



Universidad de Los Andes

Facultad de Ciencias

Mérida - Venezuela

Postgrado en Física Fundamental

Area de Caos y Sistemas Complejos

**Influencia de campos localizados
en un modelo sociodinámico**

Trabajo de grado presentado ante la ilustre
Universidad de Los Andes
como requisito parcial para optar al Título de:
Magister Scientae en Física Fundamental

Presentado por:
Lic. Diego B. Ortiz S.

Tutor:
Dr. Mario Cosenza

Mérida, Julio del 2011

La llegada de los físicos a una nueva área de investigación a menudo preludia un período de grandes descubrimientos. Las ciencias sociales son un gran campo para buscar problemas de sistemas complejos.

Duncan Watts.

Resumen

Se propone la investigación del efecto de campos localizados en el comportamiento colectivo de modelos sociodinámicos. Se consideran elementos localizados en una red como portadores de un campo fijo, los cuales pueden interactuar unidireccionalmente con sus vecinos, según la dinámica de interacción social de Axelrod. La densidad de portadores se emplea como parámetro de control y se investiga el surgimiento de orden colectivo en el sistema en función de esa densidad. Se encuentra la existencia de una transición de fase orden-desorden inducida por la presencia de agentes portadores. La transición de fase asociada a campos localizados no uniformes se compara con la correspondiente transición observada en sistemas sujetos a campos externos globales. Adicionalmente, se investigan el efecto de obstáculos o huecos en el comportamiento colectivo del sistema. La influencia de la topología en la transición de fase inducida por campos localizados no uniformes, también es explorada en una red con interacciones globales. Se encuentra un comportamiento colectivo no trivial que consiste en el surgimiento de un grupo mayoritario, ordenado en un estado diferente al que poseen los portadores.

*En algunos casos la suma de armonías
puede ser casi empalagoso,
en otros el conjunto de desarmonías
produce algo mejor que la belleza.*

Mario Benedetti.

Agradecimientos

A Dios, quien me puso en este camino y se aseguró de que pudiera llegar al final.

Como un pequeño testimonio por el gran apoyo brindado durante estos años en los cuales he logrado terminar mi maestría, quisiera agradecer a quienes hicieron posible culminar esta meta. Sin ellos, llegar a este punto y hacerlo realidad no tendría sentido alguno:

A mi tutor, Profesor Mario Cosenza, por su gran sabiduría, paciencia, calma. Porque más que un tutor, es un padre y un ejemplo a seguir.

Al Profesor Kay Tucci, sin quien este trabajo no hubiese sido posible, y a quien le agradezco infinitamente su ayuda. Al Profesor Kay y al Profesor Mario les estaré eternamente agradecido por todo el conocimiento que han compartido conmigo.

A mis amigos caóticos que me han ayudado tanto: José Luis, Carlos Echeverría, Gilberto Paredes, Orlando Álvarez, Juan Carlos González, Javier, Hender, José Manuel, Aquiles, Miguel Angel, Victor Rodriguez, Andrea, María, y las infaltables Tortugas Ninjas, Victor y Leonardo; gracias por todo.

A mi Madre y hermanos, Norma, David y Andrés, a los cuales les debo mi vida

completa.

A mis tías Chepita y Myriam, porque no hay palabras para expresar todo lo que les debo a ustedes.

A la familia Manjarres Ramos, por adoptarme como un hijo, a los cuales considero mi segunda familia.

A Belkis, por su gran amistad y por darme calor de hogar lejos de casa.

A Joany, no hay palabras para describir todo lo que te amo.

A Kristell, gracias por tu gran amistad durante todos estos años.

A mis amigos de San Cristóbal, Mérida y Caracas, con quienes comparto tantos recuerdos, con quienes he crecido y siempre serán hermanos para mí.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Resumen | I |
| 1. Introducción. | 1 |
| 2. Modelo de influencia cultural de Axelrod. | 5 |
| 2.1. Preliminares. | 5 |
| 2.2. Formulación del modelo de Axelrod. | 7 |
| 2.3. Transición de fase en el modelo de Axelrod. | 10 |
| 2.4. Influencia de campos externos en el modelo de Axelrod. | 12 |
| 3. Campos localizados en el modelo de Axelrod. | 18 |
| 3.1. Influencia de portadores en el modelo de Axelrod. | 20 |
| 4. Defectos espaciales en el modelo de Axelrod. | 23 |
| 5. Influencia de portadores en sistemas con interacciones globales. | 27 |
| 5.1. Acoplamiento global en el modelo de Axelrod. | 27 |
| 6. Conclusiones | 33 |
| Bibliografía | 36 |

Ahora que la mente humana ha comprendido la física celeste y la física terrestre, la física química, la física orgánica, tanto vegetal como animal, queda una Ciencia por completar la serie de ciencias de la observación: la Física Social. Esta es la que los hombres más necesitan hoy en día; y ésta es el objetivo del presente trabajo.

Auguste Comte, Cours de Philosophie Positive (1830).

Capítulo 1

Introducción.

La literatura científica contemporánea exhibe mucho interés en el estudio de las propiedades macroscópicas emergentes, tanto espaciales como temporales, en sistemas de elementos dinámicos no lineales interactivos. Las observaciones recientes de comportamientos colectivos ordenados que surgen en una gran variedad de estos sistemas indican que estos comportamientos presentan características universales, las cuales no pueden derivarse a partir del conocimiento de las propiedades de los elementos constituyentes, ni mediante consideraciones estadísticas convencionales. Fenómenos como la formación espontánea de estructuras, organización y jerarquía, patrones espaciales, sincronización y oscilaciones colectivas, ondas espirales, segregación y diferenciación, formación y crecimiento de dominios y de interfases, etc., son ejemplos de procesos de auto-organización que ocurren en diversos contextos, tales como sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales, económicos, etc. Avances teóricos, computacionales y experimentales en este campo están contribuyendo aceleradamente al surgimiento de una descripción unificada de la dinámica de estos sistemas. El concepto general de *sistemas complejos* se ha aplicado a estos conjun-

tos de elementos interactivos capaces de generar estructuras o funciones globales ausentes a nivel local [1, 2, 3, 4, 5].

El estudio de sistemas complejos ha irrumpido como un tema de enorme interés común entre científicos y profesionales de diversas especialidades, incluyendo las ciencias humanas, dando lugar a un intenso proceso de interdisciplinaridad y colaboración poco usual en épocas pasadas, y que extiende e intersecta las fronteras de las ciencias tradicionales. La investigación de sistemas complejos plantea actualmente profundas interrogantes, y a su vez ha revelado insospechadas relaciones entre problemas y disciplinas aparentemente inconexas. El empleo de conceptos y técnicas surgidas del estudio de sistemas complejos ha demostrado ser capaz de abordar problemas fuera de las fronteras tradicionales de disciplinas establecidas. En tal sentido, el estudio de sistemas complejos es una de la áreas de investigación que ha experimentado mayor crecimiento en tiempos recientes. Basta con revisar el gran número de nuevas revistas científicas internacionales especializadas en sistemas complejos o revistas tradicionales que incluyen secciones sobre este tema; la cantidad de libros avanzados y divulgativos que se publican relacionados con la complejidad; la proliferación de conferencias sobre aspectos de sistemas complejos que se realizan cada año; y los numerosos grupos, centros e institutos de investigación dedicados a esta novedosa área del conocimientos que se han establecido recientemente en muchos países.

Los *sistemas complejos* son sistemas de elementos interactivos cuyos comportamientos colectivos no son susceptibles de ser derivadas trivialmente a partir del conocimiento de los comportamientos de sus elementos constituyentes. En lenguaje no técnico, se puede decir que sistemas complejos son aquellos donde el todo no es igual al agregado de sus partes. Los sistemas complejos exhiben características universales, independientemente del contexto: no linealidad, interdependencia, adaptación y emergencia. El estudio de las interrelaciones ha revelado la existencia de redes (*networks*) de conexiones y de propagación de información comunes en estos sistemas [6, 7]. De este modo, se ha encontrado que sistemas tan diversos como la World Wide Web, Internet, redes de grupos sociales, corporaciones económicas, redes de distribución de bienes y servicios, colonias de insectos, flujos metabólicos en

células, neuronas en el cerebro, sistemas físicos, fisiológicos, evolutivos, etc., presentan estructuras topológicas de redes y propiedades de auto-organización similares [8].

La aplicación de los conceptos de sistemas complejos a sistemas sociales ha sido denominada *Sociodiámica o Sociofísica* [9]. En este contexto, se trata de entender cómo fenómenos típicos de sistemas complejos surgen en sistemas sociales. En particular, el paradigma de sistemas complejos en el contexto de sistemas sociales supone que hay estructuras colectivas que emergen de las propiedades dinámicas y de las interacciones entre los elementos del sistema. Es decir, asumimos que muchos fenómenos sociales son procesos colectivos emergentes comunes en diversos sistemas dinámicos y, por lo tanto, susceptibles de ser abordados por la Física. En tal sentido, diversos modelos han sido propuestos para explicar la formación de estructuras por interacciones entre agentes de sistemas sociales, tales como los modelos tipo dilema del prisionero, modelos de formación de opinión tipo Ising; modelos de imitación, etc [10].

En el área de *Caos y Sistemas Complejos* del Postgrado en Física Fundamental existe una línea de investigación muy activa sobre Sociodinámica, sustentada por la realización de varias tesis y publicaciones relevantes.

En la presente Tesis de Maestría, nos proponemos investigar el efecto de campos localizados, así como la influencia de defectos espaciales en el comportamiento colectivo de sistemas sujetos a la dinámica de interacción social de Axelrod.

En el Capítulo 1 de esta tesis se presenta un resumen del modelo propuesto por Axelrod, junto con su correspondiente formulación matemática. Igualmente, se presenta una revisión de los resultados obtenidos cuando se consideran campos externos y endógenos en este modelo.

