



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

ROLANDO GARCÍA BOUTIGE Y GERMINAL COCHO GIL. DOS APROXIMACIONES FILOSÓFICAS  
EN MATERIA DE COMPLEJIDAD

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRA EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

PRESENTA:

JACKELINE ARGUELLO LEMUS

TUTOR:

MARÍA DE LA PAZ RAMOS LARA (CEIICH, UNAM)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

AGOSTO DE 2016.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Dedico esta investigación a Bertha Lemus Angulo, mi madre.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo del consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de agosto de 2014 a julio de 2016 para la realización de esta tesis y a la Universidad Nacional Autónoma de México por las oportunidades brindadas.

Me permito expresar en estas líneas mi más profundo agradecimiento a la Dra. María de la Paz Ramos Lara por su valiosa guía durante la realización del proyecto. Su dedicación, paciencia y conocimientos fueron indispensables para la conclusión del mismo. Asimismo, deseo agradecer al Dr. Gustavo Martínez Mekler, al Dr. Juan Carlos García, al Dr. Alfonso Sánchez y al Dr. Alfonso Arroyo-Santos por sus enriquecedoras aportaciones. Su perspectiva fue fundamental en el proceso.

## Índice

### CONTENIDO

<b>Introducción:</b> .....	4
<b>Los sistemas complejos de Rolando García</b> .....	7
<b>1.1 Trayectoria intelectual y académica de Rolando García</b> .....	7
<b>1.2 JEAN PIAGET Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE EPISTEMOLOGÍA GENÉTICA (CIEG)</b> ..	12
<b>1.2.1 Estructura</b> .....	13
<b>1.2.2 Estructuras dinámicas y autorregulación</b> .....	16
<b>1.2.3 Constructivismo</b> .....	18
<b>1.3 La teoría de sistemas complejos de Rolando García</b> .....	21
<b>Germinal Cocho</b> .....	30
<b>2.1 Trayectoria intelectual y académica</b> .....	30
<b>2.2 Del departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física al Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) en la UNAM</b> .....	32
<b>2.3 Los sistemas complejos en Germinal Cocho</b> .....	37
<b>2.3.1 Protectorados</b> .....	38
<b>2.3.2 No-linealidad y caos</b> .....	40
<b>2.3.3. Atractores</b> .....	43
<b>2.3.4. Zona crítica</b> .....	44
<b>2.4. El lugar de los sistemas complejos en la ciencia</b> .....	46
<b>2.5 Las aportaciones de Germinal Cocho en materia de complejidad</b> .....	47
<b>Reflexión en torno a ambos programas</b> .....	50
<b>3.1 Por una ciencia comprometida con la sociedad</b> .....	50
<b>3.2. La investigación interdisciplinaria asociada a los sistemas complejos</b> .....	53
<b>3.3 Aproximaciones conceptuales y metodológicas a los sistemas complejos</b> .....	56
<b>3.3.1 Metodología: organización por niveles</b> .....	57
<b>3.3.2 Dialéctica y sistemas complejos</b> .....	58
<b>3.4. Generalidad y especificidad</b> .....	59
<b>3.5 Matemáticas, ciencias físicas y ciencias sociales.</b> .....	60
<b>3.6 Conclusiones</b> .....	62
<b>Fuentes de consulta:</b> .....	64

## **Rolando García Boutige y Germinal Cocho Gil. Dos aproximaciones filosóficas en materia de complejidad**

Así pues, la ciencia es mucho más semejante al mito de lo que cualquier filosofía científica está dispuesta a reconocer. La ciencia constituye una de las muchas formas de pensamiento desarrolladas por el hombre, pero no necesariamente la mejor. Es una forma de pensamiento conspicua, estrepitosa e insolente, pero sólo intrínsecamente superior a las demás para aquellos que ya han decidido en favor de cierta ideología, o que la han aceptado sin haber examinado sus ventajas y sus límites.

Paul Feyerabend, *Contra el método*, p. 282.

### **INTRODUCCIÓN:**

“Sistema” y “complejidad” son dos términos populares tanto en el lenguaje común como en el científico. Sin embargo, no existe una definición conceptual unívoca para ambos términos. Es por ello que hablar de sistemas complejos implica un doble reto: por un lado, delinear qué entendemos por sistema y, por otra parte, establecer a qué nos referimos cuando decimos que una totalidad organizada es compleja.

En cuanto a la palabra “sistema”, a lo largo del siglo XIX, como resultado de las grandes transformaciones tecnológicas e industriales, hay un giro en la historia de las ideas y el ser humano busca “sistematizar casi todo aquello con lo que tiene que ver: sistema social, sistemas naturales, sistemas de pensamiento que proliferan sin que exista el mínimo rigor acerca de los sistemas como tales, en cuanto a objetos”<sup>1</sup>. La situación cambia en el siglo XX a partir de los trabajos del biólogo Ludwig von Bertalanffy, el biomatemático Anatol Rapoport, el economista Kenneth Boulding y el fisiólogo Ralph Gerard quienes coincidieron en 1954 durante la reunión anual de la American Association for the Advancement of Science. En ese encuentro se acordó crear una sociedad dedicada a la elaboración de la Teoría General de Sistemas. De este modo, surgió La Sociedad para la Investigación General de Sistemas cuyo propósito principal fue “impulsar el desarrollo de sistemas teóricos aplicables a más de uno de los compartimentos tradicionales del

---

<sup>1</sup> Santiago Ramírez, “Introducción” en Santiago Ramírez (Coord.) *Perspectivas en las Teorías de Sistemas*, Colección Aprender a Aprender, México, Siglo XXI, 1999, p. 8.

conocimiento.”<sup>2</sup>Una de las principales motivaciones detrás de este esfuerzo fue luchar contra el sectarismo disciplinario y contra el reduccionismo metodológico de la ciencia. En cuanto a la complejidad, del latín *complexus* (abrazar, abarcar aquello que está entrelazado o conjunto), en 1984 se organizó el Coloquio de Cerisy “Teorías de la Complejidad” en torno a la obra de Henri Atlan. En ese encuentro el biofísico francés expuso tres formas generales de entender la complejidad: 1) como la dificultad para que una máquina pueda llevar a cabo una tarea, 2) como incertidumbre probabilista sobre una estructura observada y 3) como “intuición no cuantificada sobre la dificultad de comprender una idea.”<sup>3</sup>

Los temas y conceptos asociados a la complejidad continuaron su desarrollo con aportaciones de científicos como el mexicano Arturo Rosenblueth, William Ross Ashby y Leo Kadanoff. Además, cabe destacar los trabajos de Prigogine desde la termodinámica, y al Instituto de Santa Fe con aportes de frontera desde enfoques multidisciplinares. En México también los científicos mostraron interés por este movimiento y lejos de importar las teorías que se estaban desarrollando en los Estados Unidos y Europa, gestaron sus propios planteamientos dando lugar “al menos a dos enfoques extraordinariamente originales: la perspectiva dinámico-estructural, que proviene de una interacción de matemáticos, físicos y biólogos y la perspectiva constructivista cuyos orígenes se encuentran en los trabajos de Jean Piaget”.<sup>4</sup> La primera perspectiva hace alusión al trabajo de Germinal Cocho y la segunda al de Rolando García.

