversidad cultural en la dinámica de un sistema intercultural generada por la interacción de agentes provistos de atributos y rasgos culturales, puesto que las distintas configuraciones de microestados en la dinámica cultural determinan el grado de diversidad cultural en que se encuentra el sistema.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

a. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la posibilidad de aplicar la entropía de Boltzmann a la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado.

b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer una dependencia entre el número de rasgos culturales y la transición de fase del sistema.
- Mostrar una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. BASES TEÓRICAS

Esta sección se ha dividido en dos grupos: conceptos antropológicos y conceptos físicos y matemáticos, los cuales representan el punto de partida.

2.1.1. Conceptos antropológicos.

En esta sección se plantean conceptos que nos permitan entender el modo en que el ser humano construye su cultura, y las costumbres y creencias que difieren de una sociedad a otra, como manifestaciones de la existencia colectiva interactuante humana y por tanto compleja.

2.1.1.1. Antropología

La Antropología es el estudio de la humanidad como un complejo de interacciones humanas que no sólo se reducen a las relaciones sociales de dominación modernas sino que se extiende a las relaciones comunitarias, de los pueblos pre-modernos y modernos y de sus culturas de vida del pasado y del presente, y su proyección al futuro (Marvin Harris, 2017).

El rasgo distintivo de la Antropología es su carácter global, cualitativo, comparativo, complejo de las interacciones humanas llamada interculturalidad.

2.1.1.2. Sociología

La Sociología es la ciencia social que se encarga del análisis científico de la sociedad humana a través de la medida de parámetros o atributos de una sociedad. Estudia los fenómenos colectivos producidos por la actividad social de los seres humanos, dentro del contexto histórico-cultural en el que se encuentran inmersos, producto de sus interacciones.

Hace uso de relaciones matemáticas y estadísticas que son las herramientas para convertir los hechos observados en modelos y generar a partir de ellos saberes. Aunque la Estadística se haya aplicado progresivamente en diferentes ciencias, su descubrimiento se produjo inicialmente en el dominio de las Ciencias Sociales, puesto que, la Estadística aplicada a la Sociología es el único modo de reconocer las regularidades sociales.

Sin embargo, los hechos o fenómenos sociales son complejos, puesto que la vida está condicionada por las prácticas culturales, condiciones económicas, organizacionales, institucionales, etc. La Sociología enfoca los problemas sociales utilizando abstracciones matemáticas y permite importar a las ciencias sociales modelos de relación entre variables que se han desarrollado en otras ciencias como la Física Estadística ofreciendo de esta manera nuevas posibilidades de explicación de los fenómenos sociales y enriqueciendo el conjunto de saberes para investigar la realidad social.

Según Max Weber considerado el padre de la Sociología, la Sociología es una ciencia que busca comprender la acción social para explicar su curso y sus efectos mediante la interpretación. Esta acción social se entiende como aquella que se orienta hacia la acción de otros y que se ajusta a ella. La acción social toma en cuenta las acciones y reacciones de otros individuos del grupo (Weber, 1992).

2.1.1.3. Sociedad

La sociedad constituye el grupo de personas que se fundamenta en las relaciones sociales de dominación que se originan con la modernización, que comparten un hábitat común: la ciudad y que dependen unos de otros para su sobrevivencia y bienestar a través de sus

relaciones sociales de clases producto de sus interacciones **homogeneizadoras** dentro de un sistema social (Marx, 2002).

2.1.1.4. Comunidad humana

Según el Filósofo Argentino Ernesto Laclau, la comunidad humana representa al grupo de sujetos históricos que se fundamenta en las relaciones de equivalencialidad, reciprocidad y complementariedad; los cuales se manifiestan en las interacciones que comparten intereses comunes **autoorganizativos** (Laclau, 2005).

Según el Filósofo Enrique Dussel, el modo de ser del ser humano es la comunidad humana.

2.1.1.5. Cultura

Conjunto de experiencias aprendidas que se traducen en tradiciones y estilos de vida, humanamente asimilados y legitimados por los miembros de una sociedad, incluyendo sus modos pautados y repetitivos de pensar, sentir y actuar (es decir, su conducta). Esta definición sigue el precedente sentado por sir Edward Burnett Tylor, fundador de la antropología académica y autor del primer libro de texto de antropología general.

La cultura en su sentido etnográfico, es ese todo complejo que comprende conocimientos, creencias, arte, moral, derecho, costumbres, y cualesquiera otras capacidades y hábitos adquiridos por el hombre en tanto que miembro de la sociedad y/o de la comunidad humana.

Ninguna cultura constituye un lugar privilegiado desde donde se puedan juzgar las demás culturas, es decir, no existe una centralidad cultural en el tiempo. Cada cultura es la

actualización de la capacidad del ser humano en algún lugar de la tierra y en algún momento de la historia a través de los procesos interculturales de-constructivos.

La cultura se la puede entender como un conjunto de parámetros a través de atributos y rasgos culturales de la población, que se encuentran en la memoria histórica contenida en el inconsciente humano (Freud), los cuales determinan la forma de cómo interactuamos.

Una noción de cultura asociada al sujeto histórico se relaciona con la forma específica de desenvolvimiento práctico y técnico en su dinámica existencial, la que se encuentra inherentemente atada a su memoria histórica almacenada en lo que se conoce como el inconsciente. La forma cultural específica del sujeto histórico puede determinarse por medio de la especificidad de rasgos culturales que se manifiestan en cada campo del desenvolvimiento humano.

Según Julian Haynes Steward, (1902-1972), antropólogo y arqueólogo Estadounidense, la cultura está en relación directa con la forma y los medios para transformar energía.

2.1.2. Conceptos físicos y matemáticos

2.1.2.1. Sociofísica

Rama de la física interdisciplinaria que aplica métodos y conceptos de la Física a los sistemas complejos que se consideran en el estudio de la dinámica humana en sociedades y comunidades interactuantes con propiedades emergentes.

El campo de la Sociofísica emerge en los años 70 con un escaso conglomerado de artículos en un ambiente hostil de la comunidad de físicos. Comenzó a atraer el interés de algunos físicos a principios de los años noventa y en los 15 años siguientes el número de físicos

interesados en este campo tomó un gran auge. Ahora es un reconocido campo de la física emparentado con la física estadística. Este campo ha prosperado y se ha expandido con una gran cantidad de artículos en importantes publicaciones y revistas de física (Galam, 2008).

Tiene una gran influencia por su actualidad en la vida, donde por ejemplo, las redes sociales se han convertido en espacios emergentes de interacción, muchas veces de manipulación y dominación de la conducta humana.

La física estadística estudia el comportamiento de sistemas físicos, compuestos por muchos elementos, que interactúan entre sí. La sociología, por su parte, estudia el comportamiento de las personas en interacción como un colectivo, formando una compleja red de interacciones sociales. Por esta razón es posible estudiar los sistemas sociológicos interactuantes sobre redes con morfologías análogas a las distribuciones sociales utilizando los instrumentos de la física estadística.

2.1.2.2. Tabla de verdad

Una tabla de verdad es una herramienta que se utiliza en sistemas digitales para describir cómo la salida de un circuito lógico depende de los niveles lógicos presentes en las entradas. A la izquierda se enumeran todas las combinaciones de las entradas, y a la derecha se muestra la salida(s) del circuito. En general, el número de combinaciones para una tabla de verdad de n entradas es igual a 2^n . La base 2 hace referencia al hecho de que cada entrada toma dos posibles valores, en este caso 0 ó 1. Por ejemplo, para una tabla de verdad de 2 entradas, el número de combinaciones es $2^2=4$; para una tabla de verdad de tres entradas, el número de combinaciones es $2^3=8$; para una tabla de verdad de cuatro entradas, el número de combinaciones es $2^4=16$; y así sucesivamente. La figura 3 muestra tablas de verdad para 2, 3 y

4 variables en la entrada, sin embargo la salida no se utiliza como tal, debido a que solo se recoge la forma de como se construye esta lógica, donde las variables representarían los atributos culturales y los posibles valores que toman cada atributo vendrían a ser los rasgos culturales.

Figura 3

Tablas de verdad

| X | Y | F |
|---|---|---|
| 0 | 0 | |
| 0 | 1 | |
| 1 | 0 | |
| 1 | 1 | |

| X | Y | Z | F |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | |
| 0 | 0 | 1 | |
| 0 | 1 | 0 | |
| 0 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 0 | |
| 1 | 0 | 1 | |
| 1 | 1 | 0 | |
| 1 | 1 | 1 | |

| X | Y | Z | W | F |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | |

Nota. Combinación de 2, 3 y 4 variables. Elaboración propia.

Si las entradas toman más de dos posibles valores, entonces en ese caso irá cambiando la base a partir de 3, 4, 5, ... , etc; y con la misma lógica se irá construyendo todas las combinaciones posibles de acuerdo al número de variables y los posibles valores que tomen dichas variables.

Esta lógica permite encontrar todas las posibles configuraciones de los microestados culturales que se producen con los atributos y rasgos culturales que se asigne a cada sujeto cultural.

2.1.2.3. Elementos de la teoría de la probabilidad

2.1.2.3.1 Permutación

Una permutación es una disposición de un conjunto de N objetos tomando en cuenta el orden en que son dispuestos.

Dado N objetos distintos se puede construir $N!$ permutaciones distintas que contengan todos los objetos.

A la pregunta ¿cuántas permutaciones se pueden realizar con las cinco vocales?

El número de permutaciones o palabras que se pueden formar con las cinco vocales es igual a 120 que procede del factorial de cinco, es decir, aeiou, aioue, ..., etc.

Si se quiere formar subconjuntos de menos objetos, $R < N$, entonces se puede construir

$\frac{N!}{(N-R)!}$ maneras distintas.

Si se toma $R=3$ vocales del conjunto de $N=5$, entonces se puede formar

$\frac{5!}{(5-3)!} = 60$ permutaciones o palabras distintas, es decir, aeo, aiu, ..., etc; en cada palabra no se repiten las vocales.

2.1.2.3.2 Combinación

Una combinación es una disposición de un conjunto de objetos sin importar su orden.

Dado N objetos se puede construir sólo una combinación que contenga todos los objetos sin importar el orden.

Si se quiere formar subconjuntos de menos objetos, $R < N$, entonces se puede formar

$\frac{N!}{(N-R)!R!}$ combinaciones o palabras sin considerar el orden.

Si se toma $R=3$ vocales del conjunto de $N=5$ vocales, entonces se obtiene

$\frac{5!}{(5-3)!3!} = 10$ subconjuntos del tipo aeo, iua, etc, dentro de este conjunto de combinaciones no se toma en cuenta eoa, eao, oae, puesto que se refiere a la misma combinación o configuración, no importa el orden en que se encuentren.

Si consideramos un conjunto de N objetos distintos a repartir en R cajas, entonces se puede colocar n_1 objetos en la primera caja, n_2 objetos en la segunda caja, n_3 objetos en la tercera caja, etc; sin que importe el orden dentro de cada caja, donde $N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_R$ en el cual los valores $n_1, n_2, n_3, \dots, n_R$ están prefijados, el número de maneras diferentes de repartir

los N objetos en las R cajas es igual a $\frac{N!}{n_1! n_2! n_3! \dots n_R!}$

Estos conceptos matemáticos permiten construir el puente entre el número de microestados culturales en una red y la entropía de Boltzmann que mide la diversidad cultural de la red.

2.1.2.4. La lógica de la teoría cuántica

Si bien, el fundamento de la lógica deductiva se encuentra en los axiomas aristotélicos:

1. Lo que es, es
2. Lo que no es, no es
3. No existe una tercera posibilidad

esta forma lógica de enfocar el entendimiento de lo real en la realidad, por sentido común, conlleva a un determinismo absoluto en la interpretación de los fenómenos.

Sin embargo, el carácter **hipersensible** con el que se desenvuelve la complejidad de la dinámica de los fenómenos, materiales e inmateriales, cuestiona la comprensión de éstos a través de la lógica aristotélica puesto que contienen indeterminaciones que muy bien pueden ser comprendidos a través del axioma del **tercero incluido** (Lupasco, 1963), el cual muestra que la realidad se presenta como una superposición de posibilidades no sólo inconexas sino también cuánticamente conexas.

Esta forma que se observa en los fenómenos cuánticos, también se manifiesta en el ámbito del comportamiento de la dinámica cultural, donde las consecuencias de la interacción humana siempre están sujetas a procesos de indeterminación los cuales no se limitan a probabilidades de carácter clásico sino de carácter cuántico, es decir, probabilidades que presentan un nivel de coherencia.

2.1.2.5. Energía

Siempre que se produce un proceso éste manifiesta la alteración de alguna de sus propiedades del sistema que experimenta dicho proceso, una forma de expresar esta variación es a través del concepto de cambio de estado. Sin embargo, solo es posible este cambio de estado si y solo si se producen intercambios energéticos. Por tanto, se puede entender a la energía como la **capacidad de transformación**, que potencialmente manifiesta la existencia de la interconectividad del mundo complejo que tienen los sistemas sea físico, biológico, químico, intercultural, etc. Es una forma de entender la dinámica del mundo en constante interacción.

En este entender, la energía es una propiedad inherente al proceso de interacción del sujeto histórico con su entorno, que le permite interactuar, ubicarse y determinar su cultura a través de los procesos de intercambio de la capacidad de transformación que produce la interculturalidad.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Sistemas complejos

Son sistemas de elementos interactivos cuyos comportamientos colectivos no se derivan a partir de la suma del comportamiento de cada elemento que lo constituyen, es decir, no son

reducibles. Las propiedades emergentes, son atributos del sistema que no se aprecian en los individuos o poblaciones componentes, y se hacen evidentes únicamente como resultado de la interacción de todos sus componentes, su totalidad. Por ejemplo: el cuerpo humano, cuya emergencia es la vida.

Haciendo referencia a este concepto, el sistema de agentes culturales es un sistema complejo en su dinámica interactuante, cuya emergencia se observa en el proceso de investigación de la tesis.

2.2.2. Atributo cultural y Rasgo cultural

Dos términos, atributo y rasgo íntimamente relacionados que se confunden algunas veces. El atributo viene a ser una propiedad de la cultura y el rasgo una manifestación de esa propiedad.

Los rasgos culturales son las unidades mínimas significativas e identificables que constituyen una cultura determinada. Estos elementos son evaluados por sociólogos para determinar diferencias, semejanzas y relaciones dentro de las culturas actuales y a través de la historia de la humanidad.

Los rasgos culturales han sido usados por la antropología como unidades de transmisión, que reflejan de manera concreta una serie de características de comportamiento, individual o grupal, que pueden ser clasificados y agrupados en diferentes niveles o escalas.

Una vez transmitidos de generación en generación, los rasgos culturales sirven como unidades replicables que pueden ser modificadas dentro del repertorio cultural de los hombres, a través de procesos de recombinación, pérdida o alteraciones parciales en el tiempo.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

Gracias a estos procesos, los sujetos culturales desarrollan tradiciones y costumbres que, generalmente, se conservan en el tiempo y ayudan a moldear la identidad de las sociedades.

También funcionan como elementos de identificación entre sujetos que comparten las mismas creencias y valores.

Estos rasgos son los responsables también de cómo los sujetos de una cultura responden y se comportan frente a diferentes temas, eventos, problemas y situaciones en general.

En el sistema de agentes culturales interactuantes se dota de atributos y rasgos culturales a cada elemento del sistema para observar como se difunde la cultura en toda la red cuando interactúan entre ellos.

2.2.3. Modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997)

Robert Axelrod nació el 27 de mayo de 1943 en Estados Unidos, profesor de ciencias políticas y políticas públicas en la Universidad de Michigan.

El modelo de diseminación cultural introducido por Axelrod ha desempeñado un papel importante en la investigación de las dinámicas culturales, despertando interés tanto de los científicos de las ciencias sociales como de los físicos.

Axelrod escribe su artículo haciendo la siguiente pregunta: “if people tend to become more alike in their beliefs, attitudes and behavior when they interact, why do not all differences eventually disappear?” (si las personas tienden a volverse más parecidas en sus creencias, actitudes y comportamientos cuando interactúan, ¿por qué no desaparecen finalmente todas las diferencias?)

Para responder a esta pregunta, Axelrod incluye dos mecanismos que se consideran fundamentales en la comprensión de la dinámica de asimilación y diversidad cultural: la influencia social y la homofilia.

El primero es la tendencia de los sujetos culturales a volverse más similares cuando interactúan y el segundo es la tendencia de los gustos a atraerse entre sí, para que interactúen con mayor frecuencia.

Los científicos sociales esperaban que estos dos mecanismos generaran una dinámica que se reforzara a sí misma y que condujera a una convergencia global hacia una sola cultura, sin embargo, este modelo predice en algunos casos la persistencia de la diversidad cultural.

Desde el punto de vista de los físicos estadísticos, el modelo de Axelrod es una generalización “vectorial” simple y natural de modelos de dinámica de opinión que da lugar a una fenomenología muy rica y no trivial, con un comportamiento genuinamente novedoso. En el modelo, los agentes estacionarios dotados de una cultura o agentes culturales están ubicados en las celdas o nodos de una red cuadrada. La cultura se caracteriza por un conjunto de propiedades, dimensiones o atributos de un agente sujeto a la influencia social, es decir, todo lo que puede ser modificado a través de la interacción con otros agentes. Por ejemplo, religión, idioma, profesión, arte, etc; y por cada atributo hay un conjunto de características o rasgos culturales permitidos que son los valores alternativos que puede tener cada atributo; así si el atributo cultural es idioma, entonces sus rasgos culturales podrían ser español, quechua, aymara, francés, etc. Es decir, los atributos y rasgos culturales modelan las diferentes creencias, actitudes, aptitudes y comportamientos de los agentes o sujetos culturales.

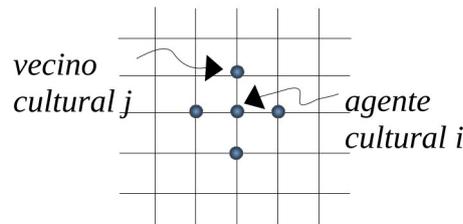
La dinámica de interacción cultural se basa en dos premisas simples que se derivan de diversas observaciones sociológicas empíricas:

1. La probabilidad de interacción entre individuos es proporcional al número de atributos culturales que comparten.
2. La interacción aumenta la similitud cultural entre individuos.

Este modelo se formula considerando un sistema social compuesto por N agentes culturales distribuidos en una red bidimensional espacio-temporal, como muestra la figura 4.

Figura 4

Red bidimensional utilizada en el modelo de Axelrod



Nota. Representación esquemática de un agente cultural con sus cuatro vecinos más próximos.

Elaboración propia.

El estado cultural del i –ésimo agente cultural puede estar representado por un vector de F atributos culturales

$$VC_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{if}, \dots, \sigma_{iF})$$

donde cada atributo σ_{if} puede tomar q valores o rasgos culturales, es decir, $\sigma_{if} \in [0, q - 1]$

En el cual todos los atributos y rasgos se consideran equivalentes.

Se asume que el número de atributos F es el mismo para todos los elementos del sistema y también cada atributo tiene el mismo número de rasgos culturales q .

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

En consecuencia que el sistema tiene un total de q^F microestados culturales equivalentemente posibles en el sistema.

Así, si un sistema está caracterizado por tres atributos y dos rasgos, entonces se dispone de $2^3=8$ vectores o microestados culturales distintos.