En el Capítulo 2 consideramos campos localizados mediante la introducción de elementos *portadores* distribuidos sobre una red cuyo estado es fijo (no cambia con el tiempo), los cuales pueden interactuar unidireccionalmente con sus vecinos, según la dinámica de Axelrod. Estos portadores se pueden interpretar como agentes difu-

sores de un mensaje cultural o propaganda específica. Por interacción unidireccional, significamos que un agente portador puede influir en el cambio de estado de otro agente en el sistema, pero no viceversa. Como parametro de control, utilizaremos la densidad de portadores y estudiaremos el orden colectivo emergente en el sistema en función de esta densidad.

En el Capitulo 3 consideramos, como una variación inmediata de esta idea, el efecto de defectos o huecos en dinámica social: en lugar de agente portadores, colocaremos sitios vacíos, sin dinámica, en la red, con una distribución espacial. Los huecos pueden representar obstáculos geográficos, y su papel en la distribución y emergencia de dominios diferenciados o grupos culturales puede ser relevante.

En el Capitulo 4 estudiamos el efecto de los portadores cuando la topología de la red social cambia. Específicamente, consideraremos redes con interacciones globales (como muchas redes sociales existentes online) que poseen una fracción de agentes portadores.

Por último, en las Conclusiones presentamos una discusión de los resultados del presente trabajo.

Even if there is apparently no science of complexity, there is much science to be learned from studying complex systems. Finally, we have learned that no theory of everything can include every interesting thing.

Leo Kadanoff, Physics Today, agosto 2001.

Capítulo 2

Modelo de influencia cultural de Axelrod.

2.1. Preliminares.

La emergencia de comportamientos colectivos no triviales en sistemas dinámicos espaciotemporales es de gran interés en el estudio de sistemas complejos, como en muchos fenómenos físicos, químicos, biológicos y sociales. En muchos de estos sistemas coexisten tanto interacciones locales como globales.

En el contexto de fenómenos sociales, uno de los problemas más importantes es el origen y persistencia de la diversidad cultural en una sociedad. Entender cómo una cultura puede establecerse, extenderse y sostenerse tiene mucha importancia en el mundo de hoy; nos preguntamos por ejemplo si el inglés se volverá un idioma universal; si las nuevas tecnologías pueden imponerse; si alguna canción o vestido se pondrán de moda; o si grupos minoritarios puedan sobrevivir.

Diversas ideas se han propuesto con el fin de explicar esta diversidad. En este contexto, Robert Axelrod [11] introdujo un modelo dinámico conceptualmente simple, tipo autómatas celulares, basado en agentes que interactúan entre sí, el cual permite estudiar el mecanismo de competencia entre la monoculturalidad y la multiculturalidad de un sistema social. Con este modelo Axelrod responde, en forma general, cuáles son los factores esenciales que determinan que un sistema social sea monocultural o multicultural. Robert Axelrod comienza su ya famoso artículo con 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?"

Este modelo intenta explicar cómo los individuos tienden a parecerse entre sí mediante la interacción cultural, y también cómo esta tendencia a la convergencia se detiene antes de llegar a la uniformidad. El objetivo esencial es entender la manera en que comportamientos colectivos surgen en sistemas sociales. Existen varias definiciones de *cultura*, de las cuales un gran número de sociólogos y antropólogos coinciden en que la cultura es algo que los individuos aprenden unos de otros. Axelrod hace un estudio de todos los modelos y definiciones de cultura y enfatiza que estos modelos tratan cada rasgo de una cultura independientemente de otros rasgos.

Axelrod define cultura como un conjunto de atributos individuales que están sujetos a influencia social, es decir, que pueden ser modificados por efecto de la interacción entre individuos. El modelo no se enfoca en ninguna cultura específica, sino en la forma en la que cualquier cultura puede emerger y difundirse. Además, hay que mencionar que los elementos en este modelo no hacen juicio de valor, ni persiguen ninguna intención. Los individuos son agentes dinámicos adaptativos en lugar de agentes racionales.

Axelrod propone la siguiente definición operativa de cultura: *un conjunto de atributos individuales que están sujetos a influencia social*. En este sentido, todas las culturas son equivalentes y solamente se puede medir cuantitativamente cambios en las mismas. El modelo de dinámica cultural de Axelrod está basado en dos premisas

simples:

1. Homofilia: La probabilidad de interacción entre individuos es proporcional al número de atributos culturales que ellos comparten.
2. Adaptación: La interacción entre individuos incrementa su similitud cultural.

Esto nos dice que dos individuos tienden a interactuar mientras tengan, al menos, algo en común. Además, esta interacción lleva a un aumento en la similitud entre los individuos que interactúan, y una mayor similitud, a su vez, aumenta la probabilidad de interacción.

2.2. Formulación del modelo de Axelrod.

El sistema consiste de N elementos colocados en una red bidimensional con condiciones de contorno no periódicas y vecindad de Von Newman, como se ve en la figura 2.1. El estado c_i de un elemento i es definido con un vector de F componentes $\sigma_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{iF})$. En el modelo de Axelrod, las F componentes (*Features*) de c_i corresponden a los atributos culturales de un agente. Cada componente σ_{if} puede tomar cualquiera de los q valores (*Traits*) en el conjunto $\{0, 1, \dots, q - 1\}$ (llamados rasgos culturales en el modelo de Axelrod). En otras palabras, F da la dimensión del vector cultural, mientras que q determina el número de posibles opciones que puede tener cada atributo. En el modelo de Axelrod, todos los elementos del sistema son equivalentes; es decir, los parámetros F y q son los mismos para todo i . Como condición inicial, a cada agente le es asignado de forma aleatoria e independiente uno de los q^F estados culturales posibles.

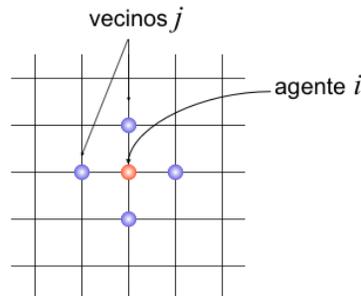


Figura 2.1: Elemento i con una vecindad de 4 elementos.

Ilustremos con un ejemplo. Consideremos un sistema con $F = 3$ y $q = 2$. El número de vectores o estados culturales distintos es $q^F = 2^3 = 8$ y se representa por un color distinto como se muestra en la figura 2.2. Cada elemento i posee un vector cultural F_i con 3 componentes, $F_i = [\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{i3}]$, y cada componente σ_{if} puede adoptar la etiqueta 0 o 1. Por lo tanto, los posibles vectores de estados culturales que se pueden encontrar en el sistema son:

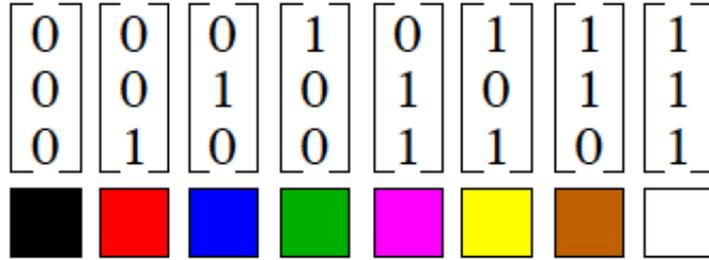


Figura 2.2: Código de colores para $F = 3$ y $q = 2$.

Un ejemplo práctico de una cultura con 3 atributos culturales y 2 opciones por cada atributo en una comunidad de físicos podría ser (trabajo, bebida, sistema operativo). El atributo *trabajo* puede tener las opciones: teórico (0) o experimental (1); *bebida*: café (0) o té (1); y *sistema operativo*: linux (0) o windows (1). En este caso, un físico cuyo vector cultural sea $(0, 0, 0)$, es un teórico que le gusta el café y que prefiere linux en su computador como sistema operativo y está representado por el color negro en la figura.

La dinámica del sistema en el modelo de Axelrod evoluciona de la siguiente forma:

1. Se selecciona al azar un elemento de la red i (elemento activo) y uno de sus vecinos j .
2. Se calcula el número de atributos que comparten estos elementos. Para esto definimos una variable *overlap*,

$$l_{i,j} = \sum_{f=1}^F \delta_{\sigma_{if}, \sigma_{jf}} \quad (2.1)$$

3. Si $0 < l(i, j) < F$, el elemento activo y el vecino seleccionado interactúan con una probabilidad

$$p_{int} = \frac{l(i, j)}{F} \quad (2.2)$$

En caso de interacción, se escoge aleatoriamente un h tal que $\sigma_{ih} \neq \sigma_{jh}$ y se asigna $\sigma_{ih} = \sigma_{jh}$.

Castellano, Marsili y Vespignani [12] estudiaron el comportamiento colectivo de este sistema y encontraron una transición de fase orden-desorden en el modelo de Axelrod. Al estudiar la evolución del modelo para diversos valores del parámetro q , se observa que el sistema puede alcanzar un estado homogéneo o monocultural, en el cual todos los agentes tienen el mismo vector cultural; o un estado heterogéneo o multicultural, en el cual coexisten regiones que poseen vectores culturales diferentes.

Siguiendo una simulación, podemos observar cómo en el sistema se van formando estructuras, tanto las zonas como las regiones culturales, hasta que el sistema se estabilice y sólo queden las regiones culturales estable. La figura 2.3 muestra un ejemplo de dos instantes de tiempo en la evolución del sistema.

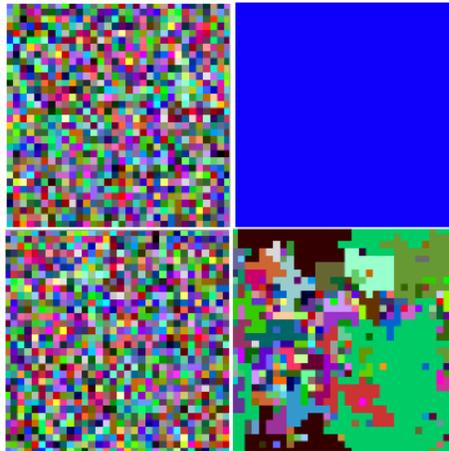


Figura 2.3: Visualización de la evolución del modelo de convergencia cultural. Red bidimensional 50×50 . Izquierda: $t = 0$. Derecha: $t = \infty$. Arriba: $F = 10$ y $q = 5$. Abajo: $F = 10$ y $q = 60$ [29].