Los trabajos de Rolando García sobre sistemas complejos y la fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria abrieron paso a un marco teórico-conceptual particular sobre la relación entre las ciencias y sus objetos de estudio. Derivado de su experiencia como colaborador de Jean Piaget en el estudio y desarrollo de la epistemología genética, García experimentó inquietudes respecto al Círculo de Viena y su concepción de la ciencia. En la obra del autor se puede ver la ruptura epistemológica con su maestro Rudolph Carnap así como un constante diálogo con filósofos como Hume, Popper, Quine, Russell, Lakatos, Le Moigne, Goldman, Saussure, Lévi-Strauss, Marx, sólo por mencionar a algunos.

Por otra parte, Germinal Cocho representa actualmente a uno de los científicos más prolíficos de la UNAM. Médico y físico de formación, este investigador lleva cincuenta años trabajando en sistemas complejos relacionados con la física de partículas, la física no lineal, la

---

<sup>2</sup> Ludwig von Bertalanffy, *General Systems Theory. Foundations, Development, Applications*, Nueva York, Ed. George Brazillier, 1968, p. 15.

<sup>3</sup> Rolando García, *El conocimiento en construcción*, p. 66.

<sup>4</sup> Santiago Ramírez, *op. cit.*, p. 9.

biofísica y la biomedicina. Al igual que García, Cocho tiene una concepción interdisciplinaria de la ciencia. De este modo, establecer puentes entre ciencias y humanidades se manifiesta como un claro interés a lo largo de su obra.

García y Cocho introdujeron en México los estudios sobre sistemas complejos. Ello dio lugar al nacimiento de dos escuelas de pensamiento. La de Cocho se ha desarrollado mediante diversos programas por ejemplo, en 1989<sup>5</sup> se creó el Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física, en el cual se realiza “investigación de frontera en el amplio espectro de los sistemas complejos. Estos son sistemas que muestran propiedades emergentes y cuyo comportamiento no es consecuencia evidente de la interacción entre sus partes. Esto se debe a su compleja estructura o a sus características inherentes no lineales”<sup>6</sup>. También desde 1973 debido a la iniciativa de este investigador se imparte el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias<sup>7</sup>. García por su parte, fomentó su programa constructivista tanto en el Instituto Politécnico Nacional (a través del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional) como en la UNAM (particularmente en el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades), donde se le ha dado continuidad en el ámbito de las ciencias sociales.

Como se verá a lo largo de esta investigación, García y Cocho conforman los pilares sobre los cuales se ha articulado el estudio en torno a los sistemas complejos en México, por lo que uno de los objetivos de este trabajo consiste en reconstruir esa parte de la historia científica y filosófica de nuestro país, para dejar constancia de su contribución. Aunque el trabajo de ambos data de hace más de tres décadas, su desarrollo histórico no ha quedado registrado para ser valorado en su justa dimensión.

El segundo objetivo de la tesis consiste en profundizar en las diferencias y afinidades de las escuelas de García y Cocho para analizar la conceptualización y caracterización de los sistemas complejos a la luz de cada programa de investigación, además de exponer las herramientas teóricas y metodológicas de cada propuesta así como sus implicaciones epistemológicas. Es sabido que ambos autores vivieron la época de mayor productividad y entusiasmo por el marxismo del cual heredaron una visión dialéctica de la ciencia. Esta perspectiva filosófica ligada a la Teoría General

---

<sup>5</sup> Vid. Germinal Cocho, *Teorías de Sistemas: Haken, Prigogine y el Instituto Santa Fe*, 1999.

<sup>6</sup> Las líneas actuales de investigación del Departamento pueden desglosarse en los siguientes grandes temas: sistemas complejos en la biología, sistemas dinámicos no lineales, problemas fundamentales de la mecánica cuántica, transporte cuántico en sistemas mesoscópicos, nanociencia, materia ultrafría y mecánica estadística de redes. <http://www.fisica.unam.mx/departamentos.php>

<sup>7</sup> Vid. Germinal Cocho, *Teorías de Sistemas: Haken, Prigogine y el Instituto Santa Fe*, 1999.

de Sistemas y sus conocimientos en física les llevó a desarrollar una visión estructural de la complejidad.

Para alcanzar estas metas ha sido necesario incluir definiciones y características específicas de los conceptos por parte de cada autor con el fin de reconocer las conexiones entre los programas, lo cual ha incidido en la organización de los capítulos, de tal manera que en vez de elaborar una “batería de conceptos” compartidos, para después abarcar las diferencias o matices en cada autor, se optó por delinear las herramientas teórico-metodológicas que Cocho y García adoptaron individualmente, para posteriormente, identificar las convergencias entre ambas propuestas.

## CAPÍTULO 1

### LOS SISTEMAS COMPLEJOS DE ROLANDO GARCÍA

A lo largo de su obra, Rolando García propuso un enfoque de complejidad cuyo objetivo consistió en estudiar las problemáticas dando cuenta de las interacciones entre los elementos del sistema. El trabajo de García se entiende mejor a la luz del pensamiento de Piaget, con quien colaboró de manera estrecha. Aunque en *Sistemas complejos*<sup>8</sup> García explica de manera clara su proyecto, consideramos que la obra de Piaget permite profundizar en el mismo. Por otra parte, para entender por qué el meteorólogo argentino enfocó su atención de manera particular a los sistemas agroalimentarios como ejemplo de un sistema complejo requerimos remitirnos al contexto histórico en el que el autor desarrolló su enfoque. De este modo, en el presente capítulo iniciaremos con un recorrido por los momentos clave de la trayectoria académica e intelectual de García, en particular abordaremos su participación en el Programa La Sequía y el Hombre (Drought and Man) de la Federación Internacional Institutos de Estudios Avanzados (IFIAS) y su colaboración paralela con Piaget. Posteriormente, ahondaremos en la creación y evolución del Centro Internacional de Epistemología Genética fundado por Piaget y en el que García colaboró durante su exilio. Aunque el énfasis de este apartado recae en la relación García-Piaget, a lo largo del mismo retomaremos también a Ilya Prigogine y a Lucien Goldman para completar el cuadro teórico-conceptual que el autor argentino nos ofrece. Finalmente, expondremos los conceptos de García en relación a los sistemas complejos.