Por ejemplo, si imaginamos un sistema constituido por Ingenieros, entonces los vectores culturales podrían estar compuestos por tres atributos $VC_i=(especialidad, religión que profesa, deporte que practica)$ y cada atributo podría tener dos rasgos culturales como sigue:

| Especialidad | Religión que profesa | Deporte que practica |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0: Ing. Mecánico | 0: Católico | 0: Fútbol |
| 1: Ing. Informático | 1: Ateo | 1: Frontón |

En la tabla 1 se aprecia la codificación de estos 8 microestados culturales asignando a cada uno un determinado color:

Tabla 1

Microestados culturales posibles

| σ_{i1} | σ_{i2} | σ_{i3} | Microestados culturales |
|---------------|---------------|---------------|---|
| 0 | 0 | 0 |  |
| 0 | 0 | 1 |  |
| 0 | 1 | 0 |  |
| 0 | 1 | 1 |  |
| 1 | 0 | 0 |  |
| 1 | 0 | 1 |  |
| 1 | 1 | 0 |  |
| 1 | 1 | 1 |  |

Nota. Cada microestado cultural está generado por $F=3$ y $q=2$. *Elaboración propia.*

El modelo de Axelrod es un sistema dinámico espacio-temporal perteneciente a la clase de autómatas celulares; es decir, sistemas con tiempo, espacio y estados discretos.

Se inicia con una distribución aleatoria de los rasgos por atributo en cada agente cultural del sistema.

La dinámica de interacción se define en el siguiente algoritmo:

1. Seleccionar al azar un elemento i en el sistema (elemento activo).
2. Seleccionar al azar un elemento j perteneciente al entorno inmediato del elemento i (elemento pasivo).
3. Calcular la similitud cultural entre los elementos i y j definida por: $l(i, j) = \sum_{f=1}^F \delta_{\sigma_{if}\sigma_{jf}}$,

donde $\delta_{\sigma_{if}\sigma_{jf}} = \begin{cases} 0, & \text{si } \sigma_{if} \neq \sigma_{jf} \\ 1, & \text{si } \sigma_{if} = \sigma_{jf} \end{cases}$ delta de Kronecker

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

4. Si $0 < l(i, j) < F$, los elementos i y j interactúan con una probabilidad $\frac{l(i, j)}{F}$.
5. En caso de interacción, escoger un h al azar tal que $\sigma_{ih} \neq \sigma_{jh}$, y asignar $\sigma_{ih} = \sigma_{jh}$.

Este tipo de comportamiento es típico de sistemas sociales y biológicos, en los cuales el comportamiento colectivo resultante de las interacciones de un sistema es autoorganizado y emergente.

Este modelo planteado por Axelrod es utilizado en la simulación realizada en el presente trabajo de investigación.

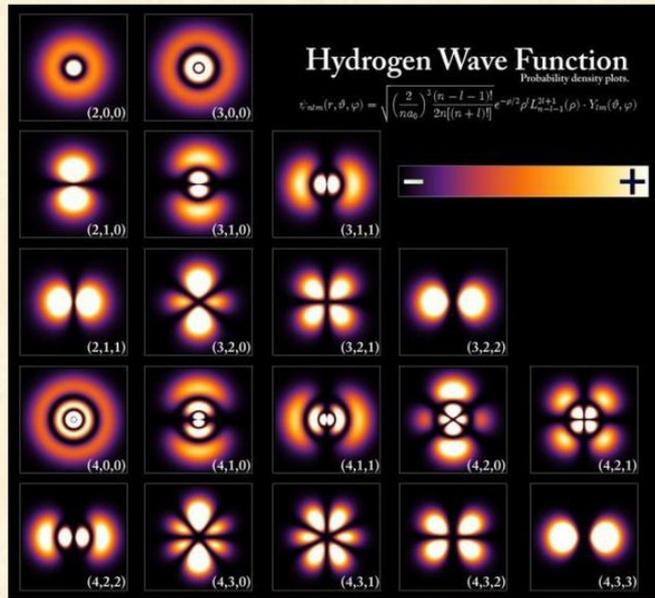
2.2.4. Interacción

Si bien, una idea general de interacción, es la influencia recíproca entre cosas, objetos y/o sujetos que se encuentran en la proximidad uno respecto del otro, el efecto más importante que produce una interacción es el de influir en las propiedades intrínsecas y extrínsecas de los elementos interactuantes.

Por ejemplo, cuando un átomo de hidrógeno es sometido a la interacción con un campo magnético, la función de distribución de la nube electrónica que originalmente era simétrica (esférica) sufre una variación de distribución en el espacio, tal como muestra la figura 5.

Figura 5

Función de onda del átomo de hidrógeno



Nota. Variación de la distribución de la nube electrónica bajo un campo magnético aplicado al átomo de hidrógeno. Fuente Wikipedia.

La metodología que utiliza la física para la representación de la interacción es la energía de interacción llamada también potencial. En la ecuación de Schrödinger

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

es el potencial de interacción $V(\vec{r}, t)$ el que contribuye a dar forma a la función de onda que luego da lugar la función de densidad de probabilidad de distribución espacial de la partícula.

De manera análoga, se puede entender la interacción intercultural entre los sujetos como el proceso por el cual se producen influencias reciprocas en la morfología cultural con la que se manifiestan los sujetos. Entendiendo que, el potencial de interacción intercultural, es una forma

de energía codificada (Basarab, 1996) relacionada con la noción de capacidad de transformación (Mayer, 1842).

2.2.5. Entropía

La entropía y la vida están relacionadas. La entropía como medida de cambio irreversible en el tiempo, como consecuencia de las interacciones que se dan dentro de los sistemas interactuantes, como en un sistema sociofísico, o en la expansión de un gas; el concepto de entropía está relacionado formalmente con el desorden, puesto que en un proceso espontáneo la información del sistema va cambiando y el sistema evoluciona hacia un mayor desorden.

Sin embargo, la entropía también está relacionada con la diversidad de microestados de un sistema, producido por el gran número de partículas que tiene el sistema.

La razón por la cual la variación de entropía se relaciona con el grado de desorden de un sistema es porque ésta mide el crecimiento del número de microestados diferentes que constituyen el sistema.

Sin embargo, se puede caracterizar a la entropía de una forma distinta al caos, confusión, desorden o dispersión. La entropía como propiedad emergente de un sistema complejo se puede entender, transdisciplinariamente, como la diversidad de un sistema a través de otros campos de conocimiento como el sociológico, antropológico, biológico, etc.

Para la obtención de propiedades macroscópicas a partir de propiedades microscópicas de un sistema se hace uso de las técnicas que utiliza la Física Estadística.

Es así como a partir de la física estadística obtendremos la entropía para un sistema dinámico cultural donde sus componentes que son denominados agentes culturales interactuarán intercambiando información cultural.

Para ello consideraremos los microestados culturales de un sistema intercultural análogos a los estados de energía de un sistema cuántico y los agentes culturales análogos a las partículas del sistema, donde el número de agentes permanece constante durante las interacciones que ocurren dentro del sistema.

Para lo cual debemos considerar todos los microestados culturales son igualmente accesibles para los agentes culturales del sistema (equiprobabilidad), y la probabilidad de una partición determinada es proporcional al número de maneras diferentes en que los microestados culturales pueden distribuirse en la red.

El número total de microestados culturales está relacionado con el espacio de estados que se obtiene a partir de considerar la combinación de cierto número de atributos y rasgos culturales.

Si el sistema intercultural está compuesto de N agentes culturales, entonces el número de agentes por cada microestado, producto de sus interacciones, viene a ser

n_1, n_2, n_3, \dots , donde $N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$, donde n_i es el número de agentes culturales que están en el i -ésimo microestado i .

El número total de modos diferentes distinguibles para obtener la partición n_1, n_2, n_3, \dots , es: $P = \frac{N!}{n_1! n_2! n_3! \dots}$ y la probabilidad de obtener esa partición es proporcional a P .

Para que permanezca cada agente en un microestado cultural o cambie de microestado debe interactuar con su vecino más próximo, distribuido en una red cultural. Esta interacción proviene de la intención de interacción del agente con otro.

Si el sistema está en equilibrio estadístico, es decir, si la probabilidad de obtener esa partición es máxima, entonces la entropía S que es una propiedad de estado del sistema es directamente proporcional al logaritmo de la probabilidad P : $S \sim \ln P$. Sin embargo, esta metodología de cálculo del desorden se puede utilizar como instrumento de medida de la diversidad para sistemas abiertos que no están en equilibrio.

2.2.6. Entropía de Boltzmann

Si bien es cierto que la entropía de Boltzmann fue construida desde el desarrollo teórico de los sistemas cerrados y en equilibrio, su contenido abarca interpretaciones que exceden la conceptualización de la entropía dentro del campo de la física como caos, desorden y sirve como un instrumento que mide el grado de diversidad cultural de los grupos humanos en sus constantes e inevitables procesos de interculturalidad.

La entropía de Boltzmann es una medida del número de formas en que los estados culturales de un sistema pueden distribuirse en la red para una configuración determinada de microestados culturales.

2.2.7. Grados de libertad

La confluencia de las dimensiones de los rasgos y atributos definen los grados de libertad cultural del sistema.

Es decir, la combinación adecuada del número de atributos N_a y el número de rasgos culturales N_r forman todas las posibilidades de la producción de microestados. La dimensión del espacio de estados es el número de grados de libertad dado por:

$$N_r^{N_a}.$$

2.2.8. Transición de fase

Físicamente, una transición de fase ocurre cuando hay un cambio abrupto en alguna propiedad estructural física, por ejemplo, cuando se rompen los enlaces que se producen entre los elementos de un sistema.

Este concepto físico se puede aplicar adecuadamente al cambio de fase que se produce desde la homogeneidad a la heterogeneidad cultural del sistema.

2.2.9 Autómata celular

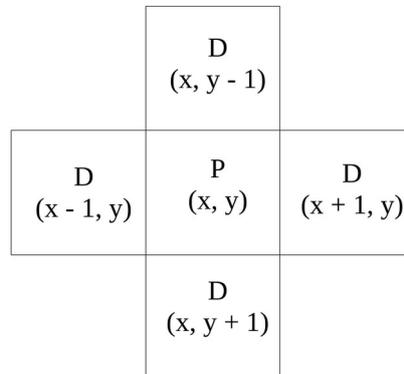
Es un modelo matemático y computacional para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas que pueden ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúan localmente unos con otros.

2.2.10. Vecindad de Von Neumann

En la teoría de autómatas celulares, el concepto de vecindad de Von Neumann se define como el conjunto de las cuatro celdas que rodean ortogonalmente a una celda central en un enrejado cuadrado bidimensional, condición necesaria de continuidad, figura 6.

Figura 6

Vecindad de Von Neumann de la celda central



Nota. Cuatro celdas vecinas a la celda central. Fuente Wikipedia.

2.2.11. Grilla espacial (red, rejilla, entramado, cuadrícula)

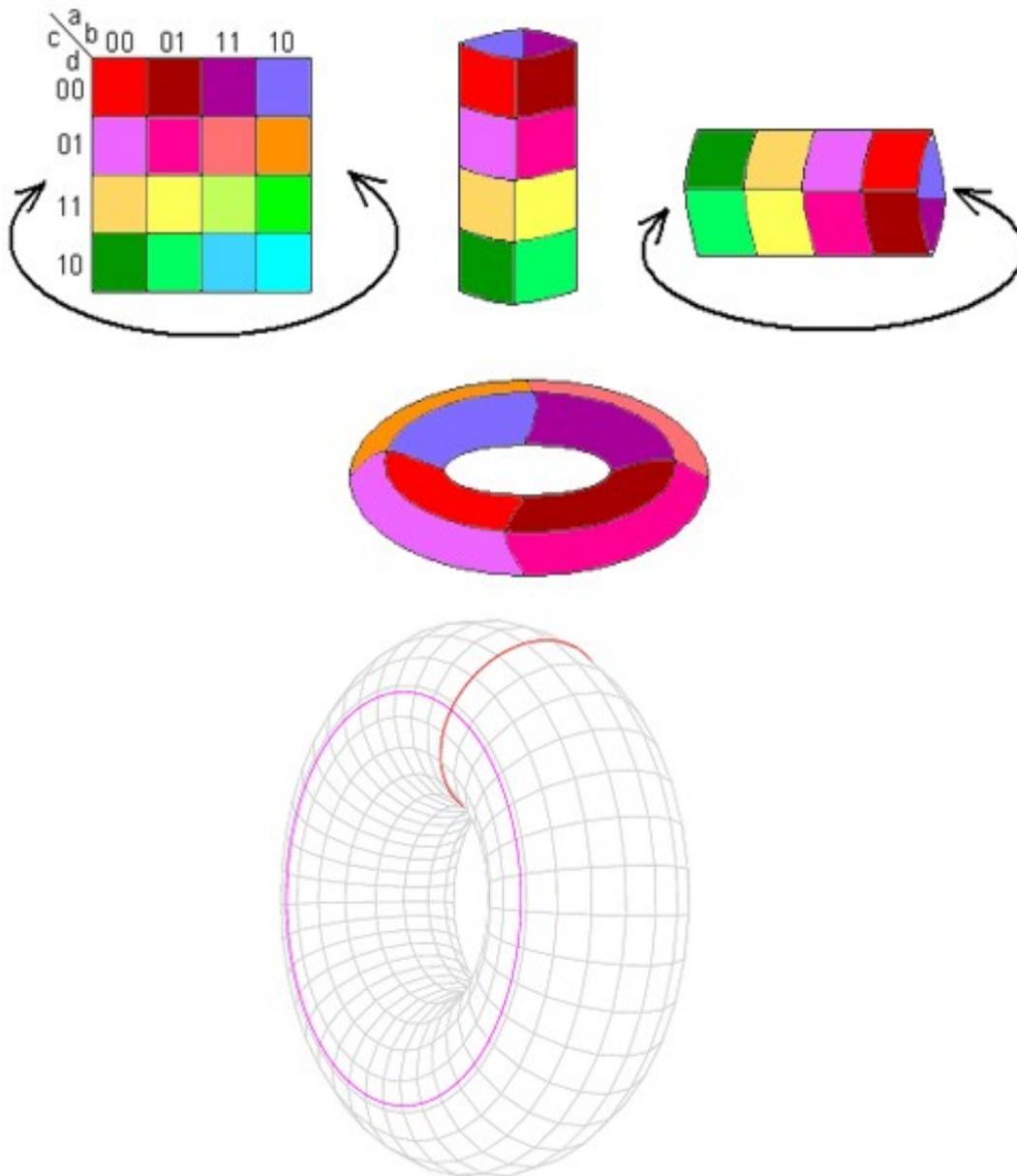
Es una distribución de elementos geométricos que divide un espacio bidimensional en partes regulares. Cada agente se coloca en los vértices de la rejilla. Asimismo, cada vértice puede tener asociadas determinadas propiedades. Existen numerosos usos y diferentes formatos de las rejillas espaciales: cuadradas, rectangulares, triangulares y otras más complicadas, elaboradas, fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Grilla_espacial].

2.2.12. Condición de contorno periódica

La necesidad de garantizar la existencia de la interacción continua de cada agente cultural con sus cuatro primeros vecinos implica la construcción de un mapeo desde un plano rectangular hacia un toroide. De esta manera se garantiza las condiciones de contorno periódicas, figura 7.

Figura 7

Red toroidal



Nota. Todas las celdas tienen cuatro celdas vecinas más próximas. Fuente Wikipedia.

2.2.13. Riqueza cultural

La multiplicidad de microestados culturales está relacionada con el producto de espacios culturales llamados atributos que en cada uno de ellos se subtiende un espacio compuesto por rasgos culturales, produciendo una multidimensionalidad cultural de microestados. El grado de esta multidimensionalidad cultural es la riqueza cultural de cada agente.

2.2.14. Diversidad cultural

La distribución de microestados culturales del espacio muestral en la red se encuentra en relación con la diversidad cultural a través de la entropía de Boltzmann.

2.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE)

En la presente investigación se realizó un estudio bibliográfico de proyectos y/o trabajos sobre esta temática, obteniéndose los siguientes resultados:

2.3.1. The Dissemination of Culture. R. Axelrod. Published 1 April

1997. Sociology. Journal of Conflict Resolution

Abstract. Despite tendencies toward convergence, differences between individuals and groups continue to exist in beliefs, attitudes, and behavior. An agent-based adaptive model reveals the effects of a mechanism of convergent social influence. The actors are placed at fixed sites. The basic premise is that the more similar an actor is to a neighbor, the more likely that that actor will adopt one of the neighbor's traits. Unlike previous models of social influence or cultural change that treat features, the model illustrates

how local convergence can generate global polarization. Simulations show that the number of stable homogeneous regions decreases with the number of features, increases with the number of alternative traits per feature, decreases with the range of interaction, and (most surprisingly) decreases when the geographic territory grows beyond a certain size.

La difusión de la cultura. R. Axelrod. Publicado el 1 de abril de 1997. Sociología. Revista de Resolución de Conflictos

Resumen. A pesar de las tendencias hacia la convergencia, las diferencias entre individuos y grupos continúan existiendo en creencias, actitudes y comportamiento. Un modelo adaptativo basado en agentes revela los efectos de un mecanismo de influencia social convergente. Los actores se colocan en sitios fijos. La premisa básica es que cuanto más parecido es un actor a un vecino, más probable es que ese actor adopte uno de los rasgos del vecino. A diferencia de los modelos anteriores de influencia social o cambio cultural que tratan rasgos, el modelo ilustra cómo la convergencia local puede generar una polarización global. Las simulaciones muestran que la cantidad de regiones homogéneas estables disminuye con la cantidad de características, aumenta con la cantidad de características alternativas por característica, disminuye con el rango de interacción y (lo más sorprendente) disminuye cuando el territorio geográfico crece más allá de cierto tamaño.

2.3.2. Intracultural diversity in a model of social dynamics A.

Parravano, H. Rivera-Ramirez, and M. G. Cosenza Centro de

Física Fundamental, Facultad de Ciencias, Universidad de Los

Andes, Apartado Postal 26 La Hechicera, Mérida, Mérida 5251,

Venezuela, 12 Diciembre 2006.

Abstract. We study the consequences of introducing individual nonconformity in social interactions, based on Axelrod’s model for the dissemination of culture. A constraint on the number of situations in which interaction may take place is introduced in order to lift the unavoidable homogeneity present in the final configurations arising in Axelrod’s related models. The inclusion of this constraint leads to the occurrence of complex patterns of intracultural diversity whose statistical properties and spatial distribution are characterized by means of the concepts of cultural affinity and cultural cline. It is found that the relevant quantity that determines the properties of intracultural diversity is given by the fraction of cultural features that characterizes the cultural nonconformity of individuals.

Key words: Social dynamics; Cultural diversity.

La diversidad intracultural en un modelo de dinámica social.

Resumen. Estudiamos las consecuencias de introducir el inconformismo individual en las interacciones sociales, basándonos en el modelo de difusión de la cultura de Axelrod. Se introduce una restricción sobre el número de situaciones en las que puede tener lugar la interacción para levantar la inevitable homogeneidad presente en las configuraciones finales que surgen en los modelos relacionados al de Axelrod. La inclusión de esta restricción conduce a la ocurrencia de patrones complejos de diversidad intracultural

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

cuyas propiedades estadísticas y distribución espacial se caracterizan por medio de los conceptos de afinidad cultural y gradiente cultural. Se encuentra que la cantidad relevante que determina las propiedades de la diversidad intracultural está dada por la fracción de rasgos culturales que caracteriza la inconformidad cultural de los individuos.

Conclusión

El modelo que aquí se presenta puede ser útil para describir la aparición de gradientes culturales como dialectos, costumbres gastronómicas, etc., en áreas geográficas. En el contexto biológico, este modelo también se puede adaptar al estudio de clines fenotípicas. Por ejemplo, se ha propuesto que la evolución de las preferencias de apareamiento de las hembras puede amplificar en gran medida la variación geográfica a gran escala en los caracteres sexuales secundarios masculinos y producir un aislamiento reproductivo generalizado sin discontinuidad geográfica.