A medida que el sistema evoluciona, se van formando regiones culturales identificadas como dominios de un mismo color; se observa que algunos colores o regiones culturales desaparecen mientras otros se multiplican o crecen en tamaño. En la figura 2.3 se observa que en $t = 0$ hay tantas regiones como elementos; en un tiempo posterior el sistema presenta un menor número de regiones culturales debido a la dinámica de convergencia cultural. Eventualmente las interacciones cesan y el sistema se congela, dejando una o varias regiones culturales estables, correspondiente a un estado cultural homogéneo o aun estado multicultural, respectivamente.

2.3. Transición de fase en el modelo de Axelrod.

Se define un dominio como un conjunto de elementos contiguos cuyos vectores de estado son idénticos. Se ha demostrado que el sistema de Axelrod converge a un estado monocultural u homogéneo para valores de $q < q_c$, y a un estado desordenado o multicultural para $q > q_c$, donde q_c es un valor crítico que depende de F [12, 21, 22, 23, 24]. Existe por lo tanto una transición orden-desorden en este sistema fuera de equilibrio [25]. También se ha mostrado que una configuración inhomogénea no es estable y que, con pequeñas perturbaciones actuando sobre estas configuraciones, la dinámica no se detiene; bajo la acción de repetidas perturbaciones de baja intensidad el sistema eventualmente alcanza un estado ordenado para valores de parámetros q donde el sistema se congelaría en un estado multicultural [23].

Para caracterizar la transición de un estado homogéneo a un estado desordenado, se emplea como parámetro de orden el tamaño promedio del dominio más grande en el sistema $\langle S_{max} \rangle / N$ [12, 22]. En el caso de la fase ordenada, $\langle S_{max} \rangle / N = 1$, mientras en el caso de completo desorden, el valor de $\langle S_{max} \rangle / N \rightarrow 0$. Otro parámetro de orden, también usado para caracterizar el comportamiento del sistema, es la fracción media de dominios culturales $g = \langle N_g \rangle / N$, donde N_g es el número de dominios formados en el estado final del sistema para una realización con condiciones iniciales aleatorias distribuidas uniformemente [13]. La Figura 2.4 muestra la curva de la variable g como función del número de opciones q por componente, para $F = 5$, en ausencia de la interacción con un campo ($B = 0$). Para valores de $q < q_c \approx 25$, el sistema

siempre alcanza un estado homogéneo caracterizado por el valor de $g \rightarrow 0$. Por otra parte, para valores de $q > q_c$, el sistema llega una configuración desordenada, para el cual $N_g \rightarrow 1$, también mostrado en la Figura 2.4.

Estos resultados están basados en promedios de 100 realizaciones para un tamaño finito bidimensional de $N = 50 \times 50$ elementos, con condiciones de contorno no periódicas, vecindad de Von Newmann, y $F = 5$.

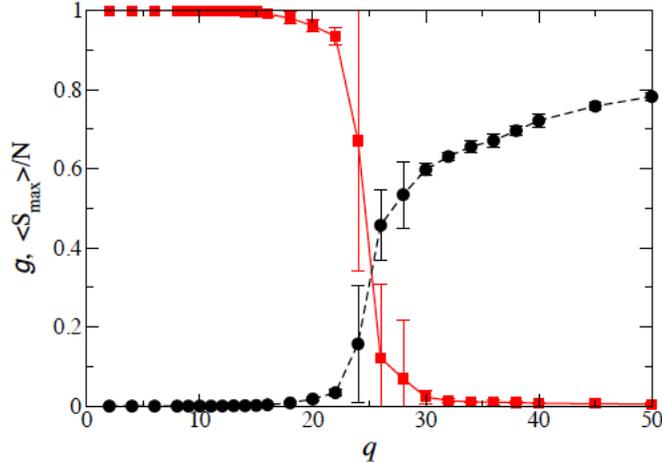


Figura 2.4: Parámetro de orden g (círculos) y $\langle S_{max} \rangle / N$ (cuadrados) como función de q ; $F = 5$. Las barras de error representan más o menos la desviación standard alrededor de cada punto [29].

La Figura 2.5 muestra, para $F = 10$, los valores promedios del parámetro de orden $\langle S_{max} \rangle / N$ como función de q en el estado estable final, obtenido de varias realizaciones con condiciones iniciales aleatorias distintas. La existencia de una transición abrupta en los valores del parámetro de orden alrededor del valor $q_c \approx 54$ es evidente en la figura. La transición resulta mejor definida en el límite termodinámico de N (tamaño del sistema) grande, como puede verse en la figura. Para $q < q_c$ el sistema se estabiliza en un estado monocultural; mientras que para $q > q_c$ el parámetro de orden cae a cero, indicando la existencia de una fase desordenada o multicultural en el sistema.

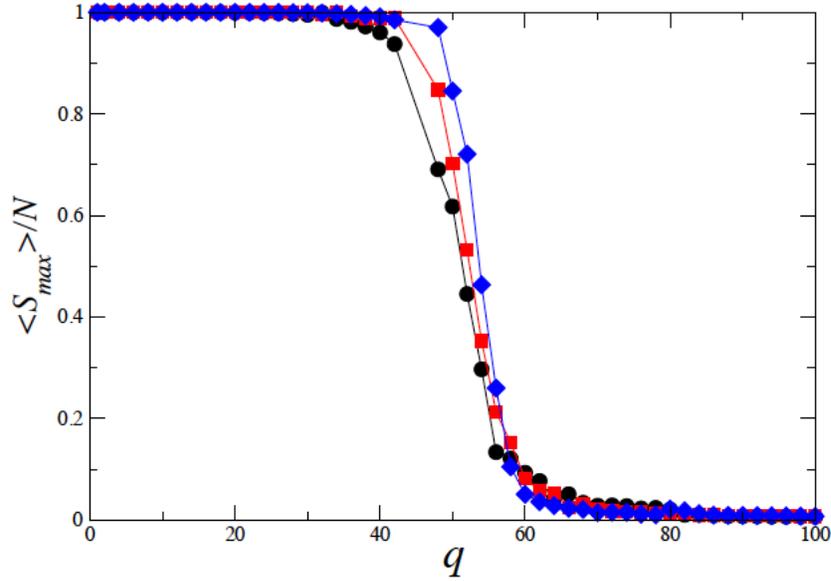


Figura 2.5: Tamaño promedio del dominio mas grande $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q para $F = 10$, $N = 900$ (circulos), $N = 1600$ (cuadrados), $N = 2500$ (diamantes). La transición ocurre en el punto critico $q_c \approx 54$ [29].

2.4. Influencia de campos externos en el modelo de Axelrod.

Gonzalez-Avella, Cosenza y Tucci 3.3 propusieron un modelo de influencia de propaganda en un sistema social, basado en la dinámica de interacción cultural de Axelrod. Ellos introducen la idea de propaganda como una influencia cultural externa que incide con igual probabilidad sobre todos los elementos del sistema, tal como un campo externo uniforme. Se define propaganda como *un vector cultural específico, al cual se desea que todos los elementos del sistema converjan*. Desde el punto de vista de la Física, la propaganda puede verse como un campo externo aplicado sobre el sistema.

Se introduce un vector de estado M con componentes $(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iF})$, donde M representa el campo aplicado. Formalmente se trata el campo actuando sobre cada elemento i como un vecino adicional de i con quien una interacción es posible. El campo está representado como un elemento adicional $\phi(i)$ tal que $\sigma_{\phi(i)f} = \mu_{if}$. La

intensidad del campo está dado por un parámetro con valor constante $B \in [0, 1]$, que mide la probabilidad de interacción con el campo. El sistema evoluciona de la siguiente forma:

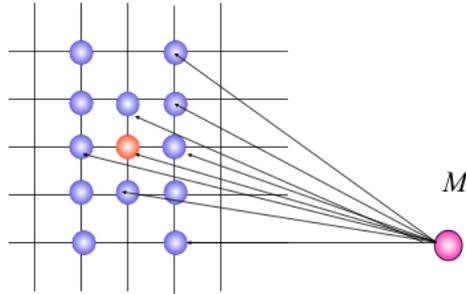


Figura 2.6: Representación de la idea de la propaganda como campo externo constante aplicado al sistema.

1. Se selecciona de forma aleatoria un elemento i de la red (llamado elemento activo).
2. Con probabilidad B el agente i activo interactúa con el campo, o con probabilidad $(1 - B)$ interactúa con uno de sus vecinos escogido aleatoriamente.
3. Se calcula el overlap (número de atributos que comparten estos elementos) entre i y j , $l(i, j) = \sum_{f=1}^F \delta_{\sigma_{if}, \sigma_{jf}}$. Si $0 < l(i, j) < F$, el elemento activo i interactúa con j (con uno de sus vecinos o con el campo) con probabilidad $l(i, j)/F$. En caso de que la interacción se lleve a cabo, se escoge aleatoriamente una de las componentes h del elemento activo tal que $\sigma_{ih} \neq \sigma_{jh}$ y se asigna $\sigma_{ih} = \sigma_{jh}$.
4. Se actualiza el campo M , si se requiere.

La figura 2.7 muestra las curvas $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q para varios valores de B . La curva con $B = 0$ corresponde al modelo original de Axelrod y presenta la transición de fase entre homogeneidad cultural y multiculturalidad en el valor crítico de q reportada por Castellano, Marsili y Vespigniani [12]. El incremento de B trae como consecuencia un decrecimiento del valor crítico de q para la transición de fase. Nótese que

para $B = 0$, el estado homogéneo con $\langle S_{max} \rangle / N = 1$ puede ser cualquiera de los q^F posibles estados culturales del sistema; mientras que para $B > 0$, el estado homogéneo corresponde exclusivamente al estado cultural asociado al vector de propaganda.