#### 1.1 TRAYECTORIA INTELECTUAL Y ACADÉMICA DE ROLANDO GARCÍA

---

<sup>8</sup> Rolando García, *Sistemas complejos. Concepto, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, 2006.



Rolando García nació en Azul, Argentina, el 20 de febrero de 1919, y murió en México el 15 de noviembre de 2012. En 1936 se tituló como Profesor Normal de Ciencias en su país. En 1939, ingresó a la carrera de Ciencias Fisicomatemáticas en la Universidad de Buenos Aires (UBA). En 1947 se especializó en Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Chicago y el año siguiente estudió física (Hidrodinámica y Termodinámica de la Atmósfera) en la Universidad de California, Estados Unidos. En 1955 regresó a Argentina para impartir clases y en 1957 asumió el cargo de Decano en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. Ante su oposición al gobierno de *facto* del Presidente Juan Carlos Onganía renunció a su cargo y buscó asilo en Suiza. En ese país se desempeñó como director del Global Atmospheric Research Programme (GARP). Intentó retornar a la Argentina, pero de nueva cuenta tuvo que salir exiliado durante la dictadura militar de 1976, gracias al apoyo del Centro Internacional de Epistemología Genética, dirigido por Jean Piaget. Durante treinta años desarrolló y perfeccionó su teoría sobre los sistemas complejos la cual aplicó al estudio sobre las causas y los efectos de las sequías sobre la producción mundial de alimentos. En 1972 la producción mundial de cereales decreció de manera preocupante (41 millones de toneladas), situación que se repitió casi con la misma magnitud en 1974 (30 millones de toneladas).<sup>9</sup>

Los cambios atmosféricos se convirtieron en un punto en particular alarmante para los gobiernos de todo el mundo y sobre todo de los países en desarrollo, pues atribuían a las sequías la falta de alimentos. En ese contexto la Organización Meteorológica Mundial y el Consejo Internacional de Uniones Científicas establecieron conjuntamente el Programa de Investigación Global de la Atmósfera (GARP). La Secretaría General estuvo a cargo de García. El objetivo del programa era “establecer los límites de predictibilidad en los pronósticos meteorológicos y evaluar la posibilidad de predicción de las variaciones climáticas.”<sup>10</sup> Por otra parte, la Federación Internacional de Estudios Avanzados (IFIAS) organizó en 1974 un taller impartido en la Universidad de Bonn, Alemania, y dirigido por Hermann Flohn (uno de los primeros científicos en hablar de cambio climático). El propósito del taller consistió en estudiar el impacto del cambio de clima en los ámbitos de lo social, político y cultural. En este marco Rolando García encabezó el Programa Drought and Man instituido por IFIAS.

---

<sup>9</sup> FAO, *El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Enseñanzas de los últimos cincuenta años*, 2000.

<sup>10</sup> Rolando García, “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático”, p. 194.

De este trabajo resultó la publicación de *Nature pleads not guilty*<sup>11</sup>, donde García desafió la interpretación común bajo la cual las sequías eran consideradas como causa directa de la escasez de granos. Cuestionar esta cadena causal dio pie a una controversia entre científicos:

Norman Ernest Borlaug, doctor en patología vegetal y Premio Nobel de la Paz en 1970 (considerado el padre de la revolución verde<sup>12</sup> y de la agricultura moderna) eran de la opinión de que las hambrunas seguían a las sequías, tesis que sigue de moda (o de excusa). Rolando le dio un giro a esta interpretación al demostrar que cuando ocurría una hambruna los graneros estaban repletos y el precio de los granos aumentaba. Discutieron agriamente Borlaug y García. Borlaug defendió la verdad oficial mostrando gráficos de la correlación positiva de cierto valor entre sequías y hambrunas. Rolando se fue a la biblioteca y encontró una correlación de valor superior entre venta de armas y hambrunas.<sup>13</sup>

En este trabajo García propuso por primera vez un modelo para explicar la sequía de 1972. Este se basó en el concepto de estructura de Jean Piaget y en los sistemas disipativos de Ilya Prigogine.<sup>14</sup> El aspecto central de la respuesta se encontraba en la organización socio-económica de la producción. De este modo, las causas que encontró eran de orden social y no climático. Él mismo lo expuso de la siguiente manera:

En esa época me dediqué a estudiar todas las sequías que había habido en el África desde principios del siglo XX. Y encontré una cosa muy clara: esa última sequía, la más catastrófica, no había sido la peor sequía desde el punto de vista físico, climatológico, había habido sequías mucho más terribles a principios de siglo sin ninguno de esos efectos; lo que había pasado era simplemente que (el análisis sociológico y económico lo demostró de manera plena) esas sociedades se habían hecho más vulnerables a una perturbación como la sequía y así reflexioné sobre una de las concepciones del análisis sistémico: la sociedad con sus costumbres y dimensiones sociales, económicas, políticas tiene cierta resistencia a perturbaciones exteriores.<sup>15</sup>

El Programa La Sequía y el Hombre, instituido por el IFIAS, constituyó el inicio de una serie de investigaciones a lo largo de treinta años, tiempo durante el cual García desarrolló su

---

<sup>11</sup> *Id.*: *Nature pleads not guilty*, 1981.

<sup>12</sup> La “revolución verde”, encabezada por Borlaug, trasladó la racionalidad de la revolución industrial al ámbito agrícola. Ello implicó concebir el campo como una fábrica agroindustrial desde un enfoque mecanicista tipo causa-efecto. Lo anterior provocó una visión limitada de los componentes (reduciéndolos a sol, agua, granos y ganado) y sus interacciones al interior y exterior del sistema agroalimentario. Rolando García concibió la producción de alimentos como un sistema complejo en donde los componentes se encuentran tan integrados unos con otros que un pequeño cambio en un elemento afecta a la totalidad. Desde este punto de vista, los marcos epistémicos (el de Borlaug y el de García) difieren y por ende los resultados.

<sup>13</sup> Julio Muñoz, “Rolando García, científico, historiador de la ciencia y epistemólogo referente”, p., 59.

<sup>14</sup> Rolando García, *Sistemas complejos. Concepto, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, p. 16.