2.3.3. Statistical physics of social dynamics

Claudio Castellano *

SMC, INFN-CNR and Dipartimento di Fisica, “Sapienza” Università di Roma,
Piazzale A. Moro 2, 00185 Roma I-ITALY

Santo Fortunato †

Complex Networks Lagrange Laboratory, ISI Foundation, Viale S. Severo 65, 10133,
Torino, I-ITALY

Vittorio Loreto ‡

Dipartimento di Fisica, “Sapienza” Università di Roma and SMC, INFN-CNR, Piazzale A. Moro 2, 00185 Roma I-ITALY and Complex Networks Lagrange Laboratory, ISI Foundation, Viale S. Severo 65, 10133, Torino, I-ITALY, 11 Mayo 2009.

Contents:

| | |
|----------------------------------|-----------|
| IV. CULTURAL DYNAMICS | 24 |
| A. Axelrod model | 24 |
| B. Variants of Axelrod model | 26 |
| C. Other multidimensional models | 27 |

Abstract. Statistical physics has proven to be a very fruitful framework to describe phenomena outside the realm of traditional physics. The last years have witnessed the attempt by physicists to study collective phenomena emerging from the interactions of individuals as elementary units in social structures. Here we review the state of the art by focusing on a wide list of topics ranging from opinion, cultural and language dynamics to crowd behavior, hierarchy formation, human dynamics, social spreading. We highlight the connections between these problems and other, more traditional, topics of statistical physics. We also emphasize the comparison of model results with empirical data from social systems.

Física estadística de la dinámica social

Resumen. La física estadística ha demostrado ser un marco muy fructífero para describir fenómenos fuera del ámbito de la física tradicional. Los últimos años han sido testigos del intento de los físicos de estudiar los fenómenos colectivos que surgen de las interacciones de los individuos como unidades elementales en las estructuras sociales.

Aquí revisamos el estado del arte enfocándonos en una amplia lista de temas que van desde la opinión, la dinámica cultural y del lenguaje hasta el comportamiento de la multitud, la formación de jerarquías, la dinámica humana, la difusión social. Destacamos las conexiones entre estos problemas y otros temas más tradicionales de la física estadística. También enfatizamos la comparación de los resultados del modelo con datos empíricos de los sistemas sociales.

Conclusión. Con esta revisión hicimos un primer intento de resumir las múltiples actividades en el campo de las llamadas dinámicas sociales. Nuestro punto de vista ha sido el de revisar lo que se ha hecho hasta ahora en esta área joven pero en rápida evolución, poniendo el énfasis principal en el enfoque de la física estadística, es decir, en las contribuciones que la comunidad física ha venido brindando a los estudios de orientación social.

Aunque generalmente es muy difícil aislar la contribución de una comunidad dada a un esfuerzo intrínsecamente interdisciplinario, es útil identificar la contribución que la comunidad física ha estado dando y el papel que podría desempeñar en el futuro. En esta perspectiva, está claro cómo el papel de la física estadística en la dinámica social se ha centrado principalmente en el modelado, ya sea mediante la introducción de modelos completamente nuevos para capturar las características principales de una fenomenología determinada o realizando un análisis detallado de modelos ya existentes, centrándose, por ejemplo, en la existencia de transiciones de fase, universalidad, etc.

2.3.4. Statistical mechanics of complex networks

Réka Albert * and Albert-László Barabási

Department of Physics, University of Notre Dame, Notre

Dame, Indiana 46556 (Published 30 January 2002)

Abstract. Complex networks describe a wide range of systems in nature and society. Frequently cited examples include the cell, a network of chemicals linked by chemical reactions, and the Internet, a network of routers and computers connected by physical links. While traditionally these systems have been modeled as random graphs, it is increasingly recognized that the topology and evolution of real networks are governed by robust organizing principles. This article reviews the recent advances in the field of complex networks, focusing on the statistical mechanics of network topology and dynamics. After reviewing the empirical data that motivated the recent interest in networks, the authors discuss the main models and analytical tools, covering random graphs, small-world and scale-free networks, the emerging theory of evolving networks, and the interplay between topology and the network’s robustness against failures and attacks.

Mecánica estadística de redes complejas

Resumen. Las redes complejas describen una amplia gama de sistemas en la naturaleza y la sociedad. Los ejemplos que se citan con frecuencia incluyen la célula, una red de sustancias químicas unidas por reacciones químicas, el Internet, una red de enrutadores y computadoras conectadas por enlaces físicos. Si bien tradicionalmente estos sistemas

se han modelado como grafos aleatorios, se reconoce cada vez más que la topología y la evolución de las redes reales se rigen por principios de organización robustos. Este artículo revisa los avances recientes en el campo de las redes complejas, centrándose en la mecánica estadística de la topología y la dinámica de la red. Después de revisar los datos empíricos que motivaron el interés reciente en las redes, los autores discuten los principales modelos y herramientas analíticas, que cubren gráficos aleatorios, redes de mundo pequeño y libres de escala, la teoría emergente de redes en evolución y la interacción entre la topología y la solidez de la red contra fallas y ataques.

Conclusión. El cambio que hemos experimentado en los últimos tres años en nuestra comprensión de las redes fue rápido e inesperado. Hemos aprendido a través de estudios empíricos, modelos y enfoques analíticos, que las redes reales están lejos de ser aleatorias, sino que muestran principios organizativos genéricos compartidos por sistemas bastante diferentes. Estos avances han creado una prolífica rama de la mecánica estadística, seguida con igual interés por sociólogos, biólogos e informáticos. Nuestro objetivo aquí era resumir, de manera coherente, lo que se conoce hasta ahora. Sin embargo, creemos que estos resultados son solo la punta del iceberg. Hemos descubierto algunos principios topológicos y dinámicos genéricos, pero las respuestas a las preguntas abiertas podrían ocultar nuevos conceptos e ideas que podrían resultar tan interesantes como los que hemos encontrado hasta ahora. El futuro también podría traer nuevas herramientas, como la reciente importación de ideas de la teoría de campo (Burda et al., 2001) y la estadística cuántica (Bianconi, 2000a, 2001; Bianconi y Barabási, 2001b; Zizzi, 2001) indica. En consecuencia, este artículo pretende ser tanto

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

una revisión como un catalizador para futuros avances. Esperamos que domine este último aspecto.

2.3.5. Sociophysics: A review of Galam models

Serge Galam *

Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA),

École Polytechnique and CNRS,

1 Rue Descartes, 75005 Paris, France; 12 Marzo 2008.

Abstract. We review a series of models of sociophysics introduced by Galam and Galam et al in the last 25 years. The models are divided in five different classes, which deal respectively with democratic voting in bottom up hierarchical systems, decision making, fragmentation versus coalitions, terrorism and opinion dynamics. For each class the connexion to the original physical model and technics are outlined underlining both the similarities and the differences. Emphasis is put on the numerous novel and counterintuitive results obtained with respect to the associated social and political framework. Using these models several major real political events were successfully predicted including the victory of the French extreme right party in the 2000 first round of French presidential elections, the voting at fifty - fifty in several democratic countries (Germany, Italy, Mexico), and the victory of the no to the 2005 French referendum on the European constitution. The perspectives and the challenges to make sociophysics a predictive solid field of science are discussed.

Sociofísica: Una revisión de los modelos de Galam

Resumen. Revisamos una serie de modelos de sociofísica introducidos por Galam y Galam et al en los últimos 25 años. Los modelos se dividen en cinco clases diferentes, que tratan respectivamente del voto democrático en sistemas jerárquicos de abajo hacia arriba, toma de decisiones, fragmentación versus coaliciones, terrorismo y dinámica de opinión. Para cada clase, se describe la conexión con el modelo físico original y las técnicas, subrayando tanto las similitudes como las diferencias. Se hace hincapié en los numerosos resultados novedosos y contradictorios obtenidos con respecto al marco social y político asociado. Utilizando estos modelos, se predijeron con éxito varios acontecimientos políticos reales importantes, incluida la victoria del partido de extrema derecha francés en la primera vuelta de las elecciones presidenciales francesas de 2000, la votación al cincuenta por ciento en varios países democráticos (Alemania, Italia, México) y la victoria del no al referéndum francés de 2005 sobre la constitución europea. Se discuten las perspectivas y los desafíos para hacer de la sociofísica un campo predictivo sólido de la ciencia.

Conclusión. Presentamos una descripción esquemática de cinco familias de modelos de Galam y Galam et al desarrollados para abordar diferentes problemas sociales y políticos. El objetivo era reunir por primera vez todas estas obras para permitir una fácil conexión con estas obras. Se puede encontrar un testimonio personal sobre la sociofísica. También vale la pena señalar que la sociofísica ha podido producir nuevos resultados en la física estadística: con Sousa y Malarz, realizando simulaciones de Monte Carlo, descubrimos nuevos resultados asociados con el ferromagneto

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

bidimensional de Ising reorganizado. En esta etapa, el nuevo desafío de la sociofísica es demostrar que puede convertirse en una ciencia predictiva con reglas elementales de comportamiento social y político bien establecidas. La tarea es difícil pero puede lograrse.

2.3.6. Thermodynamics and Statistical mechanics for complex systems-foundations and applications

Constantino Tsallis

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas and National Institute of Science and Technology for Complex Systems

Rua Xavier Sigaud 150, 22290-180 Rio de Janeiro, Brazil and Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, New Mexico 87501, USA (Received April 28, 2015)

Abstract. The complexity (or simplicity) of a system can be characterized through very many paths. A quite interesting and operational one, which we follow here, consists in making use of entropic concepts. The thermodynamical and statistical-mechanical foundations of this approach, as well as its (analytical, computational, observational, and experimental) applications for natural, artificial and social systems will be briefly reviewed.

Termodinámica y Mecánica Estadística para sistemas complejos-fundamentos y aplicaciones

Resumen. La complejidad (o simplicidad) de un sistema se puede caracterizar a través de muchos caminos. Uno bastante interesante y operativo, que seguimos aquí, consiste

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

en hacer uso de conceptos entrópicos. Se revisarán brevemente los fundamentos termodinámicos y mecánico-estadístico de este enfoque, así como sus aplicaciones (analíticas, computacionales, observacionales y experimentales) para sistemas naturales, artificiales y sociales.

Conclusión. El camino lógico que hemos seguido aquí es satisfacer en todos los casos la extensividad de la entropía, ya que esta propiedad es impuesta por la termodinámica clásica. Para los sistemas estándar (esencialmente ergódicos, lo que implica una ocupación del espacio de fase con una medida de Lebesgue distinta de cero), este requisito se satisface mediante el funcional entrópico de Boltzmann-Gibbs, que es aditivo.

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS

a. Hipótesis general

Es posible aplicar la entropía de Boltzmann en el estudio de la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado.

b. Hipótesis específicas

- Existe una forma de dependencia entre el número de rasgos culturales y la transición de fase del sistema.
- Existe una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural.

3.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

| VARIABLES E INDICADORES | | |
|-------------------------|--|---|
| VARIABLES: | | INDICADORES: |
| INDEPENDIENTE | CONFIGURACIÓN DE MICROESTADOS CULTURALES | <ul style="list-style-type: none"> • MICROESTADOS CULTURALES • ENERGÍA • INESTABILIDAD |
| DEPENDIENTE | DIVERSIDAD CULTURAL | <ul style="list-style-type: none"> • ENTROPÍA • TRANSICIÓN DE FASE • ESTABILIDAD |

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1. Introducción

En el presente trabajo de investigación se hace una revisión bibliográfica del campo reciente de la Sociofísica encontrando un modelo basado en autómatas celulares, conocido como el modelo de diseminación cultural de Axelrod, quien propone un conjunto de reglas de difusión cultural.

Fundamentado en este modelo se aplica la entropía de Boltzmann a la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod, respecto de lo cual se desarrolla un programa de simulación para la medida de la variación del grado de diversidad cultural.

Se pretende interpretar, a través de la construcción de un método la diversidad cultural de un sistema intercultural, así como proporcionar una herramienta para un análisis cuantitativo de su dinámica.

En este trabajo se aplica la entropía de Boltzmann a un sistema intercultural, generado por la interacción de agentes provistos de atributos y rasgos culturales, como medida de la diversidad cultural que se produce a partir de la riqueza cultural contenida en cada uno de los agentes del sistema.

En el procedimiento metodológico se utiliza la analogía lógica que se observa entre el comportamiento de los sistemas cuánticos y de los sistemas interculturales donde se combinan conceptos y/o categorías de física teórica con herramientas de simulación computacional, con la finalidad de inducir interacciones entre agentes culturales distribuidos en la red intercultural, manteniendo fijo el número de agentes.

Para lo cual dentro de la construcción metodológica se ha considerado los conceptos y/o categorías siguientes:

4.1.1. Naturaleza compleja de un ente cuántico

La función de onda estacionaria $\psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle$, llamada por Bohr, Kramers y Slater (1924) (De Broglie, 1924) *onda de probabilidad*, se encuentra directamente relacionada con el criterio de realidad espacial del ente cuántico, su forma espacial es descrita por la ecuación estacionaria de Schrödinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + V(\vec{r}) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

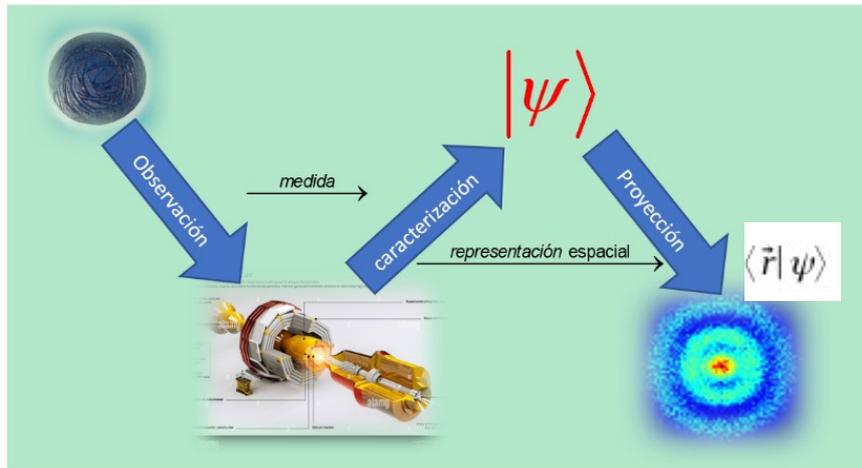
donde

$$\psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle$$

es la representación del estado $|\psi\rangle$ del ente cuántico en el espacio físico (que se encuentra directamente relacionado con la medida de un observable, en este caso, la energía). En otras palabras $\psi(\vec{r})$, es la **proyección** del estado $|\psi\rangle$ sobre el espacio físico XYZ , como se ilustra en la figura 8.

Figura 8

Proceso de interpretación espacial del ente cuántico



Nota. Representación esquemática de la interpretación espacial del ente cuántico.

Elaboración propia.

La función de onda se obtiene al calcular la solución de la ecuación diferencial de Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + V(\vec{r})\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r})$$

En el caso de una partícula constreñida a moverse libremente sobre el eje X se tiene que

$$V(\vec{r})=0, \nabla \vec{r} = x \hat{e}_x$$

Entonces la ecuación de Schrödinger se reduce a la forma siguiente:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) = E\psi(x)$$

La solución general es

$$\psi(x) = A e^{jkx} + B e^{-jkx}$$

$$\psi(x) = (A+B)\cos kx + j(A-B)\sin kx$$

$$\psi(x) = C\cos kx + jD\sin kx \quad (1)$$

donde

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

Esta solución está relacionada con la *forma de la distribución espacial* de la partícula constreñida a moverse libremente sobre el eje X . Sin embargo, si restringimos el movimiento de la partícula a una región limitada del espacio, $0 < x < L$, donde el potencial cumple con la condición

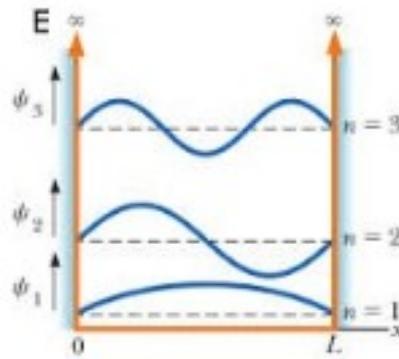
$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 < x < L \\ \infty, & \text{si } x < 0 \text{ y } x > L \end{cases}$$

pozo de potencial infinito, como muestra la figura 9. Al resolver la ecuación de Schrödinger, sujeto a las condiciones de frontera $\psi(x=0) = \psi(x=L) \equiv 0$ se tiene el conjunto de soluciones siguiente:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad n=1,2,3,\dots \quad (2)$$

Figura 9

Pozo de potencial infinito



Nota. Las tres primeras funciones de onda en un pozo de potencial infinito. Fuente Wikipedia.

Para los distintos niveles energéticos asociados a los estados de la ecuación (2), se tiene

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

Estos dos resultados, ecuaciones (1) y (2), expresan las distintas formas que adopta el ente cuántico en el espacio físico XYZ.

Bastan estos ejemplos sencillos pero significativos para observar que la **forma** que adopta la partícula en el espacio físico (que es la representación espacial de la entidad cuántica), es consecuencia de las interacciones que se producen entre la partícula y el entorno donde ella se encuentra, puesto que la forma de su distribución física específica depende de la forma del potencial de interacción $V(x)$, que es parte componente de la ecuación de Schrödinger.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

Por tanto, se puede afirmar que la forma de los entes cuánticos con la cual se los observa en el espacio físico depende de las propiedades extrínsecas relativas a la interacción de la entidad cuántica con su entorno, figura 10.

Pero, además depende de sus propiedades intrínsecas, puesto que, por medio de las propiedades inherentes al ente cuántico se producen las interacciones con su entorno. Por tanto, *la forma espacial del ente cuántico contenida en $\psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle$ no sólo depende de las propiedades intrínsecas $\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2$ sino además de las propiedades extrínsecas $V(\vec{r})$ del ente cuántico.*

Figura 10

Distribución del átomo de hidrógeno en el espacio físico



Nota. Imagen del átomo de hidrógeno en el espacio físico. Fuente Wikipedia.

De forma análoga se puede hacer una interpretación del estado $|\psi\rangle$, el cual se encuentra directamente relacionado con la medida de un observable relativo al ente cuántico, por decir, su energía.

La ecuación que nos permite hallar los valores propios de la energía está relacionada con la ecuación de valores y estados propios

$$\hat{H}|\psi_i\rangle = E_i|\psi_i\rangle$$

donde $|\psi_i\rangle$ son los estados propios de \hat{H} .

Por otro lado, se sabe que cualquier estado arbitrario es una combinación lineal de sus estados propios

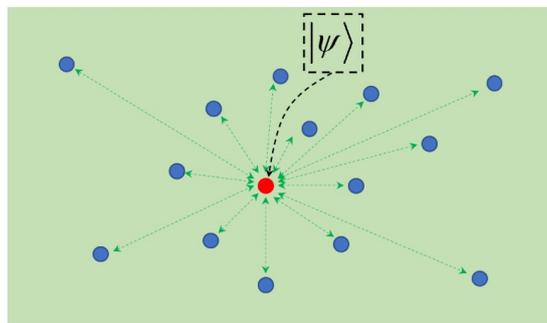
$$|\psi\rangle = \sum_i C_i |\psi_i\rangle$$

donde C_i son los llamados coeficientes de amplitud de probabilidad.