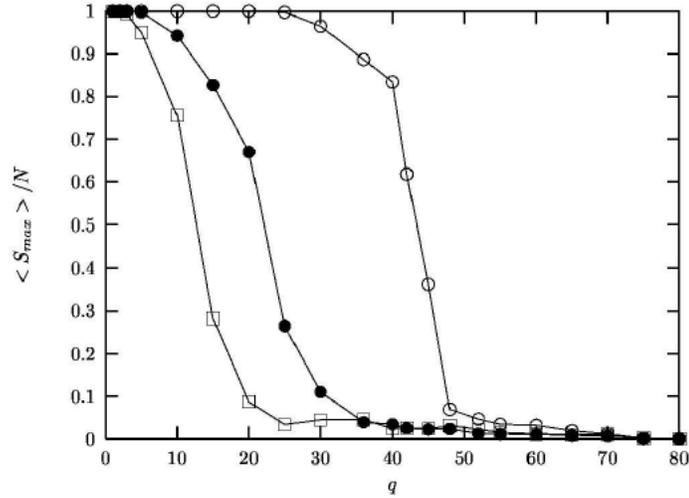


Figura 2.7: Tamaño promedio del dominio mas grande $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q en una red bidimensional 50×50 con $F = 10$, para valores de $B = 0$ (círculos abiertos), $B = 0,5$ (círculos cerrados) y $B = 0,9$ (cuadrados abiertos) [30].

Las simulaciones muestran que la propaganda puede actuar como un mecanismo de control para hacer converger los elementos del sistema al estado cultural específico del vector propaganda cuando la diversidad cultural, medida por q , es menor que un cierto valor crítico. El valor crítico de q para esta convergencia depende del valor de cada B en cada caso, como se ve en la figura 2.7. Recíprocamente, para un q dado la homogeneidad o multiculturalidad depende del valor de B . Por encima de una intensidad crítica B , se observa que el sistema ya no tiende al estado de la propaganda, sino que se desordena; es decir, un campo externo suficientemente intenso induce desorden en el sistema. Este efecto contraintuitivo ha sido denominado *mass media effect* [19].

En la figura 2.8 se muestran algunos estados asintóticos de simulaciones con influencia de propaganda donde se aprecia este comportamiento. Se utilizan escalas de colores para indentificar los diversos estados culturales, y el vector propaganda

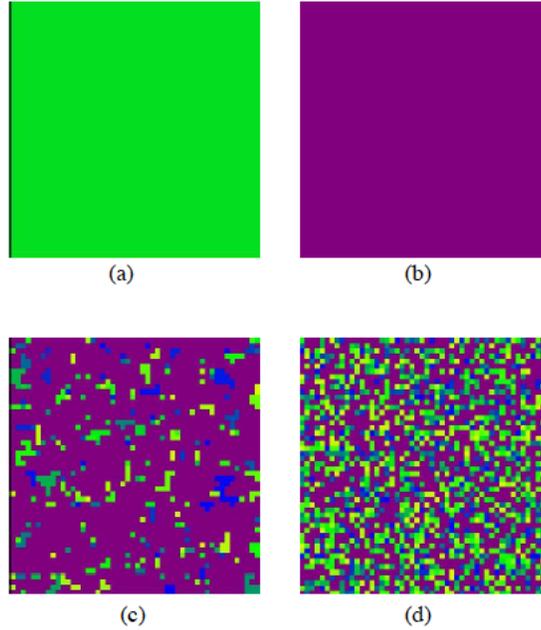


Figura 2.8: Estados asintóticos del sistema social con influencia de propaganda en una red bidimensional 50×50 , con $F = 10$ y $q = 35$. (a) $B = 0$ (b) $B = 0,005$ (c) $B = 0,1$ (d) $B = 0,9$. El estado cultural de la propaganda corresponde al color morado [30].

se identificó con el color morado. Los parámetros para esta simulación son $F = 10$ y $q = 35$, que corresponde a un valor menor al valor crítico de q sin propaganda ($q_c \approx 54$). La figura 2.8(a) muestra el estado estable del sistema sin aplicación de propaganda ($B = 0$). El sistema se estabiliza en un estado homogéneo (un dominio de un solo color) correspondiente a un estado cultural homogéneo como se espera, puesto que el parámetro q está por debajo del valor crítico para este sistema. En la figura 2.8(b) con $B = 0,005$, el sistema converge hacia un estado homogéneo igual al estado de la propaganda (un único dominio de color morado). En este caso podemos decir que la propaganda *controla* al sistema. La figura 2.8(c) muestra que un aumento de la intensidad de la propaganda $B = 0,1$ no conduce a la homogeneidad, aunque el color de la región cultural más grande sigue siendo igual al de la propaganda. Un incremento mayor de $B = 0,9$ produce heterogeneidad o multiculturalidad. Este efecto es notable por ser contraintuitivo: uno esperaría que el incremento de la intensidad de la propaganda conduciría a un mayor control del sistema, en el sentido de la convergencia a la homogeneidad cultural que intenta imponer la propaganda.

Para estudiar el comportamiento de la transición de fase orden-desorden en este sistema con la influencia de la propaganda y tratar de entender su fenomenología se usa los parámetros de orden definidos anteriormente: $g = \langle N_g \rangle / N$ (fracción promedio de grupos o regiones culturales) y $\langle S_{max} \rangle / N$ (tamaño de la región más grande normalizado). La figura 2.9 muestra ambos parámetros de orden en función de q , con $B = 0$. Las barras de error en torno a cada punto corresponden a la desviación standard de 10 simulaciones con condiciones iniciales aleatorias distintas. El valor crítico de q para la transición estado homogéno-multiculturalidad con $B = 0$ se obtiene aproximadamente en $q \approx 54$.

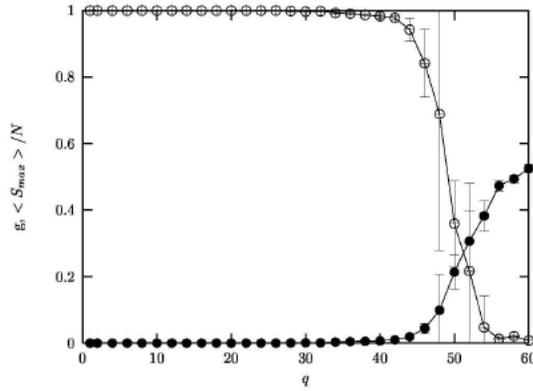


Figura 2.9: Parámetro de orden g (círculos abiertos) y $\langle S_{max} \rangle / N$ (círculos negros) como función de q ; $F = 10$. Las barras de error representan más o menos la desviación standard alrededor de cada punto [30].

La figura 2.10 muestra la frontera crítica B_c vs. q en el espacio de parámetros (B, q) del sistema, para $F = 10$. Esta curva separa el régimen monocultural controlado por la propaganda del estado multicultural del sistema. Si la intensidad de la propaganda sobrepasa cierto umbral, la propaganda ya no logra homogenizar al sistema. La figura 2.10 resume los resultados más importantes encontrados por Gonzalez et al. sobre la influencia de la propaganda en el modelo de convergencia cultural de Axelrod.

En muchos sistemas físicos se observa que un campo externo tiende a ordenar al

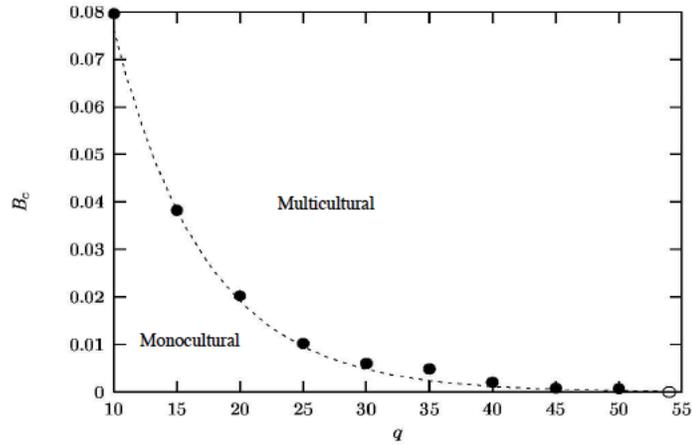


Figura 2.10: Diagrama de fases en el espacio parámetros (B, q) para $F = 10$. La frontera crítica (B_c, q) separa el régimen monocultural controlada por la propaganda del estado multicultural. La línea punteada es un ajuste exponencial. El punto dibujado con el círculo abierto corresponde al valor crítico $q_c \approx 54$ para $B = 0$ [13].

sistema. Por ejemplo, en modelos tipo Ising, se observa que las partículas se alinean con el campo aplicado. Sin embargo, el *mass media effect* revela que este tipo de comportamientos no se pueden extrapolar a sistemas fuera de equilibrio regidos por otro tipo de interacciones. En particular, la dinámica de Axelrod posee estados no interactivos: dos elementos proximos pueden no interactuar si no comparten al menos un atributo en sus vectores de estado. Se trata de interacciones determinadas por un umbral o condición que debe satisfacerse. En el caso de la propaganda global, lo que determina la convergencia a ese estado es la existencia de estados interactivos entre los elementos y el campo externo; para valores grandes de q existen elementos en estados que no comparten atributos con el campo y por lo tanto no pueden converger a ese estado. Este es el origen del *mass media effect*.

*Ninguna prueba, ninguna rectificación ni desmentido,
puede anular el efecto de una propaganda bien hecha.*

Hermann Keyserling.

Capítulo 3

Campos localizados en el modelo de Axelrod.

Como vimos en el capítulo anterior, la inclusión de campos en el modelo de Axelrod ha permitido construir modelos de la influencia de medios de comunicación masivos en sistemas sociales [13, 17]. En particular, estos trabajos pueden ser interpretados como modelos de la influencia de propaganda o publicidad en una sociedad [18]. El resultado más importante de estos modelos es el descubrimiento de un fenómeno no trivial que se ha denominado *mass media effect* [19]: un campo externo global (o propaganda) suficientemente intenso induce desorden en un sistema social.