<sup>15</sup> Rolando García, “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático” p. 196.

propuesta en materia de sistemas complejos. Aunque en un principio el interés surgió del campo meteorológico y sus implicaciones sociales, el autor pronto comprendió que su enfoque podía “ser aplicado al estudio de temas tan diversos como el desarrollo tecnológico, la familia o la historia del libro como objeto cultural.”<sup>16</sup>

Además de su trabajo como meteorólogo, en esa época el argentino colaboró con Jean Piaget en el Centro Internacional de Epistemología Genética (CIEG). El Centro, fundado en 1955, tenía por propósito facilitar cada año la colaboración entre psicólogos y representantes de una ciencia en particular. Ello con el objetivo de estudiar problemas epistemológicos específicos relacionados con cierta disciplina científica desde el enfoque genético.<sup>17</sup> Durante ese periodo, Piaget y él preparaban la publicación de *Psicogénesis e Historia de la Ciencia* en el CIEG. Esta colaboración jugó un papel clave tanto en el desarrollo teórico de García como en la presentación de los resultados de Drought and Man. Así, García reconoció:

Si no hubiera sido por el vasto material empírico que reunimos y por la solidez de la fundamentación teórica avalada por mi estrecha colaboración con Piaget, las implicaciones ideológicas de tan contundentes conclusiones hubieran puesto en riesgo la publicación de los resultados<sup>18</sup>

Esta institución se torna entonces esencial para comprender la propuesta del autor, pues, las directrices de su trabajo se encuentran estrechamente vinculadas al movimiento anti positivista que se gestó en Génova. El objetivo principal era demostrar que “el progreso de los conocimientos no se debe a una programación hereditaria innata, ni a una acumulación de experiencias empíricas, sino que es el resultado de una autorregulación, a la que podemos llamar equilibración”<sup>19</sup>, ambos conceptos desarrollados por Jean Piaget.

Como alumno de Carnap entre 1946 y 1947 y posteriormente de Reichenbach entre 1947 y 1952, García heredó una concepción neo-positivista de la ciencia, misma que abandonó después de conocer a Piaget. A finales de los años sesenta y durante la década posterior, ambos trabajaron de manera conjunta acerca de los problemas de los mecanismos comunes entre psicogénesis y

---

<sup>16</sup> *Ibid.*:

<sup>17</sup> Después de la Segunda Guerra Mundial Estados Unidos era el único país con capacidad económica suficiente para financiar el Centro de Epistemología Genética. Sin embargo, tal y como lo relata la Fundación Jean Piaget, la filosofía de la ciencia dominante en esa época era la analítica. De este modo, se tuvo que convencer a los expertos de la Fundación Rockefeller sobre la viabilidad de un proyecto como el que ambicionaba el suizo. En 1953 Piaget pidió al filósofo y discípulo de Wittgenstein, Wolf Mays, su intervención para obtener el apoyo de la Fundación. La respuesta fue positiva, ello permitió a Piaget relacionarse con filósofos analíticos como W.O. Quine y Leo Apostel. Cfr. [http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index\\_gen\\_page.php?IDPAGE=251&IDMODUL E=42](http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index_gen_page.php?IDPAGE=251&IDMODUL E=42) [consultado el 28 de 12 de 2015]

<sup>18</sup> Rolando García, “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático” p., 195.

<sup>19</sup> J. Piaget, R. García, *et. al. Epistemología genética y equilibración*, p., 33.

sociogénesis por una parte y acerca de la lógica de las significaciones, por otra. Durante esta colaboración García logró despertar de nueva cuenta el interés de Piaget en torno a la evolución y desarrollo de las diferentes disciplinas científicas, tema que el epistemólogo suizo ya había tocado en los años cincuenta en “Introducción a la Epistemología Genética” y que había dejado parcialmente olvidado. El interés en el asunto resurgió porque al estudiar la historia de la geometría y de la física, García encontró semejanza entre el proceso de transformación cognitiva en estas ciencias y aquel descrito por Piaget e Inhelder en sus investigaciones sobre la progresión de la representación espacial y de la geometría espontánea en los niños.<sup>20</sup> Es decir, desde la perspectiva de Piaget y García es imposible vislumbrar un continuo entre los mecanismos mediante los cuales el niño adquiere conocimiento y cómo lo hace un científico. Lo que hicieron entonces fue aplicar un método “retroductivo”<sup>21</sup>. De este modo, Piaget y su equipo del CIEG estudiaron la infancia y García por su parte analizó la historia de la ciencia. El ginebrino retomó la etapa en la que el niño hace razonamientos (correctos o no) basados en cierta lógica, de ahí fue hacia atrás estudiando formas cada vez más elementales de razonar hasta llegar al punto en el que el sujeto (el infante) establece relaciones a partir de las implicaciones entre acciones. García del mismo modo, tomó teorías ya establecidas y reconstruyó históricamente las ideas y conceptualizaciones que les dieron origen. Ello les permitió afirmar que el conocimiento es producto de un ejercicio constructivo en el cual hay continuidad. Desde esta perspectiva, no hay una diferencia radical entre el conocimiento del niño y el del científico como tipos de saber inconexos. Ambos son parte de un continuo. Este empieza con los mecanismos biológicos que permiten al ser humano sobrevivir y que le llevan a tener reacciones instintivas e involuntarias. El ejemplo que utilizó García para ejemplificar lo anterior es la del recién nacido que muere si no nace con el reflejo de succionar. Por esta razón el sujeto parte de la acción hacia la construcción del conocimiento en la propuesta piagetiana. Por otra parte, el acto mismo de chupar requiere de una interacción por parte del infante con el mundo externo, lo cual implica que “[s]e empieza con interacción, pero tiene algunos reflejos innatos. [...] Entonces, el chupar, el reflejo palmario, cosas así, son reacciones biológicas, a partir de las cuales la interacción con el mundo externo es lo que lo va a permitir organizar las experiencias”<sup>22</sup> De ahí que no hay estructura sin génesis ni génesis sin estructura. Una vez comparados los resultados de Piaget con los de García se dieron a la tarea de publicar los hallazgos en *Psicogénesis e Historia de la Ciencia* en 1982. Dada la importancia del CIEG para el desarrollo de la teoría de García

---

<sup>20</sup> Vid: J. Piaget y B. Inhelder, *La representación de l'espace*, 1977.

<sup>21</sup> García explica que este concepto fue retomado de Charles Sanders Peirce.

<sup>22</sup> Rolando García, “Piaget, las ciencias y la dialéctica”, URL= <http://www.herramienta.com.ar/revista-herramienta-n-19/piaget-las-ciencias-y-la-dialectica> [consultado el 23 de diciembre de 2015]

describiremos a continuación de manera breve el desarrollo de ciertos conceptos que se dieron en el marco de esta institución y del pensamiento de Piaget.