En tal caso, podemos afirmar que la forma del estado $|\psi\rangle$ (donde la medida relativa a este estado depende de la forma del entorno y de las propiedades físicas del ente cuántico) depende de sus propiedades intrínsecas y extrínsecas, una imagen visual de esta idea se muestra en la figura 11.

Figura 11

Interacción de la partícula con su entorno

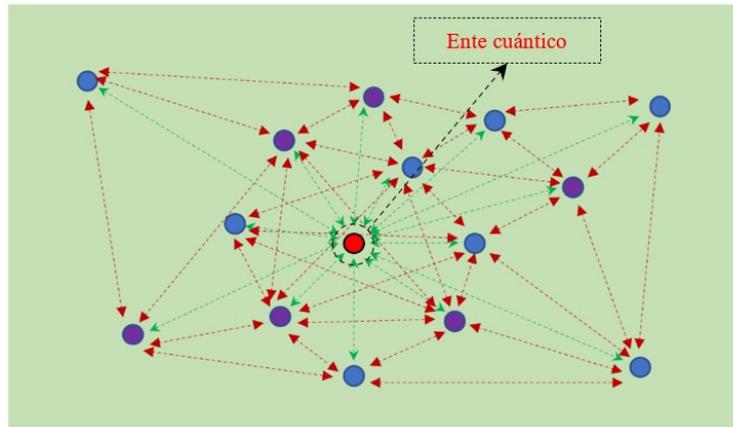


Nota. Representación esquemática del ente cuántico con su entorno. Elaboración propia.

Por otra parte, en general, los entes físicos que representan el entorno son diversos (en calidad y en cantidad), este entorno puede ser un aparato de medida. Así como los elementos del entorno interactúan con el ente cuántico también interactúan entre ellos, tal como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Interacción compleja de la partícula con su entorno y entre las partículas del entorno



Nota. Representación esquemática de la interacción del ente cuántico con su entorno y entre los entes cuánticos del entorno. Elaboración propia.

Si comprendemos a las propiedades intrínsecas de la partícula como los atributos físicos propios de la partícula (por ejemplo: espín, cantidad de movimiento angular, energía cinética, etc), y por otra parte, las propiedades extrínsecas como las diversas formas de influencia del entorno sobre la partícula, entonces el estado $|\psi\rangle$ de la partícula puede entenderse como el resultado de un entrelazamiento de las propiedades intrínsecas y extrínsecas que, como información, contiene el estado $|\psi\rangle$.

Sin pérdida de generalidad y con la intención de facilitar la comprensión, podemos considerar estados relativos a un ente físico, cuyo proceso de medida define un espacio vectorial V de dimensión igual a 2, donde los estados propios del ente cuántico se representan como $\{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle\}$ correspondientes a los valores propios $\{E_1, E_2\}$, respectivamente.

La independencia de los estados $|\psi_1\rangle$ y $|\psi_2\rangle$ se pueden representar como

$$\langle \psi_i | \psi_j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

Las propiedades intrínsecas del ente cuántico se encuentran contenidas en sus estados propios $\{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle\}$ mientras que las propiedades extrínsecas, en los coeficientes de amplitud de probabilidad $\{C_1, C_2\}$. Por tanto, es posible representar al estado de la partícula como una superposición

$$|\psi\rangle = C_1 |\psi_1\rangle + C_2 |\psi_2\rangle$$

Sin embargo, el mundo interactuante del entorno de la partícula correlaciona los coeficientes de amplitud de probabilidad C_1 y C_2 , produciendo una coherencia cuántica entre los coeficientes. Uno de los recursos matemáticos útiles para la descripción de esta correlación son los números complejos

$$C_1 = c_1 e^{j\theta_1}$$

$$C_2 = c_2 e^{j\theta_2}$$

Entonces

$$|\psi\rangle = c_1 e^{j\theta_1} |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta_2} |\psi_2\rangle$$

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

$$|\psi\rangle = e^{j\theta_1} (c_1 |\psi_1\rangle + c_2 e^{j(\theta_2 - \theta_1)} |\psi_2\rangle)$$

$$|\psi\rangle = e^{j\theta_1} (c_1 |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta} |\psi_2\rangle)$$

donde $\theta = \theta_2 - \theta_1$

El modo de realidad cuántica identifica a la familia de estados con la misma dirección (paralelos) como un rayo el cual corresponde a un mismo estado, es decir que los estados (Preskill, 2015)

$$|\psi'\rangle = c_1 e^{j\theta_1} |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta_2} |\psi_2\rangle$$

$$|\psi''\rangle = e^{j\theta_1} (c_1 |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta} |\psi_2\rangle)$$

$$|\psi'''\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta} |\psi_2\rangle$$

contienen la misma información puesto que son paralelos, por tanto, el estado

$$|\psi\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta} |\psi_2\rangle$$

donde

$$c_1^2 + c_2^2 = 1, c_1, c_2 \in \mathbb{R}$$

podemos considerar como la representación primaria, básica del estado del ente cuántico.

Entonces, *la coherencia cuántica que existe entre los coeficientes de amplitud de probabilidad C_1 y C_2 se encuentra en el factor de fase θ* . Esta fase θ contiene las formas de interconexión que existen entre los distintos elementos (● y ●) que representan la complejidad dinámica en la que se encuentra el entorno, figura 12.

Si consideramos al entorno como un aparato de medida, se podría concluir que la medida es el resultado de la interacción del ente cuántico con un entorno altamente ordenado no complejo pero si complicado (laboratorio).

Por tanto, se puede entender que la realidad de un ente cuántico tiene un carácter complejo.

Esta interpretación de la naturaleza y carácter complejos de los entes cuánticos desde la lógica de la teoría cuántica es compartida por la complejidad de la dinámica cultural, entendida como la forma práctica de manifestación del sujeto histórico que es determinada a partir de su memoria histórica almacenada en su inconsciente (propiedad intrínseca) que aflora a través de su consciente (propiedad extrínseca) cuando escoge un rasgo cultural específico para un determinado atributo cultural como consecuencia de la interacción con su entorno.

Un microestado cultural puede ser modelado por un objeto matemático de la forma

$$(a_1, a_2, \dots, a_n)$$

donde a_i : representa el i-ésimo atributo cultural

Sin embargo, cada atributo cultural existe en una superposición de rasgos culturales antes de su determinación, como muestra la lógica cuántica.

Por ejemplo: si a_2 representa al atributo cultural: *tipo de lectura que el sujeto cultural acostumbra*, entonces, antes de la determinación de este atributo, a_2 se encuentra en una superposición coherente de posibilidades, por decir, se encuentra en las posibilidades de que los tipos de lectura sean: literatura, ciencia ficción, textos universitarios, revistas deportivas, etc., entonces, es posible representar al atributo a_2 de forma análoga a un estado cuántico

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

$$a_2 = \sum_k C_k r_{2k}$$

donde

r_{21} : literatura

r_{22} : ciencia ficción

r_{23} : textos universitarios

r_{24} : revistas deportivas

etc.

entonces el vector cultural, antes de ser determinado, se puede expresar de la siguiente manera

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) \rightarrow \left(\sum_i C_{1i} r_{1i}, \sum_j C_{2j} r_{2j}, \dots, \sum_m C_{nm} r_{nm} \right)$$

Dado el grado de complejidad multidimensional con el que se presenta el espacio muestral de microestados culturales, en general, la medida de un atributo a_i produce indeterminación en los otros atributos a_j .

En primera aproximación, podemos considerar a los elementos del conjunto de atributos culturales $\{a_k\}$ independientes unos de otros, de tal manera que cada conjunto de estados base $\{r_{kj}\}$ representan espacios vectoriales independientes.

Bajo esta condición (en primera aproximación) es posible considerar la determinación de un microestado cultural a través de un vector donde los atributos son caracterizados, cada uno, por un rasgo cultural específico, por decir

$$(r_{13}, r_{21}, \dots, r_{n5})$$

Este proceso se puede entender, desde el principio cuántico del colapso de la función de onda, en la forma siguiente

$$\sum_i C_{1i} r_{1i} \longrightarrow r_{13}$$

$$\sum_j C_{2j} r_{2j} \longrightarrow r_{21}$$

·
·
·

$$\sum_m C_{nm} r_{nm} \longrightarrow r_{n5}$$

Con el fin de aclarar esta construcción lógica tomemos un ejemplo: consideremos un estado cultural definido por tres atributos culturales

a_1 : religión que profesa el sujeto cultural

a_2 : deporte que practica el sujeto cultural

a_3 : bebida que consume el sujeto cultural

cada atributo se manifiesta en una superposición de un conjunto de posibilidades, que son los correspondientes rasgos culturales

$$a_1 = \begin{cases} r_{11}: & \text{Mahometano} \\ r_{12}: & \text{Católico} \\ r_{13}: & \text{ateo} \end{cases}$$

$$a_2 = \begin{cases} r_{21}: & \text{fútbol} \\ r_{22}: & \text{vóley} \\ r_{23}: & \text{natación} \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} r_{31}: & \text{cerveza} \\ r_{32}: & \text{café} \\ r_{33}: & \text{té} \end{cases}$$

La complejidad de la interacción cultural del sujeto con su entorno *determina* la forma específica que toma el microestado cultural del sujeto, es decir, cada atributo cultural “colapsa” en una de sus posibilidades cuánticas para cada campo o dimensión cultural, por ejemplo

$$(r_{13}, r_{21}, r_{32}) \rightarrow (\text{ateo}, \text{fútbol}, \text{café})$$

4.1.2. Analogía de la Naturaleza hipersensible de los entes cuánticos y de la dinámica cultural

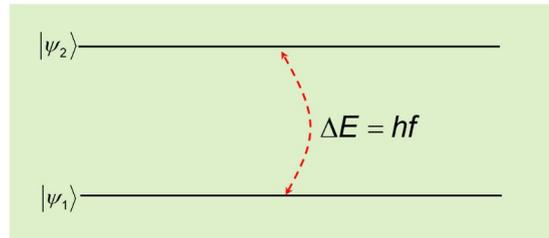
Sin pérdida de generalidad, consideremos un espacio vectorial V bidimensional, cuyos vectores unitarios ortogonales asociados son los estados propios $\{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle\}$ que reproducen todo vector V en la forma

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2 e^{j\theta}|\psi_2\rangle$$

La dinámica del ente cuántico estará constreñida a los dos estados, como muestra la figura 13.

Figura 13

Niveles asociados a los estados



Nota. Representación esquemática de los niveles de estado que constriñen la dinámica del ente cuántico. Elaboración propia.

Los saltos de estado se producen con la absorción o emisión de un fotón de energía

$$\Delta E = h\nu = \hbar\omega$$

donde

$$h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

es la constante de Planck y ν es la frecuencia del fotón.

En el extremo superior de frecuencias de la radiación electromagnética se encuentran los rayos gamma cuyas frecuencias son del orden de 10^{22} Hz , por tanto, se puede afirmar que los fotones energéticamente más robustos manifiestan un salto energético del orden de

$$\Delta E \sim 10^{-12} \text{ J} = 0,000000000001 \text{ J}$$

Si entendemos la energía como la *capacidad de transformación de estado* (relativos a los saltos cuánticos desde $|\psi_1\rangle$ hacia $|\psi_2\rangle$, y viceversa) se puede afirmar, desde el valor máximo del quantum de energía, el carácter *hipersensible* de los sistemas cuánticos en relación a la

capacidad de transformación de estados (de energía). Ya que los fotones más robustos energéticamente, que producen saltos de estados cuánticos, muestran el alto grado de *pequeñez* desde el cual se producen los fenómenos cuánticos.

Roger Penrose afirma:

*El nivel cuántico es el nivel de las moléculas, átomos, partículas subatómicas, etc. Normalmente se suele pensar que es un nivel de fenómenos de “muy pequeña” escala, pero esta “pequeñez” no se refiere en realidad al tamaño físico. Veremos que los efectos cuánticos pueden ocurrir sobre distancias de muchos metros, o incluso años-luz. **Estaría mucho mas cerca de la realidad pensar que algo está “en el nivel cuántico” si implica solo diferencias muy pequeñas de energía.***
(Penrose, 2020, pág. 347)

Esta afirmación manifiesta el carácter hipersensible del mundo cuántico.

Una forma de expresar el concepto de energía, que enriquece su entendimiento, es aquella que nos permite entenderla como la **capacidad de producir transformaciones**.

Cuando consideramos el trabajo mecánico, como una forma de energía, esta categoría física esta relacionada con el **cambio y/o transformación del estado mecánico** (\vec{r}, \vec{p}) , el cual se evidencia cuando existe una variación de la cantidad de movimiento $\Delta \vec{p}$ y/o cambio de la posición $\Delta \vec{r}$. Si extendemos este concepto al campo de la teoría cuántica se evidencia que el agente transformador de los estados cuánticos es el quantum de energía (fotón). El cual, tiene un valor considerablemente pequeño (hipersensibilidad) como se mostró anteriormente.

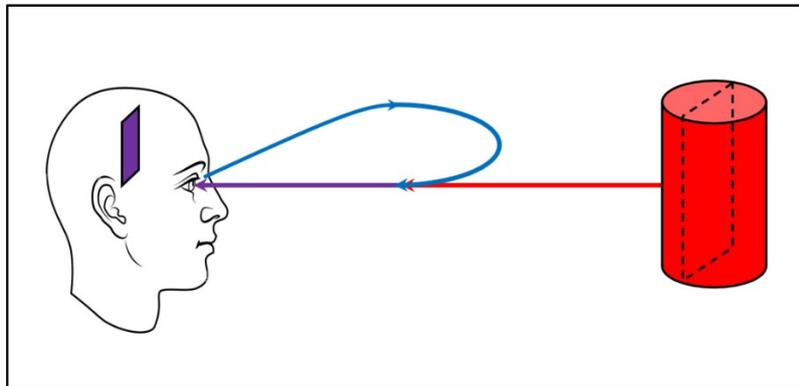
Análogamente, se puede observar la hipersensibilidad en la dinámica cultural de sujetos. Los cambios que sufren los microestados culturales de los sujetos son de extrema sensibilidad frente a las interacciones que ejerce el sujeto cultural con su entorno subjetivo y material. En otras palabras, una característica central de la interculturalidad es la *hipersensibilidad* a las influencias entre sujetos culturales.

4.1.3. Naturaleza relacional como el contenido de realidad.

El concepto de realidad del mundo cuántico tiene una naturaleza relacional, es decir, respecto de qué se define realidad. El ente cuántico *real* es *realidad* en tanto se manifiesta a través de una relación con su entorno que lo observa, éste entorno *asiste* en la construcción de realidad del ente, y en este entorno está lo humano de la realidad construida no sólo desde una espacialidad física y una temporalidad sino a través de su cultura que se transfigura y se mezcla en la materialidad del dispositivo de medida (laboratorio) que le permite establecer un resultado cultural respecto de un observable asociado al ente cuántico para darle realidad (Heisenberg, 1958).

Figura 14

Constructo cultural



Nota. Representación esquemática de lo real en la realidad. Elaboración propia.

La realidad es una construcción que realiza el sujeto histórico desde su cultura, y es la subjetividad del sujeto cultural la que determina el tipo y forma de objetividad respecto de lo que observa, esta afirmación legitima la necesidad de considerar la metodología transdisciplinaria como la forma coherente de determinar objetividad, figura 14.

4.2. Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es de naturaleza transdisciplinaria (Lupasco, 1963) debido a que se hace el estudio de la dinámica cultural de agentes basado en el modelo de Axelrod aplicando la entropía de Boltzmann.

El nivel de investigación es de carácter exploratorio y correlacional puesto que se realiza un programa de simulación de interacción intercultural de agentes dotados, cada uno, con microestados culturales iniciales aleatorios distribuidos aleatoriamente sobre una red toroidal.

El lenguaje de programación utilizado para realizar esta simulación es el RStudio de uso libre, que es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráfica. Incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el tratado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo.

4.3. Construcción del algoritmo de simulación en base al modelo de Axelrod

Las dinámicas culturales así como las dinámicas cuánticas son procesos que se manifiestan bajo la misma lógica, debido a la hipersensibilidad con que se manifiestan las influencias entre sujetos culturales, por tanto son susceptibles de ser modeladas y simuladas a través de algoritmos matemáticos similares.

Axelrod plantea un modelo para el estudio de la diseminación cultural sobre un conjunto de agentes contiguos espacialmente, cuyos parámetros del sistema influyen en la evolución del sistema hacia una monoculturalidad o hacia una multiculturalidad (gran número de configuraciones culturales).

Dada la complejidad de la multidimensionalidad cultural de los agentes culturales en el proceso de interculturalidad, asumimos, en primera aproximación, que todos los agentes culturales comparten la misma dimensión para cada vector, denotado por F , y cada atributo tiene la misma dimensión de rasgos, denotado por q . La cultura del agente está representada por un vector cultural de F variables, en el que cada variable toma un valor entero dentro del rango $[0, q - 1]$.

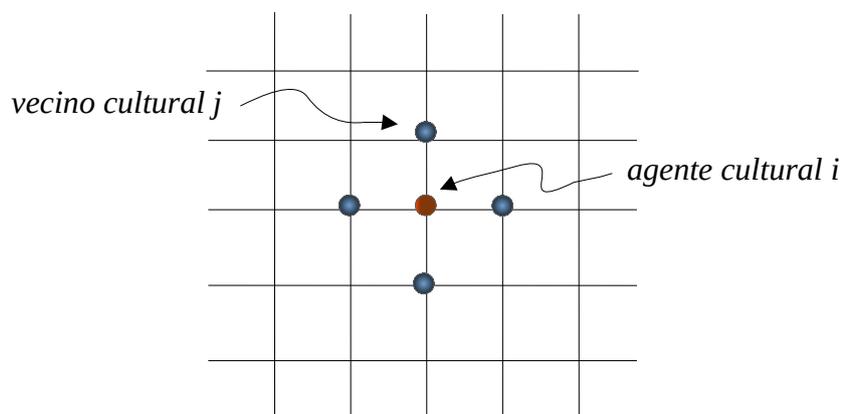
A los agentes culturales se les asigna aleatoriamente una determinada cultura inicial manteniendo la misma cantidad de atributos y rasgos culturales por agente.

La dinámica cultural del sistema, en el modelo de Axelrod, evoluciona de la siguiente manera:

- Se selecciona aleatoriamente un agente cultural i y del mismo modo se selecciona uno de sus cuatro primeros vecinos, denominado agente cultural j , figura 15. Los agentes i y j interactúan con una probabilidad proporcional a su similitud cultural. El proceso de simulación consiste en que el agente i selecciona aleatoriamente uno de los atributos en el que los dos agentes difieren de rasgo, y con la probabilidad que depende de la similitud, cambia su rasgo al del agente j , o viceversa.

Figura 15

Primeros cuatro vecinos del agente cultural



Nota. Representación esquemática de los cuatro vecinos culturales del agente cultural.

Elaboración propia.

- El algoritmo de simulación se construye a partir de las siguientes reglas:
 1. Se selecciona al azar un agente i de la red.
 2. Se selecciona al azar uno de sus primeros cuatro vecinos de la red, llamado vecino j .

3. Se calcula la similitud cultural entre el agente i y el vecino j , definida por:

$l(i, j) = \sum_{f=1}^F \delta_{\sigma_{if}\sigma_{jf}}$, donde $\delta_{\sigma_{if}\sigma_{jf}}$ es el símbolo delta de Kronecker donde σ_{if} : f-ésimo atributo cultural del i-ésimo agente, y σ_{jf} : f-ésimo atributo cultural del j-ésimo vecino.