En este capítulo nos proponemos investigar el efecto de campos localizados en el comportamiento colectivo de sistemas sujetos a la dinámica de interacción social de Axelrod. Específicamente, consideramos elementos localizados en una red como *portadores* de un mensaje cultural fijo (no cambia en el tiempo), los cuales pueden interactuar unidireccionalmente con sus vecinos, según la dinámica de Axelrod. Por unidireccional, significamos que un agente portador puede influir en el cambio de estado de otro agente en el sistema, pero no viceversa. Como parámetro de control, utilizaremos la densidad de portadores y estudiaremos el orden colectivo en el sistema de esta densidad.

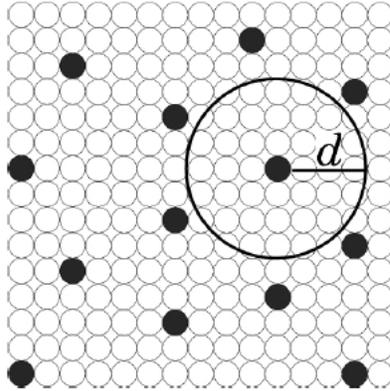


Figura 3.1: Celdas activas (círculos abiertos), portadores (círculos en negro). Los portadores son colocados aleatoriamente a una distancia radial mínima de d entre ellas.

La densidad de portadores (círculos negros en la figura) se expresa en función de la distancia mínima entre portadores, d . Como parámetro de orden colectivo, calcularemos el tamaño normalizado del dominio (o grupo cultural) más grande en el sistema, $\langle S_{max} \rangle / N$. Cuando $\langle S_{max} \rangle / N = 1$, el sistema se encuentra en un estado colectivo ordenado (todos los vectores son iguales), mientras que cuando $\langle S_{max} \rangle / N \rightarrow 0$, el sistema está en un estado desordenado (muchos dominios pequeños). Este modelo permite comparar el efecto de un campo localizado con el efecto de un campo externo en dinámica social. En particular, el modelo propuesto se puede interpretar como un modelo de propaganda espacialmente distribuida (tales como agentes propagandísticos, vallas publicitarias, etc). La analogía física corresponde a un medio con impurezas o defectos.

La forma en la que introduciremos los portadores en la red es similar a la empleada en la referencia [26]: primero se selecciona una celda al azar en la red y ésta se etiqueta como portador, esto significa que esta celda nunca será seleccionada como un agente activo pero si puede ser seleccionada como vecino del agente activo. Alrededor del elemento portador se crea una zona circular de exclusión de radio d en la que no puede haber otra portador, como lo ilustra la figura 3.1. Este proceso se repite seleccionando al azar nuevas celdas fuera del radio de exclusión de las celdas ya seleccionadas hasta que no sea posible introducir otro portador más en la red.

La figura 3.2 muestra la relación que existe entre la densidad de portadores ρ y el radio de exclusión d . De ella se obtiene que $\rho = 0,625d^{-2}$.

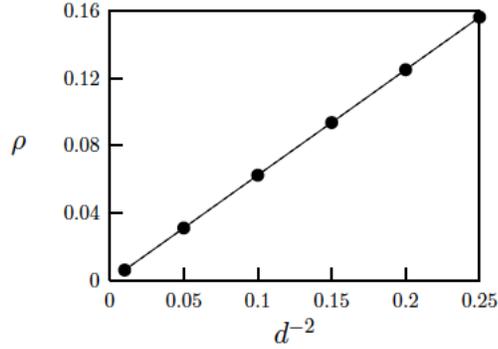


Figura 3.2: La relación entre ρ y d^{-2} en escala logarítmica. $\rho = 0,624d^{-2}$ [26].

Para caracterizar la transición de un estado homogéneo a un estado desordenado, consideraremos como parámetro de orden el tamaño promedio del dominio más grande normalizado $\langle S_{max} \rangle / N$. En el caso de la fase ordenada, $\langle S_{max} \rangle / N = 1$ lo cual significa que en el sistema todos los elementos poseen vectores culturales idénticos entre sí e idénticos a los portadores, mientras en el caso de completo desorden, el valor de $\langle S_{max} \rangle / N \rightarrow 0$ mostrando que existen muchos dominios pequeños.

3.1. Influencia de portadores en el modelo de Axelrod.

El sistema consiste de $N = 50 \times 50$ elementos puestos en una red bidimensional con condiciones de contorno periódicas y vecindad de von Newman y $F = 10$. Las cantidades estadísticas se promedian sobre 10 realizaciones de condiciones iniciales.

La figura 3.3 muestra las curvas $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q para varios valores de ρ . Esta figura muestra la presencia de una transición de fase entre homogeneidad cultural y multiculturalidad para un valor crítico q_c , que depende de la densidad de portadores

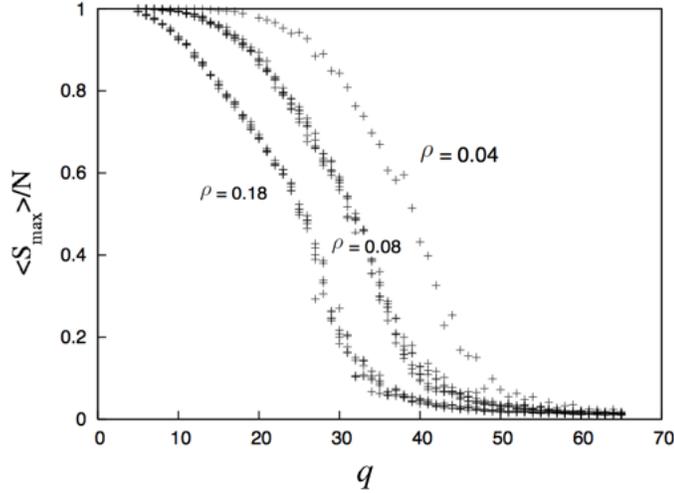


Figura 3.3: Tamaño promedio del dominio mas grande $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q en una red bidimensional 50×50 con $F = 10$, para valores de $\rho = 0,04$, $\rho = 0,08$ y $\rho = 0,18$.

ρ . El incremento de ρ trae como consecuencia un decrecimiento del valor crítico de q_c para la transición de fase. Los valores críticos de q corresponden a los puntos que presentan la mayor desviación standard de $\langle S_{max} \rangle / N$.

La figura 3.4 muestra la frontera crítica ρ_c vs. q en el espacio de parámetros (ρ, q) del sistema, para $F = 5$ y $F = 10$. Esta curva separa el régimen monocultural, controlado por los portadores del estado multicultural del sistema. Si la densidad de los portadores sobrepasa cierto umbral, éstos no logran imponer su estado a todo el sistema.

Este comportamiento es análogo al *mass media effect* que se observa con un campo externo global. Si hay demasiados portadores, éstos inducen heterogeneidad en el sistema. Podríamos llamar a este fenómeno *localized mass media effect*. Sin embargo, en este caso el campo aplicado está distribuido no uniformemente en la red. Nuestros resultados sugieren que el origen del campo aplicado, sea global o local, es irrelevante: la existencia de estados no interactivos implica que siempre existe una probabilidad de no interactuar con el campo, cualquiera sea su naturaleza.

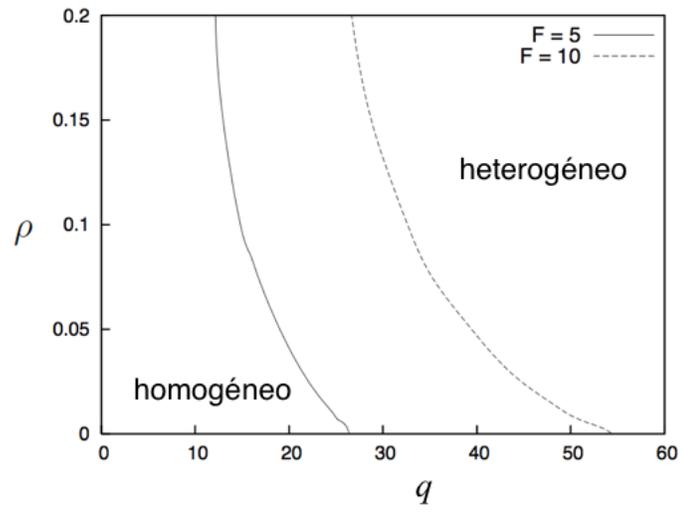


Figura 3.4: Diagrama de fases en el espacio parámetros (ρ, q) para $F = 5$ y $F = 10$. La frontera crítica (ρ_c, q) separa el régimen monocultural del estado multicultural.

We physicists are like Columbus, not really knowing what we are doing, but nevertheless doing something important.

Dietrich Stauffer.

Capítulo 4

Defectos espaciales en el modelo de Axelrod.

Una variación inmediata de la idea de los portadores introducida en el Capitulo anterior consiste en considerar el efecto de defectos espaciales, tales como obstáculos o huecos, en el modelo de dinámica social de Axelrod. En lugar de agentes portadores, podemos colocar sitios vacíos, sin dinámica distribuidos sobre la red. Los defectos pueden representar obstáculos geográficos, y su papel en la formación de dominios diferenciados o grupos culturales es relevante en situaciones reales.

De hecho, este problema fue propuesto por Axelrod con el nombre de *terrain effects* en su famoso artículo [11], como una extensión a realizar en trabajos futuros. En este capitulo nos proponemos desarrollar este estudio pendiente en el modelo de Axelrod.

La forma en la que introduciremos los huecos en la red sigue el mismo procedimiento que hicimos para ubicar portadores en el sistema: primero se selecciona una celda al azar en la red y ésta se desactiva, de tal manera que sólo ocupe un espacio en

la red pero no interactúe con ninguna otra celda del sistema. Alrededor de la celda inactiva se crea una zona circular de exclusión de radio d en la que no puede haber otra celda inactiva como lo ilustra la figura 3.1. Este proceso se repite seleccionando al azar nuevas celdas fuera del área de exclusión de las celdas ya seleccionadas hasta que no sea posible introducir otra impureza más en la red. Las densidades de huecos que estamos utilizando están muy por debajo del límite de percolación en dos dimensiones.