## **1.2 JEAN PIAGET Y EL CENTRO INTERNACIONAL DE EPISTEMOLOGÍA GENÉTICA (CIEG)**

Jean Piaget es muy conocido dentro del ámbito educativo, y sus aportes a la pedagogía son indiscutibles. Sin embargo, el campo de influencia de los aportes piagetianos no se circunscribe únicamente a la enseñanza. Una de las preocupaciones fundamentales que guiaron su trabajo fue comprender cuáles son los mecanismos de generación de conocimiento. Aunque su trabajo inició en el campo de la biología, pronto desarrolló un profundo interés en cuestiones epistemológicas. La formación de Piaget como biólogo incidió de manera determinante en el desarrollo de su cuerpo teórico. En sus tesis subyace una visión del conocimiento desde esta ciencia, a la cual otorgó un peso relevante a lo largo de su obra. El autor criticó las dos posiciones tradicionales respecto al origen del conocimiento: la apriorista y la empirista. La primera posición para él constituyó una génesis sin estructura (entendiendo génesis como algo espontáneo y la estructura como una imposición externa) y la segunda una estructura sin génesis. Desde su perspectiva, éstas no son excluyentes sino interactuantes. No puede existir una sin la otra. En otras palabras, el sujeto conoce a través de estructuras externas y anteriores a él, pero al mismo tiempo construye nuevas a partir del razonamiento interno no previo. Existe todo el tiempo una interacción entre génesis y estructura.<sup>23</sup>

Dado que una de las condiciones para el avance científico es la relación entre individuos, Piaget necesitaba de un lugar que propiciara la colaboración entre científicos de diversas áreas para el estudio de problemas epistemológicos desde un ángulo diferente al individualismo cognoscitivo promovido por la corriente principal en teoría del conocimiento. De este modo, se dio a la tarea de fundar el CIEG. Durante la primera etapa del Centro la investigación que ahí se llevó a cabo tuvo como objetivo poner a prueba las hipótesis de la epistemología genética en contraste con las de la filosofía analítica, la cual, todavía se negaba a utilizar recursos de la psicología en la teoría del conocimiento.<sup>24</sup> En este periodo el CIEG desarrolló sus líneas de investigación alrededor de la epistemología de las categorías como los números y el espacio. Las investigaciones que ahí surgieron a finales de los cincuenta sirvieron como base para lo que posteriormente se conocería como el trabajo interdisciplinario y que será parte fundamental de las tesis de García. Los diferentes documentos emitidos por el Centro dejan ver la importancia que se da a la cooperación académica

---

<sup>23</sup> Cfr. Jean Piaget,

<sup>24</sup> Cfr. Fondation Jean Piaget URL=  
[http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index\\_gen\\_page.php?IDPAGE=251&IDMODULE=42](http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index_gen_page.php?IDPAGE=251&IDMODULE=42)

en la generación de conocimiento. Así, en el relato sobre la historia del CIEG en los documentos de la Fondation Jean Piaget se explica que “Estas investigaciones demostraron que un acuerdo es posible en torno a cuestiones bien delimitadas entre investigadores de tradiciones distintas”<sup>25</sup>

A partir del estudio acerca de la génesis de las categorías del pensamiento y de la ciencia, los investigadores del Centro dirigieron su atención hacia la construcción de las relaciones lógico-matemáticas o, como se conoce dentro de la teoría piagetiana, el problema de la filiación de las estructuras, tópico que eventualmente se convertiría en su objeto de estudio más significativo. Las investigaciones del Centro se articularon en torno a la teorización sobre las nociones de estructura, constructivismo, equilibrio y auto-organización que más tarde sirvieron a García de marco general para postular su teoría de sistemas complejos

A continuación desarrollaremos de manera breve cada uno de estos conceptos desde la perspectiva piagetiana para posteriormente, situar la propuesta sistémica de García.

### **1.2.1 ESTRUCTURA**

Dentro del marco conceptual de Piaget, una estructura es un sistema de transformaciones que, como tal, está compuesto de leyes (por oposición a las propiedades de sus elementos), y que se conserva o enriquece por el juego mismo de sus transformaciones, sin que estas terminen fuera de sus fronteras o recurran a elementos exógenos. Una estructura comprende tres características: totalidad, transformaciones y auto-regulación.”<sup>26</sup> El estructuralismo, en el sentido que aquí se presenta, constituye un método de investigación común a diversos campos de conocimiento como la biología, la física, la filosofía, las ciencias sociales entre otras. En palabras de García “[l]as estructuras no son consideradas como formas rígidas en condiciones de equilibrio estático, sino como el conjunto de relaciones dentro de un sistema organizado que se mantiene en condiciones estacionarias mediante procesos dinámicos de regulación.”<sup>27</sup> Desde la perspectiva de García-Piaget, la dinámica del sistema constituye el objeto de estudio y se estudia a través de lo que García denomina “propiedades estructurales”, tales como la inestabilidad o estabilidad. En este punto conviene hacer un paréntesis para subrayar que el autor argentino, además del pensamiento de

---

<sup>25</sup> *Ibid.*:

<sup>26</sup> Piaget da como ejemplo de la definición anterior la noción de grupo (según él la más vieja estructura conocida): “en matemáticas un grupo es un conjunto de elementos (por ejemplo los números enteros positivos y negativos) reunidos por una operación de composición (por ejemplo la suma) que, aplicada a esos elementos, vuelve a dar un elemento del conjunto; existe un elemento neutro (en el ejemplo escogido, el cero) que, compuesto con otro, no lo modifica (aquí  $n + 0 = 0 + n$ ), y existe sobre todo una operación inversa, (en este caso la resta) que, compuesta con la operación directa, da el elemento neutro ( $+ n - n = - n + n = 0$ ); en fin, las composiciones son asociativas (aquí  $[n + m] + 1 = n + [m + 1]$ ).” Piaget, *El Estructuralismo*, p. 6, 17.

<sup>27</sup> Rolando García, *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, p. 52.

Piaget, también incluyó en su análisis los estudios gestados en la Escuela de Bruselas liderada por Ilya Prigogine sobre todo en cuanto a los estados estacionarios:

En forma paralela, aunque con raíces más antiguas, Jean Piaget y su escuela ginebrina desarrollaron una epistemología constructivista que plantea una evolución del sistema cognoscitivo, tanto a nivel individual como en la historia de la ciencia, con notables puntos de coincidencia con la escuela de Bruselas. Sobre estas bases hemos propuesto un tipo de análisis sistémico alejado de los modelos econométricos y de la ingeniería de sistemas, que permite reformular la necesidad de estudiar totalidades, superando el aparente escollo de la inevitabilidad de los ‘recortes’ de la realidad para poder analizarlas.<sup>28</sup>