4. Si $0 < l(i, j) < F$, entonces los elementos i y j interactúan con una probabilidad $\frac{l(i, j)}{F}$.

5. En caso de interacción, se escoge uno de los atributos al azar, denotado por h , tal que $\sigma_{ih} \neq \sigma_{jh}$ y se asigna $\sigma_{ih} \rightarrow \sigma_{jh}$ ó $\sigma_{jh} \rightarrow \sigma_{ih}$.

- El proceso descrito anteriormente continúa hasta que el valor de la entropía de Boltzmann se estabiliza. Esto sucede cuando el sistema tiende a que cada par de agentes vecinos elegidos al azar tengan culturas idénticas o totalmente diferentes, en otras palabras, cuando la similitud: $l \rightarrow F$ ó $l \rightarrow 0$, respectivamente.

Axelrod, abstrae el concepto de cultura a través de un vector, denominado *vector cultural* VC asociado a cada agente cultural:

$$VC_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{if}, \dots, \sigma_{iF}),$$

donde σ_{if} es el f -ésimo atributo cultural del i -ésimo agente cultural, donde $1 \leq f \leq F$.

Por ejemplo, dentro del conjunto de atributos para los agentes, el f -ésimo atributo puede ser oficio ocupacional del i -ésimo agente cultural donde F es el número de componentes del vector cultural, equivalente al número de atributos, que se relaciona con la *riqueza cultural* del sujeto.

Cada atributo cultural σ_{if} del VC_i es determinado por uno de los q rasgos culturales dentro del intervalo $[0, q - 1]$ con $q \in \mathbb{Z}$.

Por decir,

$$\sigma_{if} = [\text{costurera}(0), \text{ebanista}(1), \dots, \text{carpintero}(m), \dots, \text{joyero}(q-1)]$$

El valor q está directamente relacionado con la *idea de riqueza cultural* de los atributos que contiene el sujeto cultural.

El espacio muestral esta compuesto por el número total de vectores culturales distintos q^F , en el cual se considera todas las combinaciones posibles de los rasgos culturales correspondientes a los atributos culturales. Supongamos que consideramos $F=3$ y $q=2$, entonces hay $2^3=8$ vectores culturales distintos del espacio de estados.

Por ejemplo: Si consideramos tres atributos y dos rasgos culturales de una comunidad altoandina, el vector cultural del i -ésimo sujeto cultural estará dado por: $VC_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{i3})$,

donde

$$\sigma_{i1}(\text{idioma}) = [\text{Quechua}(0), \text{Aymara}(1)],$$

$$\sigma_{i2}(\text{bebida}) = [\text{chicha}(0), \text{mate}(1)] \text{ y}$$

$$\sigma_{i3}(\text{cultivo}) = [\text{papa}(0), \text{oca}(1)]$$

Los 8 vectores culturales distintos, que definen el espacio de estados, vienen a ser:

$$(\text{Quechua}, \text{chicha}, \text{papa}),$$

$$(\text{Quechua}, \text{chicha}, \text{oca}),$$

$$(\text{Quechua}, \text{mate}, \text{papa}),$$

(*Quechua , mate , oca*),

(*Aymara , chicha , papa*),

(*Aymara , chicha , oca*),

(*Aymara , mate , papa*) y

(*Aymara , mate , oca*)

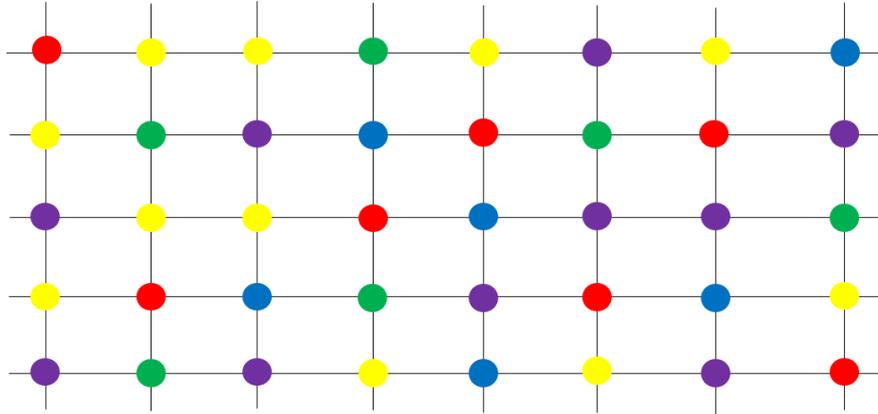
En primera aproximación asumimos que las interacciones mas intensas que produce el sujeto cultural i son aquellas que establece con uno de sus cuatro primeros vecinos más cercanos j (norte, sur, este y oeste); y a partir de estas interacciones se modela los procesos de interacción cultural:

El modelo de Axelrod simula un *sistema dinámico espacio-temporal* perteneciente a la clase de AUTÓMATAS CELULARES (*sistemas de elementos con tiempo, espacio y estados discretos*).

Se inicia con una distribución cuyos rasgos por atributo son definidos aleatoriamente a cada elemento del sistema, que vienen a ser los microestados culturales por agente. En la figura 16, cada círculo de color ubicado en los vértices de la red representa a un vector cultural, los cuales se pueden repetir o no, incluso algún vector cultural, del espacio de estados, puede no encontrarse en la red debido a que la distribución es aleatoria.

Figura 16

Distribución de los distintos vectores culturales.



Nota. Representación esquemática de la distribución de los vectores culturales representados por colores. Elaboración propia.

Naturalmente se debe ubicar la posición del agente cultural el cual es ubicado aleatoriamente, y su respectivo vector cultural también es establecido aleatoriamente. Si la posición del agente cultural en el instante t , es $\vec{r}(t)$, entonces el vector cultural correspondiente es $VC(\vec{r}, t)$, también es llamado *microestado* cultural.

4.3.1. Algoritmo aplicado

En el modelo de Axelrod se dispone de una red cuadrada plana cuyos nodos o vértices están ocupados por agentes culturales, de tal manera que en la frontera de la red cuadrada se reduce la cantidad de interacciones, sin embargo, con el fin de superar esta limitación, las fronteras paralelas del sistema cuadrado se acercan produciendo una red toroidal cuyo tamaño

varía de acuerdo al número de agentes culturales $N = N_x \times N_y$, con la finalidad de que cada agente pueda interactuar con cualquiera de sus primeros cuatro vecinos.

Un paso de tiempo está definido por la interacción que se produce entre vecinos del sistema y está determinado por los siguientes procesos:

1. Se selecciona al azar un sujeto cultural i en el sistema.
2. A continuación se selecciona al vecino j de uno de los primeros cuatro vecinos más cercanos al sujeto cultural i , ubicados en la red.
3. Se determina la similitud cultural entre el agente i y el vecino j . Para lo cual se comparan los vectores culturales de los dos agentes y se obtiene el número de atributos culturales en los cuales coinciden ambos (cai : cantidad de atributos culturales iguales).
4. Si $0 < cai < F$, entonces se calcula la probabilidad de interacción, $P_{inter} = \frac{cai}{F}$.
5. Se elige al azar la probabilidad de intención de cambio P_{ic} .
6. Si $P_{inter} > P_{ic}$, entonces ninguno de los dos cambia, caso contrario cambia el valor del atributo de uno de los dos, el cual también se elige aleatoriamente.
7. En caso de cambio, se escoge al azar un atributo h tal que $\sigma_{ih} \neq \sigma_{jh}$ y se asigna $\sigma_{ih} \rightarrow \sigma_{jh}$ ó

$\sigma_{jh} \rightarrow \sigma_{ih}$.

Los pasos 5, 6 y 7 son los cambios que se está proponiendo en el algoritmo original.

Ejemplo de la dinámica de interacción en el modelo de Axelrod: Asumamos que los vectores culturales de los sujetos i y j tienen un rasgo en común, en este caso el primer atributo

cultural de los vectores culturales: $VC(i)=(1,2,1)$ y $VC(j)=(1,1,2)$, entonces su similitud cultural es uno y la probabilidad de interacción es $1/3$; por consiguiente, con esa misma probabilidad podrán compartir otro rasgo cultural.

4.3.2. Uso pertinente de la entropía de Boltzmann en la medida de la diversidad de un sistema intercultural

Candace Pert, neurobióloga mundialmente reconocida, afirma: *tu mente está en todas las células de tu cuerpo*. Esta afirmación es equivalente con el concepto que se ha construido sobre *autoorganización cultural*, en el sentido siguiente: si la mente está en todas las células, entonces se piensa con todo el cuerpo, por tanto la mayor intensidad del pensar no se reduce a la centralidad de un solo órgano sino que es la forma de interacción con su entorno, del cuerpo como sistema abierto, la que hará que un determinado órgano del conjunto de órganos manifieste una disposición de centralidad.

Por ejemplo, si se siente frío la capacidad de transformación (energía) estará fluyendo en mayor cantidad hacia el órgano de mayor actividad que podría ser el corazón, fluyendo, en menor medida, hacia otros órganos que necesariamente tienen que seguir funcionando para consolidar el funcionamiento del corazón. Una vez que se ha calentado adecuadamente el cuerpo, puede ser que la centralidad en la intensidad de funcionamiento sea la piel humana para expeler calor, y así, sucesivamente, continua con una dinámica de centralidad fluctuante en el funcionamiento de los órganos o subsistemas que componen un sistema complejo dependiendo de las condiciones de contorno abierto fluctuante, puesto que dicha dinámica de la centralidad no obedece a un proceso ordenado, ni siquiera, en el mejor de los casos, cíclico.

Al contrario, esta dinámica de centralización orgánica responde a una *dinámica de-constructiva y de-structiva* en el sentido que la determinación de la centralidad orgánica, destruye la centralidad anterior para establecer una nueva centralidad sin un orden preestablecido, solo respondiendo a las motivaciones que genera el entorno complejo sobre el cuerpo complejo, que si bien es estable no se encuentra en equilibrio puesto que su dinámica no establece una función de distribución de probabilidad.

A su vez, esta dinámica de la materialidad biológica descrita es análoga a la dinámica cultural, induce a construir una hermenéutica de la dinámica cultural compleja la cual es representada adecuadamente, en su totalidad, por la diversidad cultural del sistema, que es apropiadamente descrita por la entropía de Boltzmann.

En este sentido la riqueza contenida en el vector cultural, trasciende como diversidad cultural de la totalidad del sistema, la cual es medida apropiadamente por medio de la entropía de Boltzmann como parámetro principal de medida de la diversidad cultural a partir de la configuración de los distintos vectores culturales que la producen.

Si consideramos que los microestados culturales se distribuyen sobre los vértices de una red cuadrada, podemos representar cada uno de los distintos microestados a través de distintos colores, como muestra el gráfico 16. Así, se puede ver que la distribución de los vectores culturales tiene una distribución compleja producto de la permanente interacción de los sujetos interculturales que no se reduce sólo a la cantidad de interacciones entre vecinos sino a la calidad que contienen las interacciones en el grado de afinidad.

Lo complejo no significa aleatoriedad, porque lo aleatorio induciría a una falta de explicación o ignorancia del propio fenómeno de la dinámica cultural que y como se sabe está basada en una intensa interacción no sólo de carácter cuantitativo sino cualitativo.

Las distancias espaciales definidas por las aristas de la red no sólo se reducen a una espacialidad física, sino que pueden significar, por ejemplo: relaciones laborales, en general relaciones de proximidad de distintos tipos. Por tanto, es irrelevante el agrupamiento físico espacial de algún estado cultural específico que se ha supuesto en algunos trabajos precedentes respecto a la dinámica cultural (*Parravano, 2013*).

Si tenemos una red rectangular de $N_x \times N_y$, donde por ejemplo: $N_x=8$ y $N_y=5$ como muestra la figura 16, tendremos una distribución de microestados cuyas tasas definirán la concentración de estos estados en la red

$n_1=7$ cantidad de estados rojos

$n_2=11$ cantidad de estados amarillos

$n_3=6$ cantidad de estados verdes

$n_4=10$ cantidad de estados violetas

$n_5=6$ cantidad de estados azules

donde

$$N_x \times N_y = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$$

Entonces, el número de distribuciones distintas que pueden configurar estas cantidades de estados n_1, n_2, n_3, n_4 y n_5 es igual a

$$\Omega = \frac{(N_x \times N_y)!}{n_1! n_2! n_3! n_4! n_5!}$$

en virtud de la teoría de combinación desarrollada como elemento de la teoría de probabilidad.

Donde el número Ω está relacionado con el grado de diversidad cultural que tiene determinada distribución de microestados n_1, n_2, n_3, n_4 y n_5 .

Muchas veces, $N_x \times N_y$ es un número grande, por tanto, es preferible trabajar en una escala que haga posible representar a los números grandes con números pequeños. Una forma de conseguir números pequeños es calculando el logaritmo de los números grandes. Entonces, en lugar de trabajar con Ω se trabaja con $\ln \Omega$.

Por otra parte, si bien se tiene dentro de la Física una idea negativa de la entropía relacionándola con el concepto del desorden, en el contexto de la dinámica cultural estudiada en el presente trabajo de investigación, la medida de la entropía tiene una directa relación con el grado de diversidad cultural que no necesariamente tiene un correlato con el concepto de desorden. Por tanto, utilizamos la entropía de Boltzmann para el cálculo de la diversidad cultural, que se constituye como una propiedad emergente del sistema intercultural

$$S \sim \ln \Omega$$

asumiendo la constante de proporcionalidad igual a 1

$$S = \ln \frac{(N_x \times N_y)!}{n_1! n_2! n_3! n_4! n_5!}$$

aplicando logaritmo al cociente, se tiene

$$S = \ln(N_x \times N_y)! - \ln(n_1! n_2! n_3! \dots)$$

aplicando logaritmo al producto

$$S = \ln(N_x \times N_y)! - \{\ln(n_1!) + \ln(n_2!) + \ln(n_3!) + \dots\}$$

si los números involucrados son valores grandes, entonces se aplica la fórmula de Stirling dado por:

$$\ln(p!) \approx p \ln p - p$$

lo que implica que

$$S = (N_x \times N_y) \ln(N_x \times N_y) - (N_x \times N_y) - \{n_1 \ln(n_1) - n_1 + n_2 \ln(n_2) - n_2 + n_3 \ln(n_3) - n_3 + \dots\}$$

agrupando n_1, n_2, n_3, \dots

$$S = (N_x \times N_y) \ln(N_x \times N_y) - (N_x \times N_y) + (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) - \{n_1 \ln(n_1) + n_2 \ln(n_2) + n_3 \ln(n_3) + \dots\}$$

y considerando que $N_x \times N_y = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$

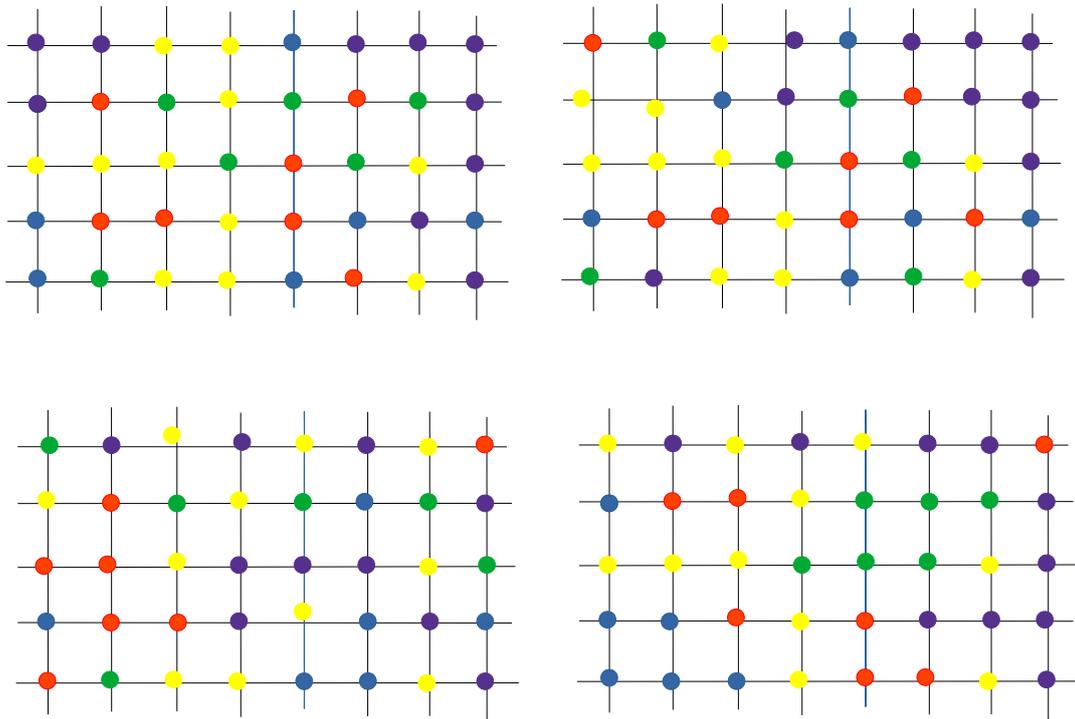
se obtiene

$$S = (N_x \times N_y) \ln(N_x \times N_y) - \{n_1 \ln(n_1) + n_2 \ln(n_2) + n_3 \ln(n_3) + \dots\}$$

por tanto, la entropía aplicada en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado es:

$$S = (N_x \times N_y) \ln(N_x \times N_y) - \sum_i^{q^F} n_i \ln(n_i)$$

Lo que se observa con los datos obtenidos es que existe una directa correlación entre la entropía de Boltzmann aplicada al sistema dinámico cultural y la diversidad cultural; sin embargo, en la entropía de Boltzmann no se considera las distintas distribuciones de los microestados culturales bajo las mismas tasas de concentración de estados que establecen formas distintas de interacción.



Las cuatro distribuciones de microestados culturales mostrados en la figura, son indistinguibles al momento de hacer el cálculo de la entropía de Boltzmann. Sin embargo, el modelo de Axelrod es sensible a la cultura del vecino en el sentido de que hace la distinción entre los microestados interactuantes al momento de medir la similitud cultural, el cual es distinto para las diferentes configuraciones incluso con las mismas tasas en la distribución de microestados.

Por lo que el modelo de Axelrod con la aplicación de la entropía de Boltzmann se complementan, no existiendo limitación metodológica en ese sentido.

Es decir, el cálculo de la entropía respecto de la configuración de microestados culturales por medio de la entropía de Boltzmann nos permite establecer una relación directa entre el valor del grado de la diversidad cultural de la población total considerada con la entropía.

Sí, por ejemplo, en la dinámica cultural se logra una configuración donde todos los sujetos culturales tienen distintos microestados culturales, entonces su entropía para 20 agentes culturales interactuantes es

$$S = \ln\left(\frac{20!}{1!}\right) = 42,34$$

Pero si se tiene una distribución de 10 sujetos con un microestado cultural 1, 5 sujetos con un microestado cultural 2 y 5 sujetos con un microestado cultural 3, su entropía es

$$S = \ln\left(\frac{20!}{10!5!5!}\right) = 14,61$$

Si la mitad de sujetos culturales se encuentra en un mismo microestado cultural y la otra mitad en otro mismo microestado cultural, entonces su entropía es

$$S = \ln\left(\frac{20!}{10!10!}\right) = 9,73$$

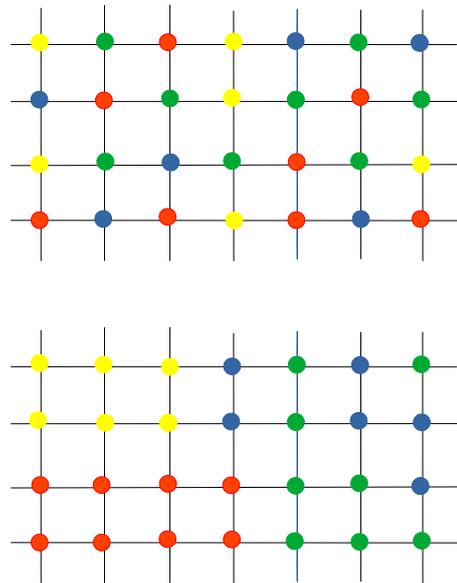
Si se considera una población de 20 sujetos culturales con una distribución de microestados por decir todos compartiendo el mismo microestado se tiene una diversidad nula

$$S = \ln\left(\frac{20!}{20!}\right) = \ln(1) = 0$$

Estos resultados indican que la relación entre la entropía de Boltzmann y el grado de diversidad cultural es directa y coherente, por tanto, nos permite medir el grado de diversidad cultural de manera coherente.