La figura 4.1 muestra las curvas $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q para diferentes valores de ρ . La cantidad $\langle S_{max} \rangle$ se calcula sobre el tamaño efectivo de la red sin huecos. Esta figura muestra una transición de fase entre homogeneidad cultural y multiculturalidad para un valor crítico q_c que depende de la densidad de huecos ρ . El incremento de ρ trae como consecuencia un decrecimiento del valor crítico de q_c para la transición de fase.

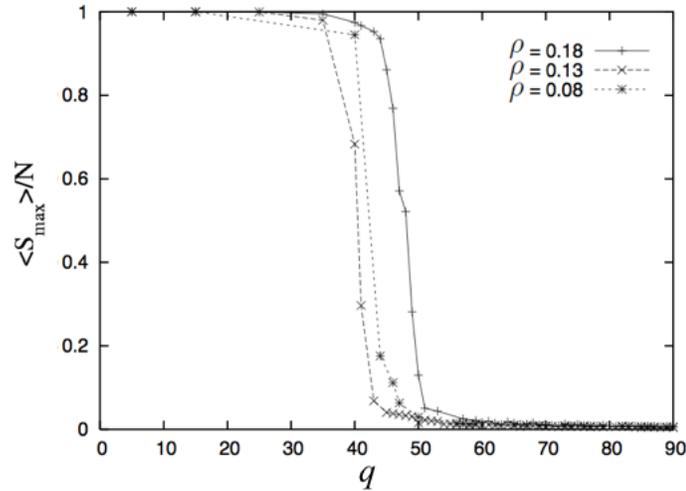


Figura 4.1: Tamaño promedio del dominio mas grande $\langle S_{max} \rangle / N$ vs q en una red bidimensional 50×50 con $F = 10$, para valores de densidad de huecos $\rho = 0,08$, $\rho = 0,13$ y $\rho = 0,18$.

La figura 4.2 muestra la frontera crítica ρ_c vs. q en el espacio de parámetros (ρ, q) del sistema, para $F = 5$ y $F = 10$. Esta curva separa el régimen monocultural del estado multicultural del sistema. Si la densidad de huecos sobrepasa cierto valor crítico, el sistema no puede alcanzar un estado homogéneo.

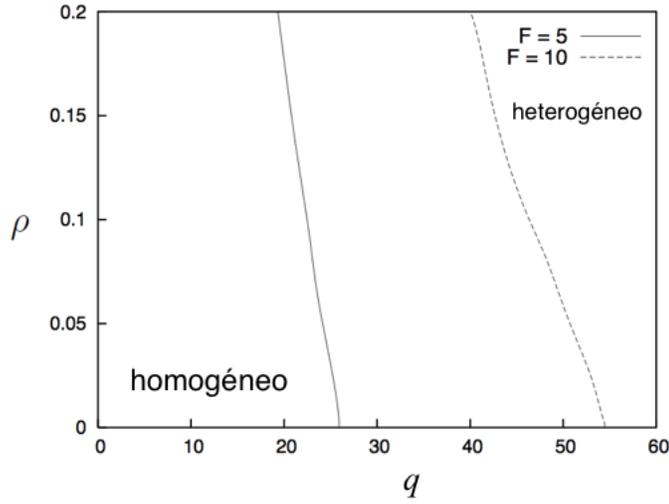


Figura 4.2: Diagrama de fases en el espacio parámetros (ρ, q) para $F = 5$ y $F = 10$. La frontera crítica (ρ, q) separa el régimen monocultural del estado multicultural.

La figura 4.3 muestra las fronteras entre las fases homogéneas y heterogéneas en el espacio de parámetros (ρ, q) para el modelo de Axelrod con portadores y con huecos. La línea continua divide el estado heterogéneo del homogéneo en el sistema con portadores, mientras la línea segmentada representa la frontera en el sistema con defectos. Se observa que la línea continua está por debajo de la línea segmentada, lo cual indica que la presencia de portadores favorece la heterogeneidad en mayor grado que la presencia de defectos. La diferencia funcional entre los sistemas con defectos y con portadores se debe a la mayor influencia que tiene los portadores en su entorno. Cualitativamente, tanto la influencia de los portadores como de los huecos en el sistema es similar a la influencia que tiene una propaganda en un sistema de Axelrod, estudiado por Gonzalez-Avella y colaboradores [13], donde un campo externo actúa sobre el sistema a través del parámetro B que controla la intensidad con la que el campo actúa sobre en el sistema.

En el caso del sistema con huecos, el incremento de la densidad ρ induce desorden debido a que consecuentemente el tamaño efectivo del sistema se reduce. Esto implica que existe un mayor número de opciones por elemento y, por lo tanto, menos probabilidad de interacción y de convergencia a un estado homogéneo medida que

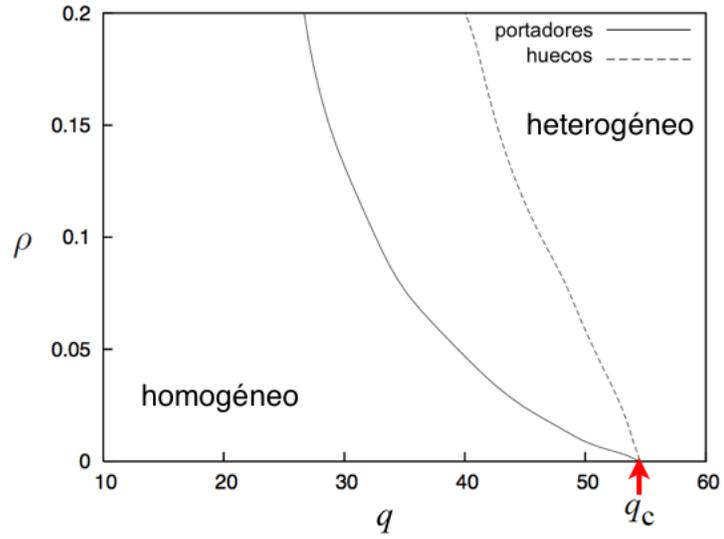


Figura 4.3: Diagrama de fases en el espacio parámetros (ρ, q) para el modelo con portadores (línea continua) y con huecos (línea segmentada). $F = 10$. La frontera crítica (ρ, q) separa el régimen monocultural del estado multicultural.

ρ aumenta.

The task is, not so much to see what no one has yet seen; but to think what nobody has yet thought, about that which everybody sees.

Erwin Schrödinger.

Capítulo 5

Influencia de portadores en sistemas con interacciones globales.

5.1. Acoplamiento global en el modelo de Axelrod.

Como una extensión del modelo de Axelrod con portadores localizados, en este Capítulo estudiaremos sistemas con acoplamiento global.

El acoplamiento global consiste en que cada elemento puede interactuar con cualquier otro elemento que pertenece al sistema. En éste caso, el concepto de espacio o distancia es irrelevante. Sistemas globalmente acoplados han sido ampliamente estudiados en el contexto de redes de mapas caóticos [27, 28].

Se ha encontrado que el acoplamiento global induce una serie de comportamientos colectivos no triviales, tales como la formación de dominios (clusters) sincronizados, comportamiento no estadístico de variables macroscópicas, entre otros [27, 28].

En el contexto social, el avance de la globalización se puede interpretar como

una tendencia hacia un acoplamiento global. El acceso a internet, las telecomunicaciones, redes sociales online, televisión satelital y por cable, hacen que individuos puedan interactuar o estar en contacto con cualquier otro, independientemente de las distancias geográficas.

Gonzalez-Avella y colaboradores [17] han mostrado cómo el efecto de un campo externo o propaganda en un sistema con acoplamiento global en el modelo de Axelrod genera un comportamiento colectivo no trivial en el cual un grupo del sistema se ordena en un estado diferente al impuesto por el campo. Este comportamiento no ocurre en redes regulares, sino que se presenta en redes con interacciones de largo alcance (redes globalmente acopladas, small-world networks, random y scale-free networks).

Con el fin de presentar posteriormente una comparación de nuestro modelo con los resultados de Gonzalez-Avella y colaboradores [17], a continuación hacemos una breve descripción de esos resultados.

Las reglas de interacción en el modelo globalmente acoplado con un campo externo son las mismas mostradas en la sección 2.4. La figura 5.1 muestra el tamaño del dominio más grande normalizado $S = \langle S_{max} \rangle / N$ en función de q , para distintos valores de B . Para $B = 0$ (círculos sólidos) el sistema se ordena para valores $q < q_c$. Para $B \rightarrow 0$ y $q < q_c$, el campo externo ordena al sistema como en el caso de dos dimensiones. Para $B = 1$ (estrellas) los elementos sólo interactúan con el campo; en este caso sólo los elementos que comparten al menos un atributo de su vector de estado con el campo convergerán al estado impuesto por éste.

Para valores intermedios de B , se observa un mínimo local para $q < q_c$ que depende de B . Para entender este mínimo, la figura 5.1(b) muestra la cantidad $\sigma = S - S_M$ en función de q , donde S_M es el tamaño promedio normalizado del dominio cuyo estado es igual al del campo externo. Para $q < q^*$, el dominio más grande corresponde al estado impuesto por el campo, $S = S_M$, y por lo tanto $\sigma = 0$. Para $q > q^*$, el dominio más grande no corresponde al estado del campo externo M^f , sino que se forma un dominio de elementos con estado diferente al del campo,

por lo que $S > S_M$ y $\sigma > 0$. Para valores grandes de q , $S \rightarrow 0$ y $S_M \rightarrow 0$, como consecuencia $\sigma = 0$.