Los puntos de coincidencia a los que García hace referencia son esencialmente dos. Por una parte, ambas escuelas reconocen que los sistemas complejos son abiertos, es decir, sus límites no están perfectamente definidos y se encuentran en constante interacción con el medio. Cuando las condiciones límite o, también llamadas condiciones de contorno varían con respecto a un valor medio, los elementos fluctúan pero la estructura no cambia. A eso se le llama sistema estacionario. La noción de condiciones de contorno juega un papel esencial en los sistemas complejos de García. El contorno se refiere a los límites del sistema construido (geográfica o conceptualmente) y las condiciones a los flujos (de materia, de energía, de créditos en el caso del sistema financiero, de información, etc.) que se dan a través de esos límites. “Hemos denominado condiciones en los límites o condiciones de contorno al conjunto de dichos flujos. La definición completa de un sistema debe cubrir, tanto el conjunto de las relaciones internas que se consideran pertinentes para el tipo de estudio de que se trata, como las condiciones de contorno.”<sup>29</sup> A partir del estructuralismo de corte genético es posible estudiar las transformaciones de un sistema y los mecanismos que las gobiernan. Finalmente, conviene distinguir dos tipos de estados estacionarios: aquellos en los que existe una situación de equilibrio y aquellos que, alejados de éste, se mantienen estacionarios debido a la interacción con el medio.<sup>30</sup> El caso de los mamíferos ejemplifica el primer tipo pues son animales endotérmicos que generan calor interno y mantienen una temperatura corporal estable entre los 34° y 40°C independientemente de la temperatura del ambiente. El segundo tipo puede verse en un organismo biológico que interactúa con el exterior mediante la ingestión y excreción de alimentos o la respiración y transpiración. De acuerdo a García este sistema se encuentra en condiciones estacionarias pero lejos del equilibrio. “Si cesan los intercambios con el exterior, el sistema llega a un estado de equilibrio que es la muerte.”<sup>31</sup> Cabe destacar que los sistemas

---

<sup>28</sup> *Ibid.*

<sup>29</sup> *Ibid.*, p. 128.

<sup>30</sup> *Ibid.*, p. 61

<sup>31</sup> *Id.*

disipativos de Prigogine son sistemas abiertos en cuyas fronteras ocurren procesos irreversibles.<sup>32</sup> Esta característica también fue estudiada por Piaget en los procesos de equilibración.<sup>33</sup>

Por otra parte, la teoría de los sistemas disipativos de Prigogine permite unificar sistemas que pertenecen a dominios de diversas disciplinas. De este modo, García concuerda con el Premio Nobel acerca de la propuesta de unir esfuerzos entre todas las ciencias; es decir, acepta que es necesario acercarse a los científicos de diversas áreas para el estudio de los problemas complejos desde un enfoque interdisciplinario. García aclara qué entiende por unificar:

Unificar, sin embargo no significa reducir el estudio de los fenómenos de un dominio al estudio de los fenómenos de otro dominio, como fue el caso de las concepciones fisicalistas que propugnó el empirismo lógico. Se trata, por el contrario, de estudiar los fenómenos dentro de su propio dominio, con sus características específicas. Esto no es obstáculo para haber descubierto mecanismos que son comunes a los más diversos sistemas que correspondan a propiedades estructurales.<sup>34</sup>

Al igual que García, Prigogine no pretende hacer una unificación rígida de las ciencias. Por el contrario, considera necesario mantener las diferencias y tensiones disciplinarias.<sup>35</sup> Además de la

---

<sup>32</sup> En física, la reversibilidad se aplica a procesos. Decimos que un proceso  $P$  es *reversible* si la evolución temporal de eventos  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , que lo componen puede presentarse en ese orden o en el orden inverso; si dicha sucesión siempre se presenta en ese orden temporal y nunca ocurre espontáneamente en el sentido inverso  $a_n, \dots, a_2, a_1$ , entonces hablamos de un proceso irreversible. En la mecánica un ejemplo de proceso reversible es la evolución temporal de la posición de una partícula. Ahora bien, supongamos que tenemos un recipiente dividido por una pared. En la mitad izquierda del recipiente se encuentra confinado un gas. Si consideramos como eventos las sucesivas densidades del gas en la mitad izquierda del recipiente a partir del momento en que se retira la pared, la evolución temporal de la densidad es un proceso irreversible. Expresado de este modo, los eventos  $a_i$  son los aspectos parciales de un sistema. Así, el problema de la irreversibilidad surgió en la segunda mitad del siglo XIX al intentar conciliar la Segunda Ley de la termodinámica (que declara que hay procesos energéticos irreversibles) con la mecánica clásica a través de la mecánica estadística. Ludwig Boltzmann, Josiah W. Gibbs e Ilya Prigogine buscaron dar respuesta a este problema desde diferentes enfoques. Sin embargo, aun hoy en día no existe consenso científico en torno a qué respuesta es la más satisfactoria. Por otra parte, existen polémicas en torno al concepto mismo de irreversibilidad y su relación con la “flecha del tiempo”. La polémica entre A. Einstein y Prigogine da cuenta de lo anterior. El primero, desde una concepción determinista negaba la orientación del tiempo en el sentido pasado/futuro. En este sentido no cabría hablar de procesos irreversibles. Prigogine sin embargo, estaba convencido de que la irreversibilidad podía conducir a estructuras espaciotemporales. La entropía, se da hacia el futuro. De este modo, para Prigogine la irreversibilidad, aparece con lo complejo. Para una explicación detallada del problema *vid.* Martín Labarca y Olimpia Lombardi, *Irreversibilidad y pluralismo ontológico*, 2013. Andrew Gerzso, “Entrevista a Ilya Prigogine”, 5 de agosto de 2008. [fecha de consulta: 14 de mayo de 2016] URL=<http://articles.ircam.fr/textes/Gerzso95a/>

<sup>33</sup> En *El conocimiento en construcción*, García rescata las similitudes entre los planteamientos de Prigogine y Piaget en torno a la irreversibilidad. (sistemas disipativos en Prigogine y procesos de equilibración en Piaget)

<sup>34</sup> *Id.*:

<sup>35</sup> Sergio Vilar, *La nueva racionalidad. Comprender la complejidad con métodos transdisciplinarios*, p. 58.



Escuela de Bruselas, García retomó del sociólogo Lucien Goldmann el estructuralismo genético.<sup>36</sup> Para el meteorólogo, el sociólogo francés vio con claridad la función de dicho concepto en el cuerpo teórico marxista. De este modo, la estructura se entiende como “un conjunto de relaciones necesarias entre los diferentes elementos que constituyen la obra que él analiza. [...] Es el conjunto lo que determina su naturaleza y significación objetiva.”<sup>37</sup> García adoptó la metodología que Goldmann utilizó en el análisis literario del teatro de Racine y en la interpretación de la filosofía de Pascal para el estudio de los sistemas complejos. Esta consiste en identificar una jerarquía de estructuras que dan forma al contexto social “en el sentido más amplio del término, es decir, incluyendo los factores económicos y políticos.”<sup>38</sup> Así, García encontró similitudes entre la jerarquización propuesta por Piaget y la propuesta por Goldman. El investigador interesado en el estudio de un sistema complejo tiene que captar los rasgos generales de la estructura parcial y de la estructura más amplia en la que se enmarca mediante el estudio genético. Esto constituye básicamente el corazón del constructivismo, concepto que se analizará en otro apartado más adelante.