Sin embargo, la entropía de Boltzmann no hace la distinción en la forma de la distribución específica de microestados en la red toroidal y sólo le son importantes las cantidades de microestados culturales que comparten un mismo estado.

Por ejemplo, considerando que cada color representa un microestado cultural distinto, tenemos 6 azules, 6 amarillos, 8 verdes y 8 rojos, en ambos casos.



Y para ambas configuraciones la entropía es la misma

$$S = \ln \left(\frac{28!}{6!6!8!8!} \right) = 33,52$$

De tal manera que le es indiferente el potencial de interacción de la totalidad de la red. En la primera distribución de microestados se muestra una mayor disposición al intercambio de microestados por la menor concentración de regiones con el mismo microestado, no obstante, en la segunda disminuye la disposición al intercambio disminuyendo el potencial de interacción de la totalidad por la mayor concentración de regiones con el mismo microestado.

Si se reduciría la metodología de la investigación a la aplicación de la entropía de Boltzmann sin considerar el algoritmo de Axelrod modificado dicha metodología tendría limitaciones por lo comentado anteriormente, sin embargo, en la metodología de estudio también es parte importante la forma en como interactúan los sujetos culturales mensurada y distinguida por el algoritmo de Axelrod modificado y precisamente hace la diferencia entre una y otra distribución, superando y complementando las limitaciones de la entropía de Boltzmann permitiendo consolidar una metodología que permite la observación de la dinámica cultural a través de su manifestación compleja.

4.4. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Los resultados que se obtienen del programa de simulación expresados a través de gráficos, es la información que se necesita para realizar la interpretación correspondiente.

4.4.1. Construcción del algoritmo de simulación a través del modelo modificado de diseminación cultural de Axelrod.

El proceso de construcción se realiza siguiendo los siguientes pasos:

1. Inicialización de la red.- Procedimiento que genera una red inicial, con dimensión $N_x \times N_y$ donde se distribuyen los agentes culturales sobre los vértices de la red, cuyas coordenadas $(x, y) \in N_x \times N_y$ asignándoles F atributos.

2. Inicialización de rasgos culturales.- Procedimiento en el cual se elige aleatoriamente un número entre 0 y $q - 1$, que representan los distintos rasgos culturales. A cada atributo se le asigna dicho número como rasgo cultural. En primera aproximación, cada agente tiene la misma cantidad de atributos y rasgos culturales.

3. Interacción agente-vecino.- Procedimiento en el cual se genera una red final; se elige aleatoriamente la posición del agente i y la posición de uno de sus cuatro vecinos j más próximos (norte, sur, este u oeste). Se comparan los valores de los rasgos para un mismo atributo del agente y del vecino. Del conjunto de atributos con distintos rasgos se elige aleatoriamente uno de estos atributos, de manera tal que el agente o el vecino cambia el valor de su rasgo cultural por el del otro aleatoriamente, este proceso se realiza una cantidad de veces de tal forma que el número de interacciones sea un múltiplo entero de $4(N_x \times N_y)^2$ (tiempo de influencia total que resulta de las interacciones de cada uno de los elementos de la red con todos los elementos de la red).

4. Cálculo de la entropía.- Procedimiento en el cual se obtienen las cantidades totales n_i por microestado cultural $V C_i$ distribuidos en la red inicial y final, denotados por $n_1, n_2, n_3, \dots, n_M$.

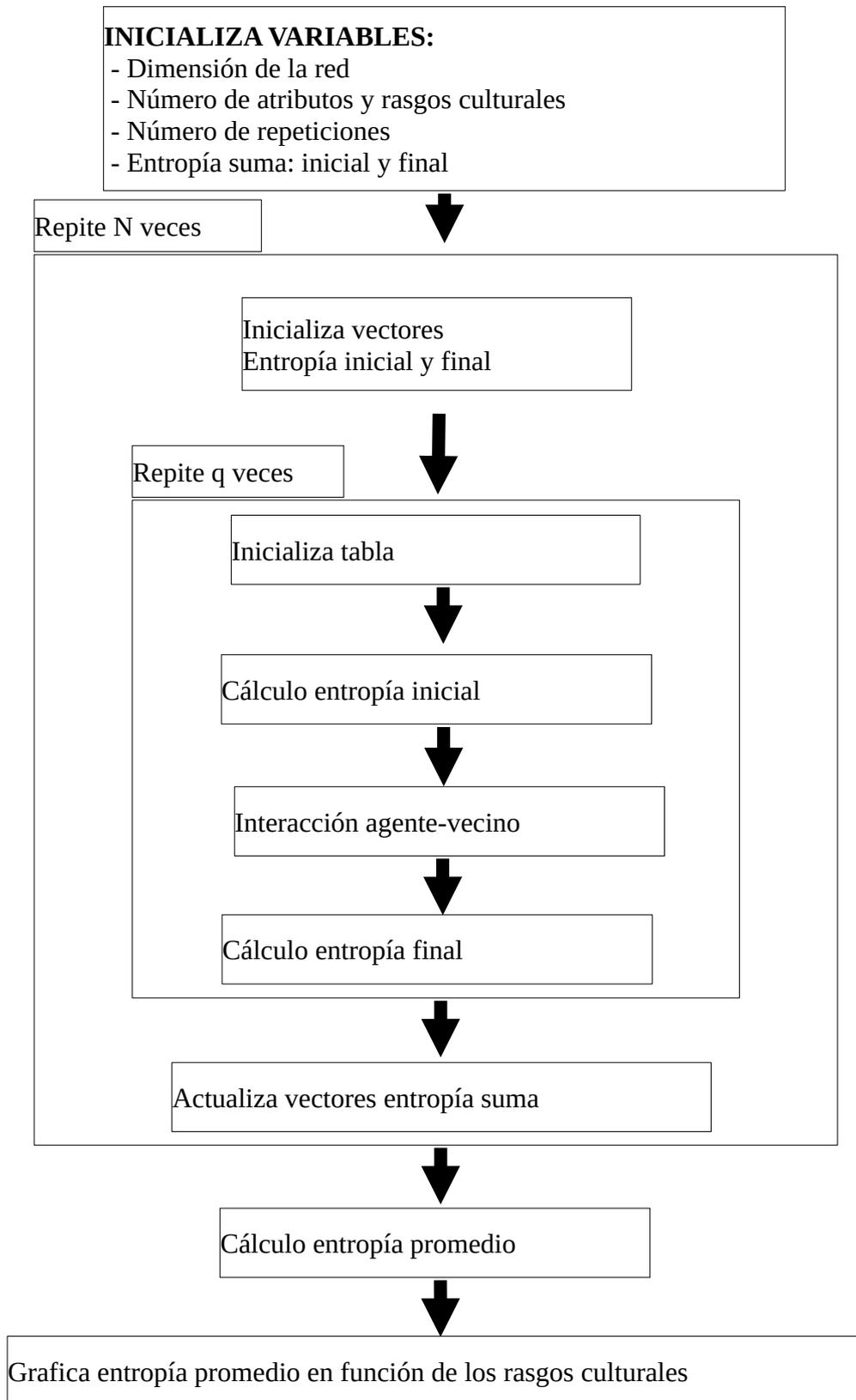
Aplicando la ecuación $S = \left[N \ln(N) - \sum_i^{q^F} n_i \ln(n_i) \right]$ obtenida de la ecuación de Boltzmann, donde

$N = N_x \times N_y$, se calcula la entropía inicial y final, es decir, antes y después de las interacciones.

5. Cálculo del valor promedio de la entropía.- Procedimiento que se repite 20 veces para obtener valores promedios estimados de la entropía.

6. Gráfico entropía-rasgos culturales.- Procedimiento en el cual se grafica los valores promedios de la entropía inicial y final en función del número de rasgos culturales.

El diagrama de flujo de este algoritmo de simulación mediante el modelo modificado de Axelrod es:



4.5. TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En la construcción del método para interpretar la dinámica cultural del sistema de sujetos culturales, se utilizan los conceptos físicos como interacción, tiempo, espacio, entropía, grados de libertad, dimensión, entre otros.

Mediante la gráfica de la entropía en función del número de rasgos culturales obtenida de la simulación se realiza la interpretación de la evolución de la entropía, el cual se desarrolla en la sección 5.5 (EVOLUCIÓN DE LA ENTROPÍA: ENTROPÍA EN FUNCIÓN DE LOS RASGOS CULTURALES), del siguiente capítulo (CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN).

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Una hermenéutica que subtiende la ciencia moderna, sobre la cual se construye la gran cantidad de conceptos y/o categorías que se despliegan en sus argumentaciones de realidad de lo real, tiene el sentido y la intencionalidad de sustentar lo que se observa con *determinismo* y *objetividad*. Es así como se producen teorizaciones que construyen coherencias explicativas con las medidas y/o resultados obtenidos, los cuales *nunca* son objetivos, puesto que responden a metodologías culturales desde donde se construyen resultados.

Con bastante regularidad se puede evidenciar que la gran mayoría de modelos matemáticos desarrollados en trabajos de investigación útiles a la forma de enfocar los sistemas compuestos por un gran número de elementos, conocido como sistema estadístico, responden a dos idealizaciones extremas, los sistemas “ordenados” y los sistemas “desordenados”. Por una parte, desde la teoría de la física estadística un sistema ordenado o en equilibrio puede ser representado por una función de densidad de probabilidad (*Levich, 1976*), mientras que los sistemas desordenados o caóticos no poseen funciones de densidad de probabilidad. De estas ideas se infiere que existe una disyunción entre los sistemas ordenados y desordenados.

Sin embargo, existen sistemas cuyas dinámicas se presentan con ciertas formas de estabilidad pero que sin embargo no poseen una función de densidad de probabilidad que describe su dinámica colectiva. Al parecer, la dinámica de estos “nuevos” sistemas, como los sistemas interculturales, contienen un intrincamiento coherente o enlace dialéctico de dinámicas contrapuestas y aparentemente inconexas, orden y/o desorden, que al presentar una forma dialógica en su evolución, se pueden entender como procesos de-estructurados y de-

struidos que sí se pueden interpretar a través de una lógica dialéctica. Es decir, para un intervalo de tiempo apreciablemente importante, sus dinámicas se desenvuelven superponiendo coherentemente dinámicas contrapuestas, de manera tal que la suma de sus formas dinámicas, implícitas en sus procesos, no es la dinámica de todo el sistema, generándose la dinámica dialéctica de estabilidad y/o inestabilidad.

El sistema intercultural estudiado y simulado comparte esta morfología dinámica comentada anteriormente. Si bien muestra una estabilidad en la medida de la diversidad cultural del sistema interactuante, no se aprecia una regularidad que permita construir una función de densidad de probabilidades relacionados con los microestados que participan en el cálculo del valor de la entropía de Boltzmann como medida de la diversidad cultural.

5.2. COMPLEJIDAD Y TEORÍA CUÁNTICA

Si se observa la dinámica cultural humana, se puede percibir en ella un comportamiento que es interpretable a través de la lógica de la teoría cuántica, puesto que el grado de sensibilidad de un sujeto cultural a la influencia de su entorno es significativo (hipersensibilidad) (*Penrose, 2020*). Esta situación condiciona la forma de entender la dinámica cultural fuera del marco de una interpretación meramente clásica, tal como enfoca al comportamiento humano la Sociología moderna. En este sentido es que este trabajo aporta una metodología distinta, en primera aproximación, para observar la naturaleza compleja del comportamiento humano en colectivo.

5.3. COMPRENSIÓN DE LA OBJETIVIDAD

El bagaje cultural de un sujeto no sólo depende de sus propiedades endógenas o intrínsecas sino que contiene propiedades producto de su carácter relacional con su entorno dinámico, lo que se conoce como propiedades exógenas o extrínsecas (*Sartre, 1945*), tal como es el contenido de realidad de la materia (*Heisenberg, 1958*).

La subjetividad del sujeto cultural es la consecuencia de sus propiedades intrínsecas y extrínsecas desde donde se arroja a la observación de su entorno objetivizando el mundo que aprecia a través de la experiencia, por tanto, la objetividad es la materialización de la subjetividad humana (*Morin, 2011*).

Una forma cultural de objetivizar la diversidad cultural de la complejidad humana es aplicando la entropía de Boltzmann al sistema intercultural.

5.4. ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

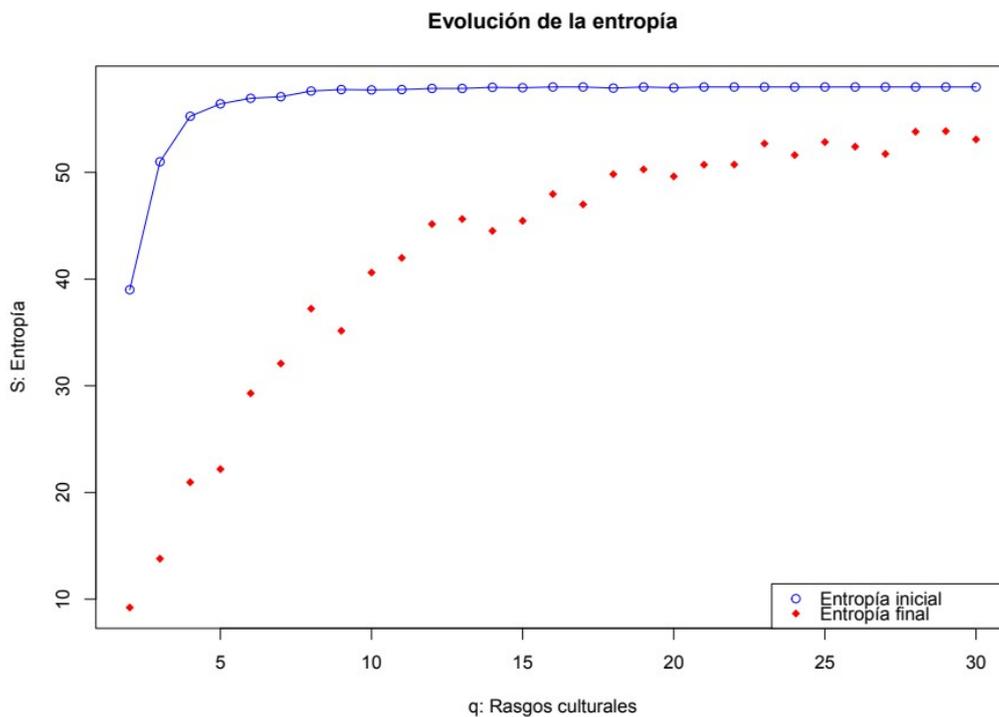
Se puede entender la complejidad como consecuencia del entrelazamiento que se produce entre los elementos de un mundo intensamente interactivo, en su carácter cualitativo: informático y/o material y cuantitativo: medida. Es posible entender el entrelazamiento cuántico como una consecuencia del entrelazamiento complejo, de información del contenido material de los elementos del mundo complejo. Esta fenomenología (*Husserl, 1907*) se replica en el mundo de la complejidad intercultural.

5.5. EVOLUCIÓN DE LA ENTROPÍA: ENTROPÍA EN FUNCIÓN DE LOS RASGOS CULTURALES

De la ejecución del programa de simulación de la red intercultural se puede observar que la diversidad cultural evoluciona en función de la cantidad de rasgos culturales, figuras 17, 18, 19 y 20, mostrando un cambio de fase a partir de un valor del número de rasgos culturales, llamado valor crítico q_c , cuyos detalles de cálculo se muestra en la definición de transición de fase desarrollado más adelante.

Figura 17

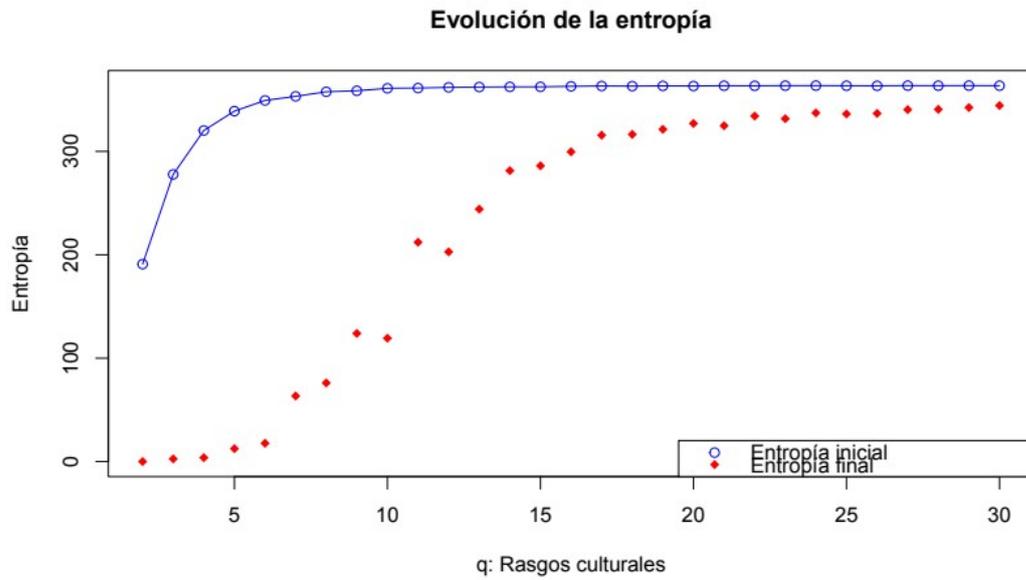
Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 5x5, $F=3$ y $q_c=3,539$



Nota. Elaboración propia.

Figura 18

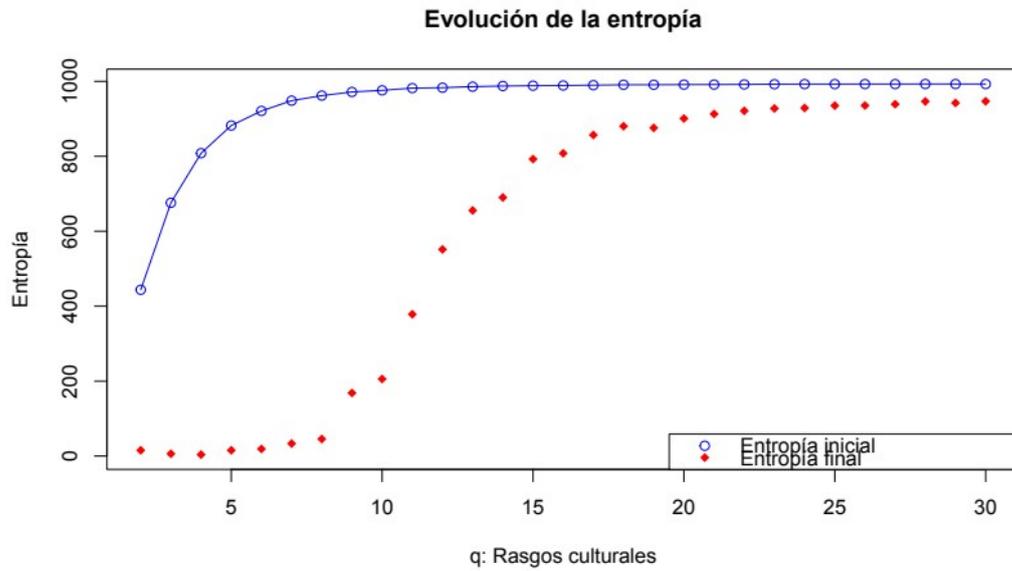
Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 10x10, $F=3$ y $q_c=9,165$



Nota. Elaboración propia.