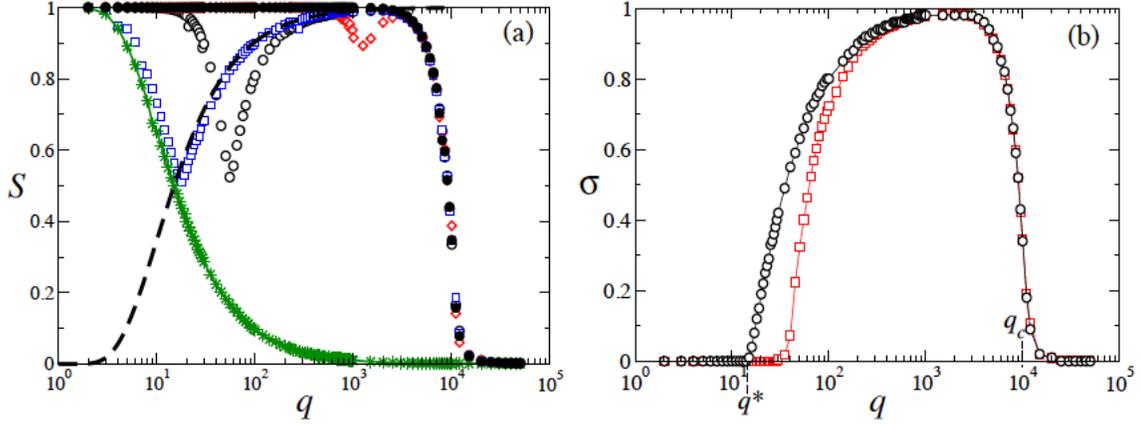


Figura 5.1: (a) Tamaño promedio del dominio mas grande $S = \langle S_{max} \rangle / N$ vs q , $N = 2500$, $F = 10$. para $B = 0$ (círculos sólidos), $B = 0,005$ (diamantes), $B = 0,05$ (círculos abiertos), $B = 0,5$ (cuadrados), $B = 1$ (estrellas). La línea continua es la curva analítica $1 - (1 - 1/q)^F$, la línea punteada es la curva $(1 - 1/q)^F$. (b) $\sigma = S - S_M$ vs q para $B = 0,8$ (círculos) y $B = 0,1$ (cuadrados). Cada punto es un promedio sobre 100 realizaciones independientes [17].

La figura 5.2 muestra las tres fases existentes en este modelo en el espacio de parametros (q, B) . (I) Para $q < q^*$ se observa una fase en la cual los elementos se encuentran ordenados y sus estados corresponden al impuesto por el campo, para el cual $\sigma = 0$ y $S = S_M \approx 1$; (II) para $q^* < q < q_c$ se consigue una fase en la que los elementos se encuentran ordenados, pero en un estado diferente al del campo, $\sigma \neq 0$ y $S > S_M$, con $S \approx 1$; y (III) para $q > q_c$ una fase en la que $\sigma = 0$ y $S \rightarrow 0$ y $S_M \rightarrow 0$.

Ahora, en lugar de un campo externo, vamos a introducir una fracción de portadores en el sistema, cuyos estados son idénticos y fijos. La fracción de portadores se designa por ρ . Las reglas de interacción en el modelo globalmente acoplado con portadores siguen siendo las mismas, pero ahora el entorno de cada individuo es todo el sistema.

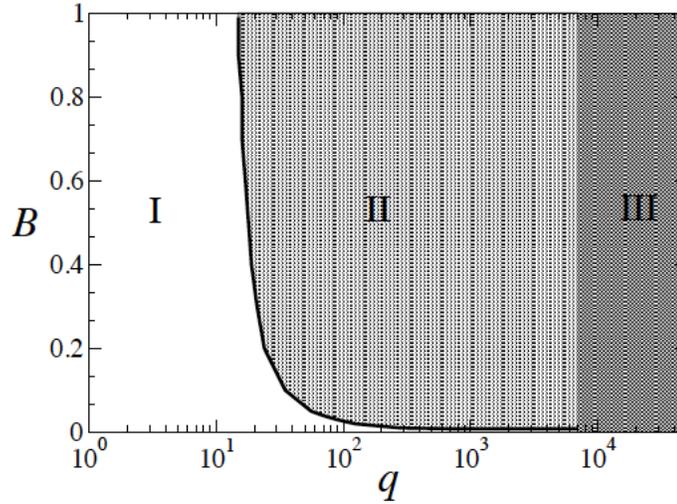


Figura 5.2: Espacio de fase en el plano (q, B) con $F = 10$. Las fases están indicadas [17].

La figura 5.3 muestra el tamaño del dominio más grande normalizado en el subconjunto de elementos no portadores, denotado por $\langle S_{max} \rangle / N(1 - \rho)$, en función de q , para diferentes valores de la densidad de portadores ρ . Para $\rho = 0$ (círculos sólidos), el sistema se ordena para valores $q < q_c$. Para $\rho \rightarrow 0$ y $q < q_c$, el sistema se ordena en un estado igual al de los portadores, como en el caso de dos dimensiones. Para $\rho \geq 0,5$ (estrellas), sólo los elementos que comparten al menos un atributo de su vector de estado con los portadores convergerán al estado impuesto por éstos.

Para $\rho = 0,1$, se observa un mínimo local para $q < q_c$ que depende de ρ . Para entender este mínimo, graficamos en la figura 5.4) la cantidad $\sigma = S - S_M$ en función de q . Para $q < q^*$, el dominio más grande corresponde al estado impuesto por los portadores, $S = S_M$, y por lo tanto $\sigma = 0$. Para $q > q^*$, el dominio más grande en el subconjunto de no portadores ya no corresponde al estado de los portadores, sino que este dominio adquiere espontáneamente un estado diferente al de los portadores, por lo que $S > S_M$ y $\sigma > 0$. Para valores grandes de q , $S \rightarrow 0$ y $S_M \rightarrow 0$, como consecuencia $\sigma = 0$.

Al igual que en el caso mostrado por Gonzalez-Avella et al. [17], en nuestro modelo se observan tres fases bien definidas. La figura 5.5 muestra las tres fases existentes

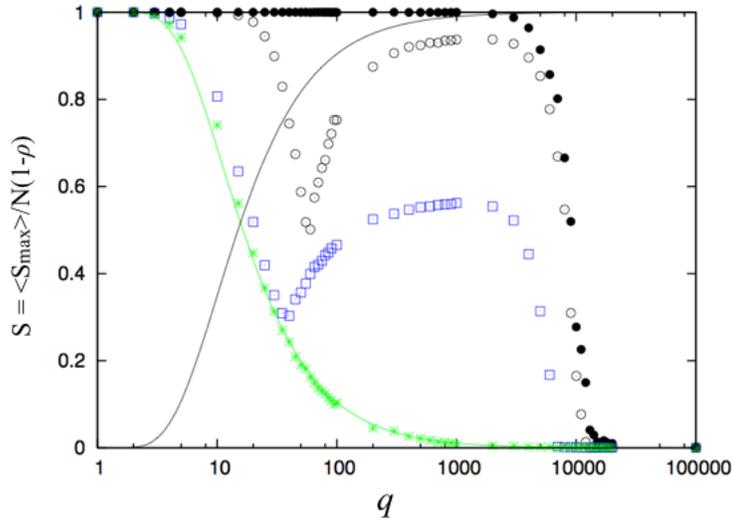


Figura 5.3: Tamaño promedio del dominio mas grande $S = \langle S_{max} \rangle / N(1 - \rho)$ vs q , $N = 2500$, $F = 10$. para $\rho = 0$ (círculos sólidos), $\rho = 0,1$ (círculos abiertos), $\rho = 0,3$ (cuadrados), $\rho \geq 0,5$ (estrellas). La linea continua es la curva analítica $1 - (1 - 1/q)^F$, la linea punteada es la curva $(1 - 1/q)^F$. Cada punto es un promedio sobre 10 realizaciones independientes.

en el espacio de parametros (q, ρ) . (I) Para $q < q^*$ se observa una fase en la cual los elementos se encuentran ordenados y sus estados corresponden al impuesto por los portadores, para el cual $\sigma = 0$ y $S = S_M \approx 1$; (II) para $q^* < q < q_c$, se consigue una fase en la que los elementos se encuentran ordenados pero en un estado diferente al de los portadores, $\sigma \neq 0$ y $S > S_M$; y (III) para $q > q_c$ una fase en la que $\sigma = 0$ y $S \rightarrow 0$ y $S_M \rightarrow 0$.

El surgimiento de la fase II implica un ordenamiento espontáneo en contra del estado transmitido por los portadores. Consideramos que éste resultado es de mucha relevancia en dinámica social, especialmente en las redes sociales con interacciones globales como las redes online (Twitter, Facebook, Messenger) actuales. La emergencia de grupos con culturas u opiniones alternativas al que trata de ser impuesto por un grupo de agentes propagandísticos en redes con interacciones globales podría contribuir a explicar fenómenos sociales y políticos observados en Europa y en Países Arabes en tiempos recientes.

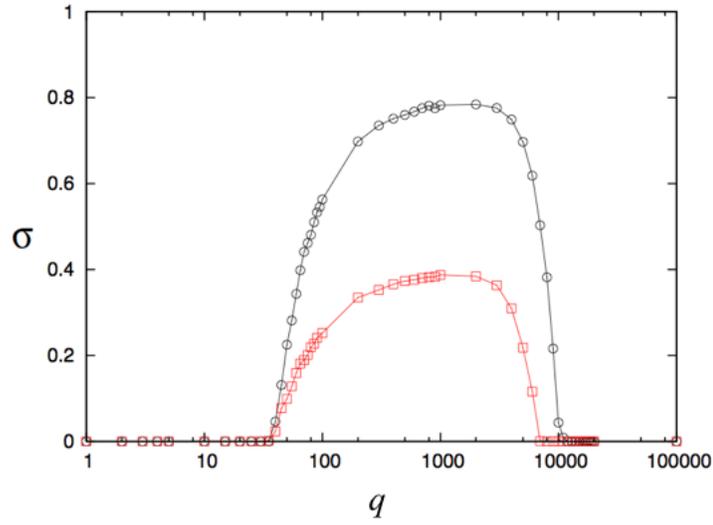


Figura 5.4: Diferencia entre tamaño promedio del dominio mas grande y grupo de elementos portadores $\sigma = S - S_M$ vs q para $\rho = 0,1$ (círculos) y $\rho = 0,3$ (cuadrados). $N = 2500$, $F = 10$. Cada punto es un promedio sobre 10 realizaciones independientes.