En 1957 Piaget junto con Apostel y Madelbrot publicaron *Lógica y Equilibrio*. En dicho trabajo los autores propusieron un modelo matemático para explicar a través del marco de la psicología genética el desarrollo de las estructuras operatorias.<sup>39</sup> Durante la infancia el niño construye ciertas estructuras mentales que permiten formular pensamientos formales. El objetivo de Piaget y sus colaboradores fue representar dichas estructuras con la lógica de clases, proposicional y relacional. El autor suizo denominó a esto lógica operatoria, la cual aparece como el punto culminante de un proceso estadístico de regulación entre varios juicios del pensamiento con respecto a diferentes aspectos de la experiencia.<sup>40</sup>

### ***1.2.2 ESTRUCTURAS DINÁMICAS Y AUTORREGULACIÓN***

Otro concepto relevante dentro del marco sistémico de García es la regulación. Piaget definió en la obra *Le développement des notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant* a este fenómeno como

---

<sup>36</sup> Método que intenta armonizar varias teorías como el marxismo, las del primer Lukacs, las de Piaget y las de Levy-Straus para la creación cultural. Vid. Sara Sefchovich, “El método estructuralista genético para el análisis de la literatura”, p. 733.

<sup>37</sup> *Ibid.* p., 53

<sup>38</sup> Rolando García, *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, p. 34.

<sup>39</sup> Estructura operatoria se entiende en dos sentidos que son complementarios. Se trata ya sea de un grupo particular o del agrupamiento de operaciones resultantes de un proceso de equilibrio cognitivo, al término del cual las acciones que pertenecen a una misma familia epistemológica (el tiempo, el espacio, los números, las proposiciones, entre otros) se reorganizan. Estas acciones pueden pertenecer al mundo exterior o al pensamiento. Cfr. Piaget, *Etudes d'épistémologie génétique*, p., 195.

<sup>40</sup> J. Piaget, *Le développement des notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, p. 170.

un proceso durante el cual un sistema (o subsistema) tiende a alcanzar el equilibrio a partir del proceso de asimilación y acomodación. La asimilación es el proceso mediante el que el sujeto recoge la información que proviene del medio y le da sentido en función de los esquemas o estructuras conceptuales con los que cuenta en ese momento. La acomodación ocurre cuando uno de esos esquemas se modifica a causa de uno o varios elementos asimilados. Recordemos que Piaget tiene una extensa obra, a lo largo de la misma fue precisando cada concepto. *Lógica y Equilibrio* constituye el primer esbozo descriptivo sobre el desarrollo cognoscitivo de las estructuras operatorias. Sin embargo, el modelo no daba cuenta de la aparición de novedades; no explicaba por qué una vez alcanzado un estado de equilibrio, el sistema se autorregula para alcanzar otro. Para superar este escollo teórico Piaget buscó explicaciones apoyándose en la biología.<sup>41</sup> Así, en *Biologie et Connaissance* planteó la posibilidad de entender la cognición en términos de un continuo entre vida y conocimiento. El autor buscaba mediante este continuo evitar posiciones a priori. El punto de partida radica en el análisis de las estructuras orgánicas y de su evolución, lo cual nos llevará eventualmente a las estructuras cognitivas. Dicho de otro modo, para Piaget el objetivo principal en esta parte de su obra consistió en identificar mecanismos comunes trabajando en ambas esferas: la biológica y la cognoscitiva. Siguiendo a Pilar Lacasa<sup>42</sup>, podemos afirmar que tres aspectos estrechamente vinculados entre sí dan coherencia al modelo de equilibración del autor suizo. Primero, la noción de estructura como un sistema dinámico (abierto y en constante cambio); segundo Piaget asigna a la regulación el lugar de mecanismo constructivo. Los procesos de regulación se encuentran jerarquizados en niveles (lo cual García retomará para formular sus niveles de análisis y niveles de procesos<sup>43</sup>). Y en tercer lugar, el concepto de fenocopia jugará un papel en el modelo como “correlato biológico del proceso de equilibración meliorativa de su última etapa.”<sup>44</sup> Para el autor una estructura comprende a una totalidad organizada cuyos elementos interactúan obedeciendo un conjunto de leyes.<sup>45</sup> En dicha interacción se da una serie de transformaciones que coadyuvan a la conservación del sistema. La autorregulación permite que las estructuras en tanto sistemas abiertos, se relacionen con “un medio capaz de provocar conflictos y ante los cuales es preciso reaccionar.”<sup>46</sup>

---

<sup>41</sup> Dada la extensión de la obra del ginebrino y la aparente falta de unidad en la misma, para el desarrollo de esta parte además de revisar los textos del autor, nos hemos apoyado en el resumen de Pilar Lacasa sobre la noción de equilibrio en la obra de Piaget. *Vid.*: P. Lacasa, “Equilibración y equilibrio en la epistemología genética de Jean Piaget”, pp. 94-115.

<sup>42</sup> Pilar Lacasa, “Equilibración y equilibrio en la epistemología genética de Jean Piaget”, 1984.

<sup>43</sup> Y que probablemente Piaget recuperó a su vez de la dialéctica marxista.

<sup>44</sup> *Ibid.*

<sup>45</sup> No hay en la obra de Piaget una distinción tajante entre sistema y estructura pero este último concepto se menciona con mayor frecuencia y detalle.

<sup>46</sup> *Ibid.*

### 1.2.3 CONSTRUCTIVISMO

En 1963 Piaget volvió al problema de la filiación de las estructuras con la intención de superar la perspectiva exclusivamente estadística del primer modelo de equilibrio elaborado en la década anterior. Para ello, además de la noción de regulación, Piaget y su equipo (conformado por científicos como Rolando García, Bärber Inhelder y Leo Apostel entre otros), introdujeron a los estudios piagetianos los conceptos de auto organización<sup>47</sup> y mecanismo de construcción. En esta etapa el epistemólogo suizo concentró su atención en un nuevo programa de investigación acerca de las conexiones entre explicación causal y las operaciones lógico-matemáticas. Es decir, el autor regresó al estudio de la armonía entre las matemáticas y la realidad (hecho que inicialmente había impulsado su trabajo durante los años veinte). Ello derivó en un volcamiento cada vez más pronunciado de Piaget hacia el problema de los mecanismos de construcción. El giro historicista en filosofía de la ciencia coadyuvó a que se cuestionara cada vez más a la experiencia como base fundamental del saber. Asimismo, las teorías del conocimiento que afirman que venimos equipados *a priori* con capacidades, habilidades y facultades para conocer, tampoco habían dado respuestas satisfactorias. La epistemología genética entonces, se acercó al uso de la historia como herramienta de análisis crítico. De este modo, Piaget propuso el constructivismo como solución “al cuádruple problema del valor, la fecundidad, el origen y la naturaleza del conocimiento científico.”<sup>48</sup> De acuerdo con esta propuesta, la adquisición de conocimientos depende de la construcción de cuadros lógico-matemáticos de asimilación. La construcción de los mismos surge a partir de una serie de estados a través de los cuales las estructuras previamente adquiridas se incluyen con o sin modificación dentro de las nuevas.<sup>49</sup> Conviene repetir que el paso de una etapa a otra depende de los procesos de auto-organización y de equilibración. En este punto García entró en escena pues, como se ha mencionado, el suizo realizó estudios sobre el progreso en el conocimiento del infante mientras que de manera paralela el argentino dirigió sus esfuerzos intelectuales hacia el progreso científico. A pesar de los avances en cuanto al marco conceptual de la teoría piagetiana, seguía en el tintero la cuestión sobre la aparición de novedades y abstracciones cada vez más sofisticadas. Para responder a estas inquietudes Piaget extendió de nueva cuenta su programa de investigación desarrollando otros conceptos como la abstracción empírica y la reflexiva y la generalización constructiva.<sup>50</sup> Con *Psicogénesis e historia de la ciencia* escrita en colaboración con Rolando