Figura 19

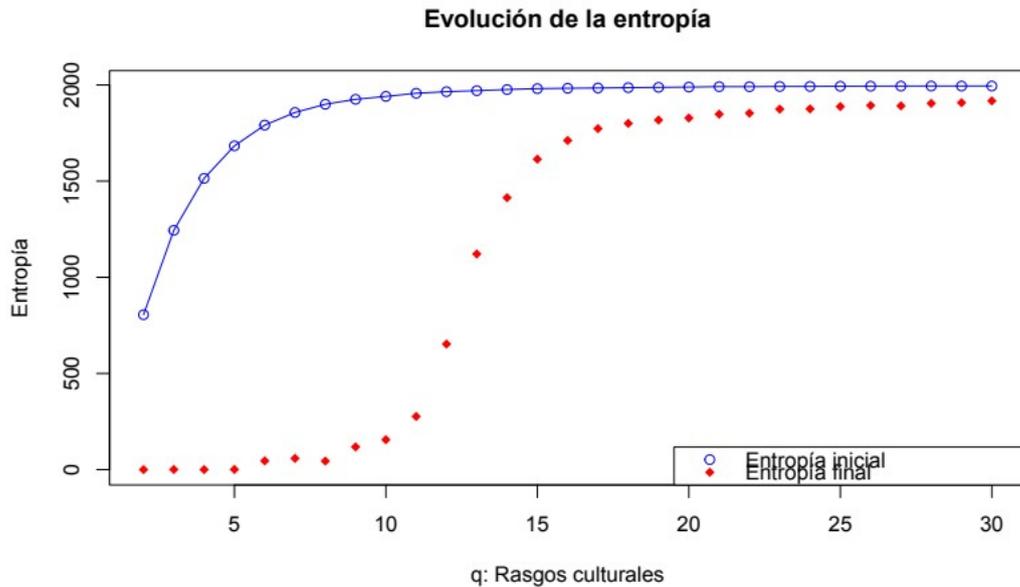
Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 15x15, $F=3$ y $q_c=10,835$



Nota. Elaboración propia.

Figura 20

Evolución de la diversidad cultural en función de la riqueza cultural para una red 20x20, $F=3$ y $q_c=11,987$



Nota. Elaboración propia.

De la curva de la entropía inicial (curva azul), que es generada aleatoriamente, se puede observar que su valor para cantidades pequeñas de rasgos culturales es baja (puesto que la dimensión del espacio muestral cultural es pequeña respecto del número de elementos de la red), por tanto se producirá sobre la red una distribución de microestados culturales donde la cantidad de agentes culturales que comparten un mismo microestado cultural es considerablemente grande respecto de la población total. Sin embargo, al aumentar el número de rasgos culturales, la entropía crece hasta estabilizarse en un valor máximo, puesto que, el

número de elementos del espacio de estados es mayor al número de elementos de la red, y por tanto aumenta la probabilidad de que cada agente tenga un microestado distinto.

De la curva de la entropía final (curva roja), se pueden observar dos regiones distintas: por un lado se tiene una configuración homogénea de microestados culturales y, por otra parte, se puede observar una configuración de microestados que indica una alta entropía. Es decir, que al producirse las interacciones culturales el sistema evoluciona de manera tal que, en el caso de una baja riqueza cultural (cantidad pequeña de rasgos culturales) la diversidad también es pequeña lo que muestra una tendencia del sistema a una homogenización cultural. Pero de otra parte, a medida que aumenta el número de rasgos culturales, a partir del valor crítico, q_c , se produce un cambio abrupto en la entropía, lo cual puede entenderse como un transición de fase desde la homogeneidad cultural a la heterogeneidad cultural.

Esta fenomenología puede ser interpretada a partir del aumento de la multidimensionalidad cultural a medida que aumenta la riqueza cultural que está en relación directa con la cantidad de rasgos culturales de manera tal que a partir del valor crítico q_c se produce un cambio cualitativo en la dinámica cultural del sistema. Este proceso de transición de fase se podría interpretar como la transformación del comportamiento culturalmente uniforme y acrítico hacia un comportamiento diverso y crítico del sujeto cultural a través de una dialógica de la unidad y lucha de contrarios: centralidad-descentralidad que produce el aumento del grado de multidimensionalidad cultural en el sistema.

5.6. PROPIEDADES COMPLEJAS DEL SISTEMA DE AGENTES CULTURALES

El sistema intercultural, desde el que se mide la dinámica de su entropía, se considera abierto, puesto que, si bien no varía la cantidad de agentes en la red, sí varía la configuración de microestados culturales en el tiempo, manteniendo la diversidad cultural estable a partir de q_c .

Edgar Morín, filósofo de la UNAM, afirma que una de las características de los sistemas complejos es que aunque cambien sus elementos estos mantienen estables algunas de sus propiedades extensivas en un rango importante de tiempo (*Morin, 2011*), en este caso la entropía. De forma análoga, en la dinámica cultural algunos microestados culturales aparecen y otros desaparecen sobre la red de sujetos culturales, incluso algunos que nunca se habían manifestado aparecen inusualmente, manteniendo estable la diversidad cultural. Manifestando la dinámica dialógica de los extremos estabilidad y/o inestabilidad. Ver tabla 2.

Tabla 2

Medida de la Entropía, Microestados y número de microestados culturales para 20 unidades de tiempo de una red de dimensión 20x20, F=3 y q=30.

| Nro. | Entropía(S) | VC - ni: i=1, 2, 3, ... , 400 | | | | | |
|------|------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | | | |
| 0 | 1864.10132177218 | 9 | 12 | 53 | 159 | 272 | 556 |
| | | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1903.0514831614 | 159 | 272 | 556 | 593 | 612 | 623 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 |
| 2 | 1877.79126910717 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 713 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1891.83889088643 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 612 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 4 | 1895.67395285072 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 612 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 1867.41290094831 | 9 | 53 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1887.86232935986 | 9 | 12 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1848.84357517918 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 612 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 8 | 1897.23664214997 | 9 | 159 | 250 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1882.48445017048 | 9 | 12 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 1882.2331357422 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 713 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 1872.5729944483 | 9 | 12 | 42 | 159 | 272 | 556 |
| | | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | 1892.71435962378 | 9 | 42 | 159 | 250 | 272 | 556 |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 13 | 1901.23852148452 | 9 | 12 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 1904.74607888217 | 9 | 53 | 159 | 272 | 550 | 556 |
| | | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 15 | 1884.35477196221 | 9 | 42 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 17 | 1880.05848605633 | 9 | 42 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 18 | 1879.0415177567 | 9 | 159 | 272 | 556 | 593 | 713 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 19 | 1884.63548536535 | 9 | 12 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 20 | 1885.28781055139 | 9 | 42 | 159 | 272 | 556 | 593 |
| | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Nota. Elaboración propia.

Del contenido de la tabla se puede entender que el comportamiento de la dinámica cultural del sistema de agentes es complejo, puesto que manifiesta dos características fundamentales: emergencia y autoorganización. Pero además, se puede observar una “nueva” propiedad del sistema complejo estudiado: centralidad y/o descentralidad cultural.

5.7. AUTOORGANIZACIÓN

Cuando el sistema intercultural evoluciona después de un intervalo de tiempo en el que se produce el cambio de fase, empieza a mostrar un valor estable en la medida de la diversidad cultural \bar{S} (valor promedio), como se muestra en los gráficos de la evolución de la entropía en función del tiempo para diferentes dimensiones de la red, figuras 21, 22, 23 y 24. Esta última afirmación se puede establecer a partir del valor de la desviación estándar de la diversidad cultural ΔS . Al apreciar los distintos valores promedio de la diversidad cultural y comparándolos con sus respectivas desviaciones se puede observar que los valores de las desviaciones son pequeñas respecto de sus promedios para distintas dimensiones de la red, mostrando una estabilidad en la diversidad cultural. Ver tabla 3, cuyos datos han sido obtenidos de las figuras 21, 22, 23 y 24, respectivamente.

Tabla 3

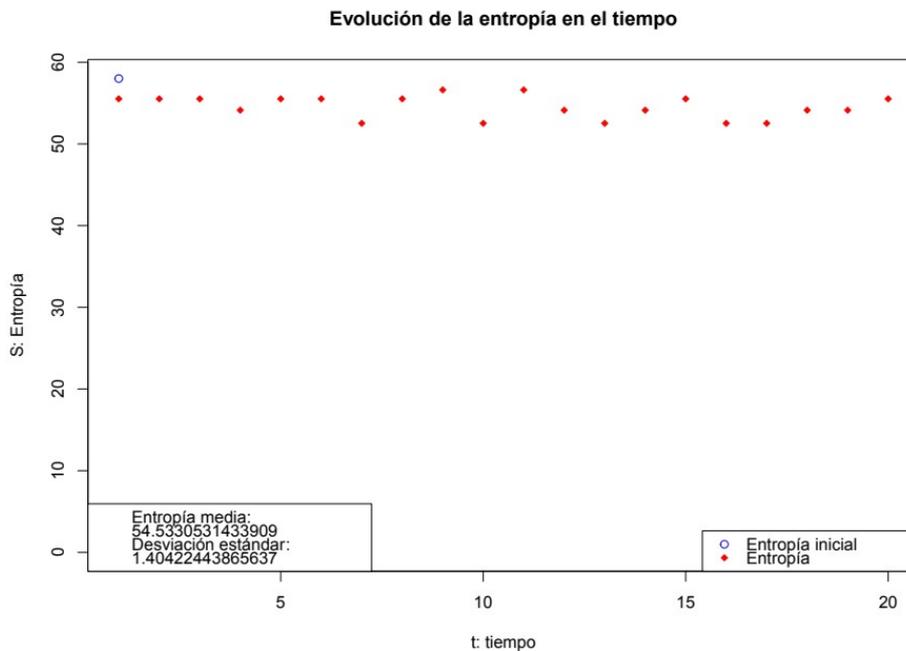
Valor promedio y desviación estándar de la diversidad cultural

| DIMENSIÓN DE LA RED | \bar{S} | ΔS | $\Delta S\%$ | CRITERIO |
|---------------------|-----------|------------|--------------|----------|
| 5 x 5 | 54,533 | 1,404 | 2,60 | Estable |
| 10 x 10 | 344,460 | 2,514 | 0,70 | Estable |
| 15 x 15 | 949,278 | 5,097 | 0,53 | Estable |
| 20 x 20 | 1884,158 | 13,912 | 0,70 | Estable |
| 30 x 30 | 5030,051 | 9,445 | 0,10 | Estable |

Nota. Elaboración propia.

Figura 21

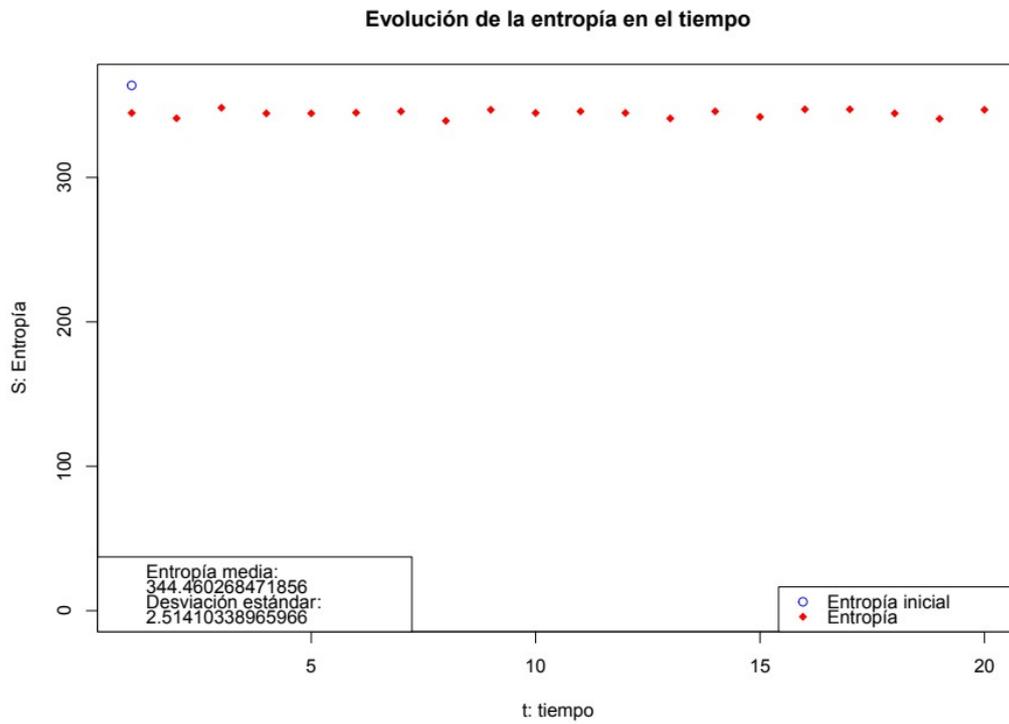
Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 5x5 y q=30



Nota. Elaboración propia.

Figura 22

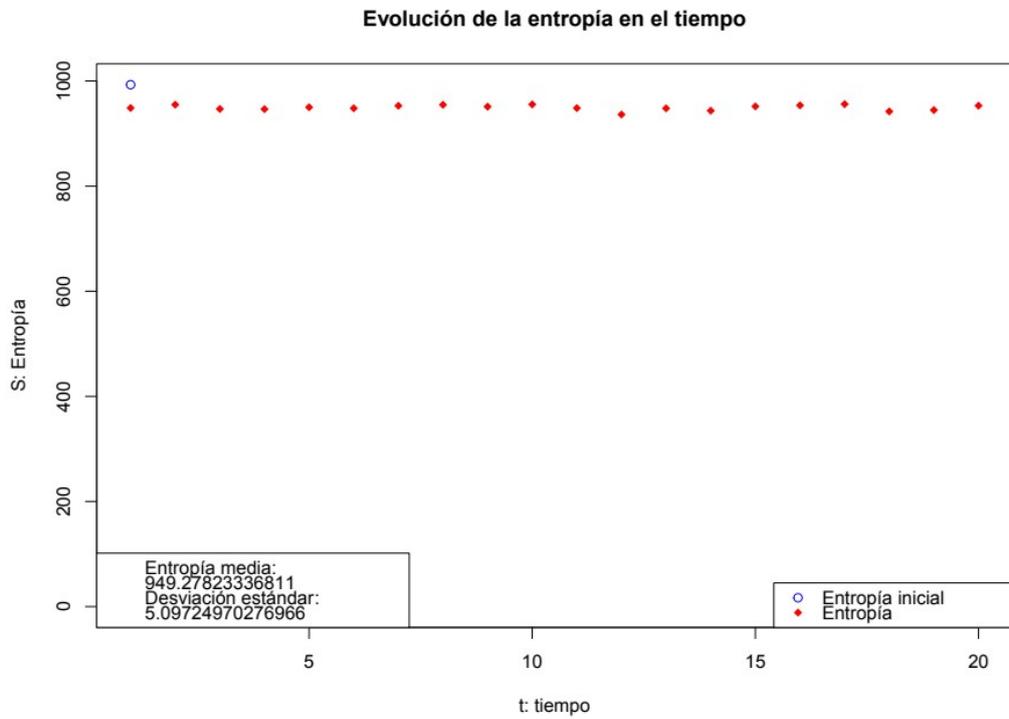
Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 10x10 y $q=30$



Nota. Elaboración propia.

Figura 23

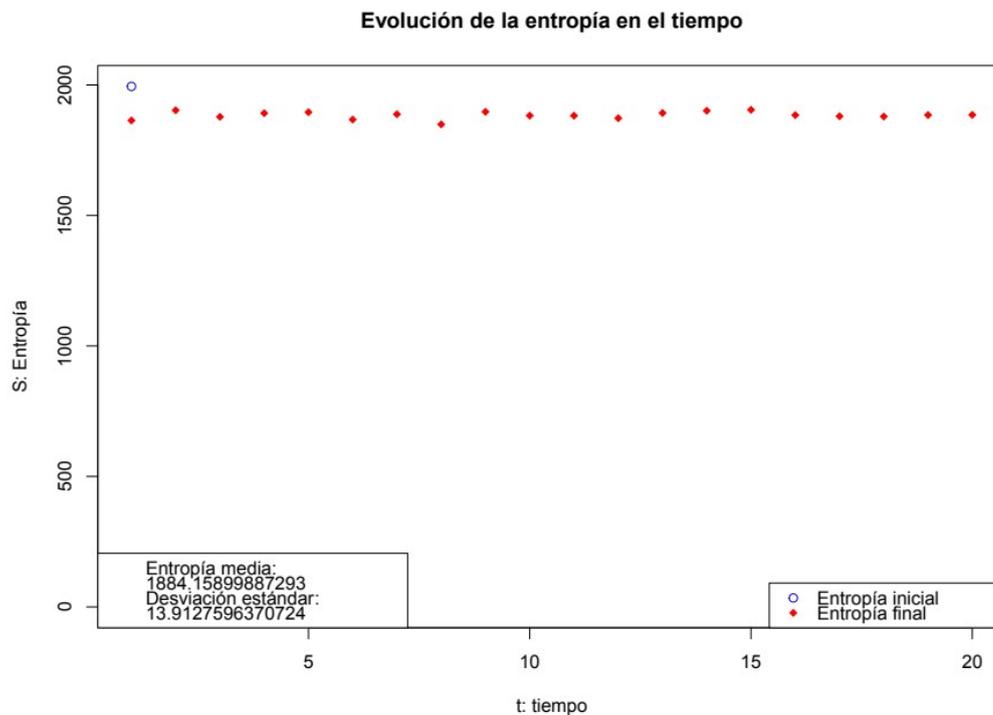
Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 15x15 y $q=30$



Nota. Elaboración propia.

Figura 24

Evolución de la entropía en función del tiempo para una dimensión de la red 20x20 y $q=30$



Nota. Elaboración propia.

Sin embargo, la fenomenología con la que se presenta la dinámica del sistema en el tiempo, muestra que, la cultura con mayor tasa y su tasa, se presentan de manera fluctuante en el tiempo sin alterar significativamente el valor de la diversidad cultural. Manifestando que la diversidad cultural, producto de la interculturalidad, evoluciona hacia una alta diversidad cultural que, sin embargo, se mantiene estable en el tiempo.

Esta fenomenología se puede interpretar como el proceso de autoorganización necesario que produce una complejidad en el sistema intercultural bajo estudio, cuya

interculturalidad se sustenta en la lógica dialéctica de la unidad y lucha de contrarios que se manifiesta en el hecho de que por un lado se produce una estabilidad de la diversidad cultural del sistema y por el otro una inestabilidad en la centralidad cultural de los sujetos que componen el sistema. Esta lógica fundamenta la necesidad del método transdisciplinario, como la lógica del tercero incluido o lógica dialógica, en el estudio del sistema complejo intercultural.