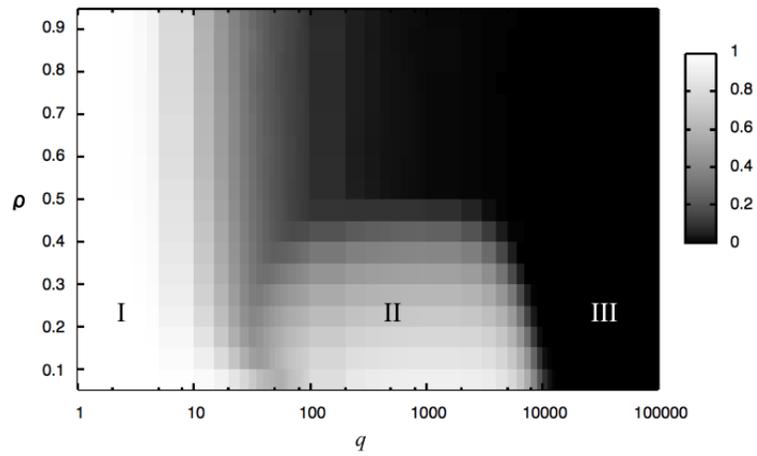


Figura 5.5: Espacio de fase en el plano (q, ρ) con $F = 10$. Las fases están indicadas.

*Without doubt there are
many exciting discoveries
still waiting to be made.*

M. E. J. Newman.

Capítulo 6

Conclusiones

En los últimos años, el modelo de influencia cultural de Axelrod [11] se ha convertido en un paradigma para la investigación de dinámica social [10]. Este modelo corresponde a un sistema fuera de equilibrio que consiste en una red de agentes sujetos a interacciones entre vecinos. La característica esencial de la dinámica de interacción de Axelrod, es la coexistencia de estados interactivos y no interactivos. Esta propiedad corresponde a sistemas con interacciones selectivas o con umbrales, y ocurre en muchos sistemas sociales y biológicos. El modelo de Axelrod exhibe una transición de fase orden-desorden para un valor crítico del número de opciones, lo cual ha permitido establecer diversas analogías con sistemas físicos.

La inclusión de campos en el modelo de Axelrod, tanto externos como endógenos, ha permitido construir modelos de la influencia de medios de comunicación masivos en sistemas sociales [13, 14, 15, 16, 17]. En particular, estos trabajos pueden ser interpretados como modelos de la influencia de propaganda o publicidad en una sociedad [18]. El resultado más importante de estos modelos es el descubrimiento de un fenómeno no trivial que se ha denominado *mass media effect* [19]: un campo (o propaganda) suficientemente intenso induce desorden en un sistema social. Sin embargo, hasta antes de la presente tesis, se había considerado principalmente la

influencia de campos externos globales, o de campos autónomos contruidos con información global o parcial del sistema (retroalimentación).

En esta Tesis hemos investigado el efecto de campos localizados, así como la influencia de defectos espaciales, en el comportamiento colectivo de sistemas sujetos a la dinámica de interacción social de Axelrod.

Hemos considerado campos localizados mediante la introducción de elementos *portadores*, cuyo estado es fijo, distribuidos sobre una red bidimensional. Estos portadores pueden interactuar unidireccionalmente con sus vecinos, según la dinámica de Axelrod. Los portadores se pueden interpretar como agentes difusores de un mensaje cultural o propaganda específica. También hemos estudiado el efecto de defectos o huecos en dinámica social. Los huecos pueden representar obstáculos geográficos.

Hemos encontrado que si hay demasiados portadores, éstos inducen heterogeneidad en el sistema. En el caso del sistema con huecos, el incremento de la densidad induce desorden debido a que consecuentemente el tamaño efectivo del sistema se reduce. Esto implica que existe un mayor número de opciones por elemento y, por lo tanto, menos probabilidad de interacción y de convergencia a un estado homogéneo medida que la densidad de huecos aumenta.

Hemos encontrado un comportamiento colectivo similar en ambos casos. Cuando la densidad de portadores o de huecos excede un correspondiente valor crítico, el sistema se desordena en un rango de parámetros para el cual debería ser homogéneo en ausencia de campos. Estos resultados son análogos al *mass media effect* observados con campos externos globales y con campos autónomos en redes bidimensionales, donde en lugar de densidad, existe un parámetro que describe la intensidad del campo.

Nuestros resultados sugieren que el origen del campo aplicado, sea externo global, autónomo o localizado, es irrelevante: la existencia de estados no interactivos implica que siempre existe una probabilidad de no interactuar con el campo, cualquiera sea su naturaleza, y por lo tanto el campo no siempre produce un efecto de

ordenamiento.

Finalmente, hemos considerado el efecto de portadores en redes con interacciones globales, tales como muchas redes sociales existentes online. Hemos encontrado un resultado contraintuitivo: el surgimiento de un ordenamiento espontáneo en contra del estado transmitido por los portadores. Un comportamiento similar se observó en un sistema globalmente acoplado sujeto a un campo externo uniforme. Consideramos que nuestros resultados son de mucha relevancia en dinámica social, especialmente en las redes sociales con interacciones globales como las redes online actuales (Twitter, Facebook, Messenger). La emergencia de grupos con culturas u opiniones alternativas al que trata de ser impuesto por un grupo de agentes propagandísticos en redes con interacciones globales podría contribuir a explicar fenómenos sociales y políticos ocurridos en tiempos recientes.

Bibliografía

- [1] K. Kaneko, I. Tsuda; *Complex Systems: Chaos and Beyond*, Springer (2000).
- [2] R. Badii, A. Politi; *Complexity*, Cambridge University Press (1997).
- [3] A. Mikhailov, V. Calenbuhr; *From Swarms to Societies; Models of Complex Behavior*, Springer (2002).
- [4] H. G. Schuster; *Complex Adaptive Systems*, Scator-Verlag (2002).
- [5] N. Boccara; *Modeling Complex Systems*, Springer (2004).
- [6] A. Barabási, *Linked; The New Science of Networks*, Perseus Publishing Co. (2002).
- [7] M. Newman, A. Barabasi, D. Watts, *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton University Press (2006).
- [8] Barrat, A., Barthelemy, M., Vespigniani, A., *Dynamical Processes on Complex Networks*, Cambridge University Press (2008).
- [9] B. K. Chakrabarti, A. Chakraborti, A. Chatterjee (Editors), *Econophysics and Sociophysics: Trends and Perspectives*, Wiley (2006).
- [10] C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto, *Statistical physics of social dynamics*, *Rev. Mod. Phys.* 81, 591-646 (2009).
- [11] R. Axelrod, *J. Conflict Res.* 41, 203 (1997).
- [12] C. Castellano, M. Marsili, A. Vespigniani, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3536 (2000).
- [13] J.C. González-Avella, M. G. Cosenza, K. Tucci, *Phys. Rev. E (Rapid Communications)* 72, 065102(R) (2005)

- [14] J.C. González-Avella, V. Eguiluz, M. G. Cosenza, K. Klemm, J. L. Herrera, M. San Miguel, *Phys. Rev. E* 73, 046119 (2006).
- [15] J.C. González-Avella, M. G. Cosenza, K. Klemm, V. M. Eguiluz, M. San Miguel. *J. Artificial Societies and Social Simulation* 10, No. 3, 9 (2007).
- [16] A. Parravano, H. Riviera-Ramirez, M. G. Cosenza, *Physica A* 379, 241 (2007).
- [17] J.C. González-Avella, M. G. Cosenza, V. M. Eguiluz, M. San Miguel. *New Journal of Physics* 12, 013010 (2010).
- [18] M. G. Cosenza, K. Tucci, J.C. González-Avella, *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV* 22, 37 (2007).
- [19] L. R. Peres, J. F. Fontanari, arXiv: 1106.0281v1 (2011).
- [20] K. Tucci, *Procesos diámicos espaciotemporales en redes inhomogéneas*. Tesis Doctoral, Postgrado en Física Fundamental, Universidad de Los Andes (2002).
- [21] D. Vilone, A. Vespigniani, and C. Castellano, *Eur. Phys. J. B* 30, 299 (2002).
- [22] K. Klemm, V. M. Eguiluz, R. Toral, and M. San Miguel, *Phys. Rev. E* 67, 026120 (2003).
- [23] K. Klemm, V. M. Eguiluz, R. Toral, and M. San Miguel, *Phys. Rev. E* 67, 045101 (2003).
- [24] K. Klemm, V. M. Eguiluz, R. Toral, and M. San Miguel, *J. Economic Dynamics Control* 29, 321 (2005).
- [25] K. Klemm, V. M. Eguiluz, R. Toral, and M. San Miguel, *Physica A*, 327, 1 (2003).
- [26] C. Echeverria, *Crecimiento y formación de fases en medios heterogéneos*. Tesis Doctoral, Postgrado en Física Fundamental, Universidad de Los Andes (2007).
- [27] K. Kaneko, *Phys. Rev. Lett.* 65, 1391 (1990).
- [28] M. G. Cosenza y J. González, *Prog. Theor. Phys.* 100, 21 (1998).

- [29] J.C. González-Avella, Coevolution and local versus global interactions in collective dynamics of opinion formation, cultural dissemination and social learning. Tesis Doctoral, Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (2010).
- [30] J.C. González-Avella, Efecto de la propaganda en un modelo dinámico espacio-temporal de influencia cultural. Tesis Licenciatura, Postgrado en Física Fundamental, Universidad de Los Andes (2003).