5.8. EMERGENCIA

Una información importante del sistema intercultural, entre otras, se encuentra en su dinámica interactiva. La riqueza cultural fluctuante con la que cada agente afronta la interactividad esta relacionada con la cantidad de atributos y rasgos culturales, cantidad que refleja la multidimensionalidad sobre la cual se desenvuelve su dinámica. Esta multidimensionalidad de interacciones produce emergencias las cuales indican que la suma de las partes nunca es igual al todo. Una de estas emergencias es el valor máximo estable de la diversidad cultural, que no responde a una sola configuración del conjunto de microestados que participan del valor máximo de la diversidad cultural. Por tanto, no se puede inducir a la afirmación que la causa de una máxima diversidad cultural responda a la suma de la riqueza cultural de las partes.

De otro modo, cualitativamente no es posible afirmar que el sistema se encuentra unas veces “ordenado” y otras veces “desordenado”, como características cualitativas inconexas, sino, por el contrario, estas dos formas se yuxtaponen, imbrican o intrincan de manera compleja, de modo que la aparente inconexidad entre contrarios dialécticamente producen una coherencia entre orden y desorden que se manifiestan dialógicamente para producir un comportamiento colectivo de nuevo tipo llamado *complejidad*. Es necesario aclarar que cuando

dos conceptos, orden-desorden, son elementos del intrincamiento dialógico, dichos conceptos pierden su carácter autónomo.

5.9. NO CENTRALIDAD CULTURAL

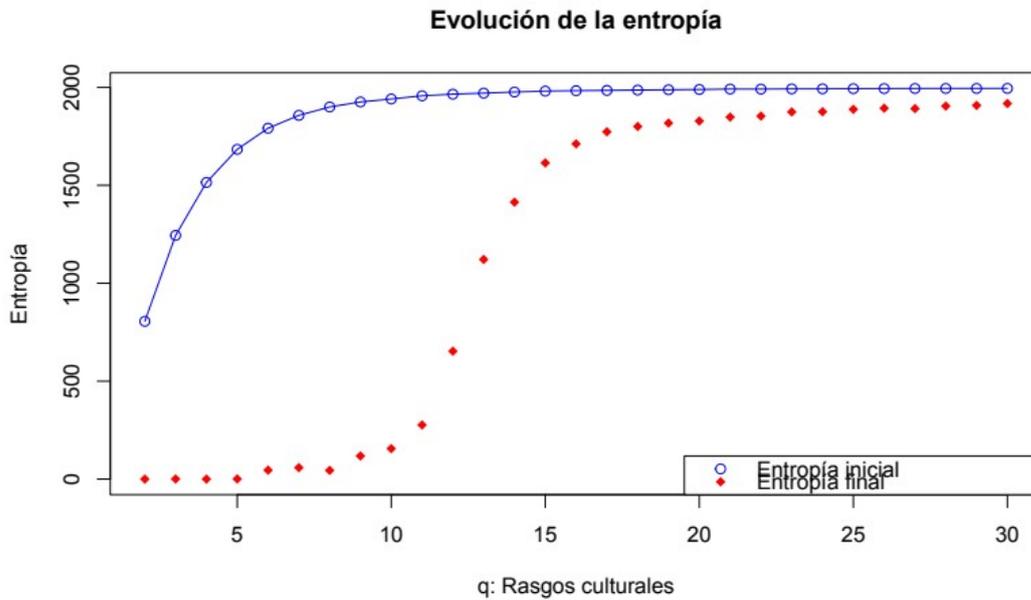
Es importante remarcar que el sistema de sujetos culturales exhibe una propiedad muy particular que solo corresponde a los sistemas complejos. Y es que, en su evolución temporal aún manteniendo una máxima diversidad cultural estable no existe la centralidad de una cultura sobre otras en su dinámica. Esta situación muestra además que los procesos interculturales que afectan dinámicamente los microestados culturales de cada sujeto sean de-constructivos y/o destructivos, y es en esa lógica dialéctica que se producen los procesos interculturales.

5.10. TRANSICIÓN DE FASE

En la evolución colectiva intercultural de este sistema, se encontró una transición de fase de la entropía en función de la cantidad de rasgos culturales q , el sistema alcanza un estado cultural homogéneo donde la gran mayoría de sujetos culturales poseen el mismo vector cultural, cuando la cantidad de rasgos culturales es menor al valor crítico, q_c . A partir de q_c el sistema sufre un cambio cuasi abrupto hacia una heterogeneidad cultural, donde se establecen en la red una cantidad de microestados culturales significativamente apreciable. En la simulación, el parámetro de orden es la cantidad de rasgos culturales q_c que muestra una transición de fase homogeneidad - heterogeneidad. En la fase homogénea, la entropía tiende a cero, para valores de $q < q_c$, en tanto que, para valores de $q > q_c$, el sistema se encuentra en la fase heterogénea, lo cual se muestra en el figura 25.

Figura 25

Transición de fase

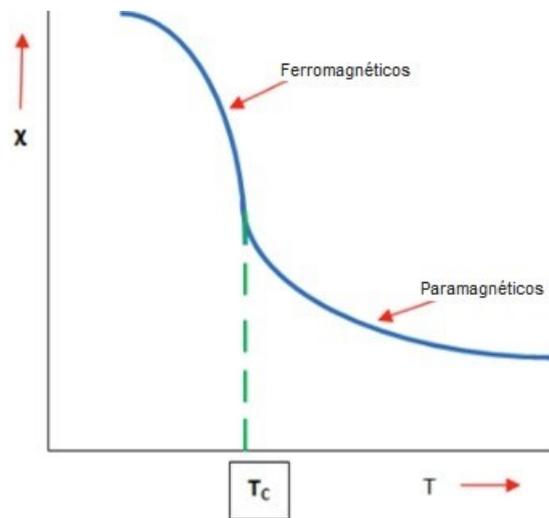


Nota. Comportamiento de la dinámica cultural de agentes. Elaboración propia.

En la figura 25 se puede observar una analogía con el comportamiento de la magnetización en un material ferromagnético donde el valor de q_c es un parámetro análogo a la temperatura crítica de Curie, puesto que ambos dividen el comportamiento de los sistemas en fases homogéneas y heterogéneas como manifestaciones de sistemas complejos cuya propiedad es la emergencia de un resultado que los caracteriza, véase figura 26.

Figura 26

Transición de fase



Nota. Comportamiento magnético de un material. Fuente Wikipedia

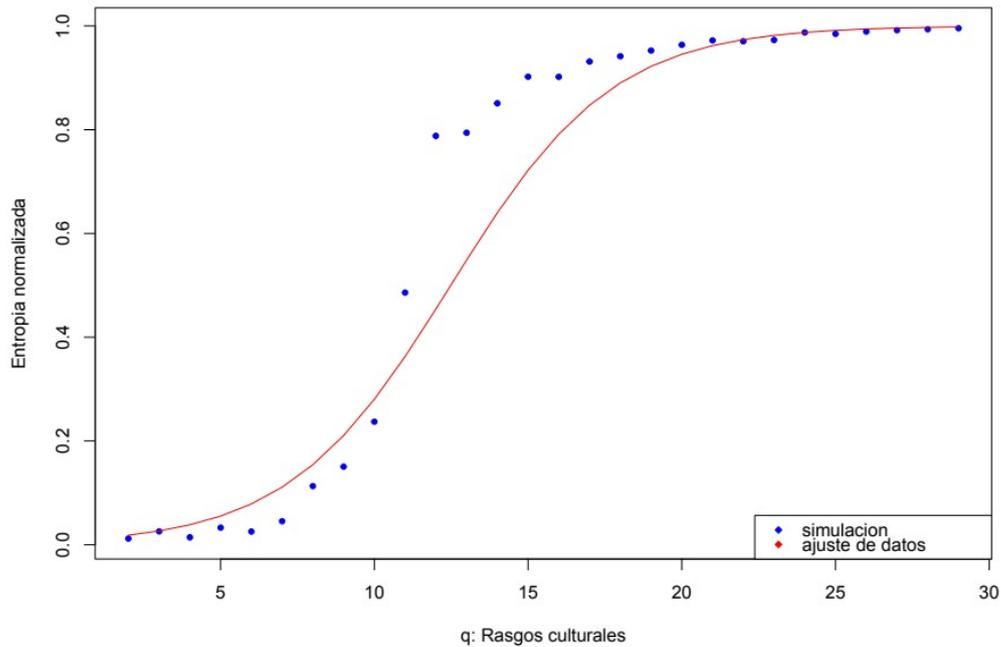
La ecuación de la entropía S en función del número de rasgos culturales q , dada por:

$$S = \frac{1}{1 + e^{-(A+Bq)}}$$

representa la ecuación teórica, denominada modelo logístico o curva logística de la curva mostrada en la figura 27, cuyos valores de los parámetros A y B han sido obtenidos aplicando regresión lineal.

Figura 27

Curva teórica de la entropía



Nota. Elaboración propia.

El punto de inflexión de la curva se obtiene igualando a cero la segunda derivada de la entropía S respecto del número de rasgos culturales q , es decir, $\frac{d^2 S}{dq^2} = 0$, de donde se obtiene el

número del rasgo cultural crítico q_c , dado por: $q_c = -\frac{A}{B}$, con esta ecuación han sido calculados

los valores del rasgo cultural crítico en las figuras 17, 18, 19 y 20, respectivamente.

5.11. SOCIEDAD Y COMUNIDAD

Las fases que presentan los procesos de interculturalidad humana pueden ser entendidas como dos formaciones antropológicas muy distintas, en el caso de una fase culturalmente homogénea, ésta muestra la centralidad de una cultura que paulatinamente con el desarrollo temporal de su evolución se va consolidando hasta lograr una alta homogeneidad cultural del sistema, lo cual se puede entender como un sistema en equilibrio o tendiente al equilibrio, que garantizará una irreversible homogeneidad cultural. Este proceso homogeneizante puede ser interpretado a partir de la consideración de los atributos culturales como instituciones normativas de dominación y orden: educación, derecho, deporte, etc. que se desarrollan como matrices de imposición cultural, cuya consolidación se logra a partir de la existencia de un bajo nivel de riqueza cultural o experiencia intercultural producto de una reducida multidimensionalidad de prácticas interculturales (Sociedad), Procesos culturales modernos.

No obstante, cuando la riqueza cultural supera el q_c se manifiesta un cambio abrupto hacia una transculturalidad de-constructiva y de-structiva, donde carece de sentido la centralidad de una cultura en el mismo proceso intercultural y, por tanto, se disipan los procesos homogeneizantes. Si bien, en estos procesos se manifiestan la multiculturalidad e interculturalidad lo más resaltante es que las culturas específicas de cada agente cultural son atravesadas transculturalmente por otras culturas que participan de su entorno. Es decir, esta transversalidad intercultural se produce en de-construcción y de-strucción de las culturas específicas de cada agente cultural que participa de la interculturalidad (Comunidad), Procesos culturales comunitarios.

Aparentemente, este proceso transcultural induciría a una idea de caos cultural en el sentido del aumento incontrolable de la diversidad cultural medida a través de la entropía S . Sin embargo, el sistema muestra un “mecanismo” auto-regulativo conocido como AUTOORGANIZACIÓN, característica de los sistemas complejos, el cual estabiliza la diversidad cultural en un valor que si bien es considerablemente alto no excede el grado de diversidad cultural que inicialmente se produce aleatoriamente.

Este alto grado de diversidad cultural estable se produce inherentemente intrincado al proceso inestable de la centralidad cultural, mostrando en su desarrollo la dialéctica de unidad y lucha de contrarios, estabilidad–inestabilidad, conocida hoy como la lógica dialógica (*Basarab, 1996*).

5.12. DISCUSIONES FINALES

No existe sistema dinámico cultural intrínsecamente aislado, puesto que su contenido extrínseco es la interacción con otros sistemas, lo exterior al sistema lo constituye. No se puede aislar un objeto o sistema de estudio de su contexto, de sus antecedentes y de su devenir. Es decir, no puede nacer un concepto fuera del contexto cultural que lo concibe.

El sistema no puede ser comprendido más que incluyendo en sí al ambiente, que le es a la vez íntimo y extraño y es parte de sí mismo, siendo al mismo tiempo exterior (*Morin, 2011*).

Partiendo de esa concepción, se interpreta la dinámica cultural midiendo la entropía del sistema aplicando la entropía de Boltzmann, como forma coherente de su medida aún existiendo otras formas de medirla.

CONCLUSIONES:

1. La metodología construida es adecuada y coherente puesto que vincula de manera directa la entropía de Boltzmann con la medida de la diversidad cultural. Es decir, al aumentar el número de configuraciones de microestados culturales compatibles Ω , aumenta la diversidad cultural representada por S , y de modo análogo se produce la disminución de S con la disminución de Ω . Por consiguiente, la aplicación de la entropía de Boltzmann es apropiada en el estudio del proceso intercultural del sistema tipo Axelrod modificado.
2. Cuando el número de rasgos culturales varía de un valor menor a uno mayor con respecto al valor crítico q_c , se evidencia una transición de fase, tal como muestran las figuras 17, 18, 19 y 20. A partir de esta situación el sistema intercultural estudiado presenta un tránsito que produce un cambio cualitativo del sistema en equilibrio hacia uno complejo donde se origina la emergencia de la diversidad cultural. Este tránsito puede interpretarse como un cambio de fase desde una dinámica cultural homogénea a una heterogénea donde la diversidad cultural alcanza un valor alto que, sin embargo, no excede el valor máximo de la diversidad cultural.
3. En la dinámica del sistema intercultural la entropía de Boltzmann funciona como un instrumento directamente sensible al proceso interactivo cultural, y la forma en que se construye el número de microestados compatibles Ω , que es el contenido de la entropía de Boltzmann, encierra una significativa información que permite mostrar el carácter complejo de la dinámica interactiva, cuando el número de rasgos culturales del sistema q es mayor que el número de rasgos culturales crítico q_c ($q > q_c$), tales como las

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

propiedades complejas de no centralidad y de autoorganización, donde aun así, el valor de la entropía S se aproxime al valor máximo, ésta se estabiliza respecto de un valor promedio S (tabla 3) en el proceso temporal, como se muestran en las figuras 21, 22, 23 y 24. *De esta manera se evalúa la dinámica compleja intercultural del sistema basado en el modelo de Axelrod modificado aplicando la entropía de Boltzmann.*

SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES:

1. En este trabajo suigéneris y en primera aproximación, sugerimos insertar un porcentaje de agentes culturales con alta tenacidad, distribuidos en la red aleatoriamente, como elementos de influencia cultural para observar la evolución de la diversidad cultural.
2. Por los resultados obtenidos dentro del marco de la autoorganización y la no centralidad, se muestra la necesidad de abordar el estudio de los sistemas complejos desde otra metodología esencialmente distinta al racionalismo empírico que deviene en una racionalidad aristotélica que niega en su esencia la metodología dialógica o dialéctica como instrumento metodológico adecuado de la unidad y lucha de categorías contrapuestas en la dinámica compleja como su forma esencial de manifestarse.
3. Se sugiere hacer el estudio para el caso más general, donde el agente interactúe con más de un vecino a la vez.
4. Se sugiere también el estudio e interpretación de los parámetros A y B de la ecuación

teórica
$$S = \frac{1}{1 + e^{-(A+Bq)}}$$

BIBLIOGRAFÍA

Albert R. and Barabási A. L., (2002), Statistical mechanics of complex networks, review of modern physics.

Axelrod R., (1997), The Dissemination of Culture. Published 1 April 1997. Sociology. Journal of Conflict Resolution.

Basarab Nicolescu, (1996), La transdisciplinariedad. Manifiesto, Impreso en México. Ediciones Du Rocher.

Castellano C., Fortunato S., Loreto V. (2009), Statistical physics of social dynamics. Reviews of modern physics, Volumen 81.

Cosenza M. G., Tucci K., González Avella J.C., (2007), Modelo Sociofísico de la influencia de propaganda masiva en un sistema social, Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Volumen 22 Nro. 1.

De Broglie Louis, (1924), Recherches sur la théorie des quanta. Tesis. París.

Dussel Ambrosini Enrique, (2019), Revista Ciencia, Tecnología y Política. Nro.2.

Dussel Ambrosini Enrique, (2007), Política de la liberación. Historia mundial crítica. Editorial Trotta.

Harris Marvin, (1917), Antropología cultural. Alianza editorial.

Heisenberg Werner, (1958), Física y filosofía, epublibre.

Husserl Edmund, (1907), Idea de la fenomenología.

Laclau Ernesto, (2005), La razón populista, fondo de cultura económica.

Levich B. G., (1976), Física Teórica. Volumen 2. Editorial Reverté.

Lupasco Stephane, (1963), Las tres materias (Física, Biológica y Psíquica), Colección ciencia y cultura. Editorial sudamericana, Buenos Aires, Argentina.

Marx Karl , (2002), El Capital, Libro primero, Cap I, Mercancía y dinero.

Marx Karl , (2002), El Capital, Libro primero, Cap XXIV, La acumulación originaria.

Mayer Julius Robert, (1842), Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inanimada. Liebig's Annalen der Chemie und Pharmacie.

Morin Edgar, (2011), Introducción al pensamiento complejo, España, Gedisa editorial.

Parravano A. , Rivera Ramirez H, Cosenza M. G., (2013), Intracultural diversity in a model of social dynamics, Venezuela, Preprint submitted to Elsevier.

Penrose Roger, (2020), Ensayo. La nueva mente del emperador, Debolsillo.

Preskill John, (2015), Lectures notes for Ph219/CS219: Quantum Information Chapter 2, California Institute of Technology.

Pomposo Alexandre S. F., (2015), La conciencia de la ciencia. Un juego complejo. Centro de Estudios Filosóficos, Políticos y Sociales. Vicente Lombardo y Toledano.

Sartre Jean Paul, (1945), El existencialismo es un humanismo, Buenos Aires.

Wolf Fred Alan, (2006), La mente en la materia. Una nueva alquimia de la ciencia y el espíritu, 3ra. Edición, Gaia ediciones.

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

Wolfram S., (1984), Cellular autómatas as models of complexity.

Weber Max, (1922), Economía y Sociedad.

ANEXOS

a. Matriz de consistencia

| PROBLEMA | OBJETIVO | HIPÓTESIS | VARIABLES | METODOLOGÍA |
|---|---|--|--|---|
| <p>a. PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿Es posible aplicar la entropía de Boltzmann al estudio de la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado?</p> <p>b. PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿De qué modo influye el rasgo cultural en la transición de fase del sistema? | <p>a. OBJETIVO GENERAL</p> <p>Estudiar la posibilidad de aplicar la entropía de Boltzmann a la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado.</p> <p>b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Establecer una dependencia entre el número de rasgos culturales y la transición de fase del | <p>a. Hipótesis general</p> <p>Es posible aplicar la entropía de Boltzmann en el estudio de la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado.</p> <p>b. Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> Existe una forma de dependencia entre el número de rasgos culturales y la transición de fase del | <p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <p>Configuración de microestados culturales</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <p>Diversidad cultural</p> | <ul style="list-style-type: none"> La relación entre la entropía de Boltzmann y el grado de diversidad cultural es directa y coherente a través del imbricamiento metodológico Axelrod-Boltzmann propuesto en el presente trabajo de investigación. Producto de la aplicación de esta metodología se puede observar propiedades complejas en el |

“Aplicación de la entropía de Boltzmann en la dinámica cultural de un sistema tipo Axelrod modificado”

| | | | | |
|--|--|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • ¿Es posible mostrar una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural? | <p>sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Mostrar una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural. | <p>sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Existe una relación entre la entropía entendida como la diversidad cultural y el proceso dinámico interactivo del sistema cultural. | | <p>sistema dinámico cultural como: ESTABILIDAD Vs INESTABILIDAD, AUTOORGANIZACIÓN Y EMERGENCIA.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por tanto, la metodología propuesta permite observar la dinámica cultural de manera coherente a través de la diversidad cultural compleja. |
|--|--|---|--|--|