---

<sup>47</sup> La auto-organización es el proceso mediante el cual una organización se transforma a partir de causas o mecanismos internos y cuyo origen no puede ser explicado en términos de azar. *Vid.: J.J Ducret, op. cit.:*

<sup>48</sup> *Ibid.:*

<sup>49</sup> *Ibid.:*

<sup>50</sup> La fundación Jean Piaget relata la historia de las etapas en la investigación de Piaget en su apartado sobre el CIEG. *Vid.: J.J. Ducret, op. cit. [en línea]*

García culminó el trabajo del suizo en cuanto a la sofisticación y mejoramiento de su aparato teórico-conceptual y que a la vez subyace en el trabajo de García por separado. En esta obra, ambos afirmaron que la hipótesis planteada se comprueba a partir de los casos históricos relatados a lo largo del libro. García lo explicó en las primeras páginas:

Nuestra hipótesis general será la siguiente. En primer lugar, estableceremos una oposición entre la abstracción empírica, que extrae sus informaciones de los objetos mismos, y lo que llamaremos "abstracción reflexiva" que procede a partir de las acciones y operaciones del sujeto. Esta segunda forma de abstracción tiene lugar a través de dos procesos necesariamente conjugados: 1) un "reflejamiento" sobre un nivel superior (por ejemplo, de representación) de lo que se ha extraído de un nivel inferior (por ejemplo, de acción); y 2) una "reflexión" que reconstruye y reorganiza, ampliándolo, lo que fue transferido por reflejamiento).<sup>51</sup>

La reflexión es doblemente constructiva porque el "reflejamiento", como lo llaman Piaget y García, es el producto de la puesta en correspondencia de lo reflejado hacia un nivel superior donde también habrá nuevas correspondencias. "Esas últimas asocian los contenidos transferidos con nuevos contenidos que son integrables en la estructura inicial, pero que permiten generalizarla"<sup>52</sup>. A esto García le denominó el comienzo de morfismos los cuales conducen al descubrimiento de contenidos próximos pero no directamente asimilables a la estructura precedente. Para que ello ocurra se da una transformación mediante lo que Piaget designó como *proceso completo* durante el cual el sujeto integra la estructura precedente "como subestructura de una estructura más amplia y por consiguiente, parcialmente nueva."<sup>53</sup> Finalmente, este proceso se repite de manera indefinida en todos los niveles. Lo anterior implica que el desarrollo cognoscitivo se constituye en la teoría de Piaget y García como "el resultado de la iteración de un mismo mecanismo, constantemente renovado y ampliado por la alternancia de agregados de nuevos contenidos y de elaboraciones de nuevas formas o estructuras".<sup>54</sup> En suma, la epistemología genética se basa en tres vertientes: La psicogénesis, el método histórico-crítico y la colaboración interdisciplinaria<sup>55</sup>. Cada una por sí sola es incompleta, por eso la epistemología genética recurre a la interacción de todas entre sí. Estas vertientes son fundamentales para el desarrollo de la propuesta de García.

La psicogénesis (o psicología genética), por una parte, implica la forma en la que el sujeto asimila los estímulos y todo lo que el mundo exterior provee. Lo que llamaríamos de alguna manera

---

URL=[http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index\\_gen\\_page.php?IDPAGE=251&IDMO DULE=42](http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/ModuleFJP001/index_gen_page.php?IDPAGE=251&IDMO DULE=42). Consultado el 22 de enero de 2015.

<sup>51</sup> J. Piaget y R. García, *Psicogénesis e historia de la ciencia*, p. 10.

<sup>52</sup> *Ibid.*

<sup>53</sup> *Ibid.*

<sup>54</sup> De nueva cuenta, podemos ver cierto coherentismo en las hipótesis que nos presentan los autores pues el sistema de creencias no surge de la experiencia directa sino de la capacidad del sujeto de organizar en diferentes niveles una creencia y asimilarla a estructuras más generales. *Ibid.*:

<sup>55</sup> Néstor Braunstein, et., *al. Psicología, Ideología y Ciencia*, p., 280.

“realidad externa” y cómo el sujeto interactúa con ella y construye nuevas estructuras. En este sentido la generación de conocimiento o la inteligencia misma no son ni espontáneos ni acumulativos, sino adaptativos. Piaget y García afirmaron al respecto que “[e]n ese proceso de asimilación el sujeto selecciona, transforma y adapta e incorpora dichos elementos a sus estructuras cognoscitivas, para lo cual debe también construir, adaptar, y reconstruir tales estructuras.”<sup>56</sup> En este sentido, se trata de una dinámica dialéctica a través de la cual como ya lo habíamos mencionado, no hay génesis sin estructura ni estructura sin génesis.

En cuanto al método histórico-crítico, se trata de una reconstrucción y reflexión sobre cómo se han constituido las ciencias a través de la historia. García y Piaget estaban convencidos de que existe un orden secuencial en el plano de la historia. Para apoyar su argumento recurrieron al ejemplo de las matemáticas:

Con respecto al orden secuencial en el plano de la historia, se pueden citar tres grandes períodos en la historia de las matemáticas: el realismo estático de los griegos que se basa en estados permanentes (figuras y números), los cuales proveen un conjunto de conocimientos previos que eran necesarios para el descubrimiento de las transformaciones algebraicas e infinitesimales del siglo VII, cuyo análisis, a su vez, era indispensable para dar lugar a las estructuras propias de las matemáticas del siglo XIX y de nuestros días.<sup>57</sup>

Finalmente, cabe mencionar que García describió a la epistemología genética como:

Una epistemología que adopta una metodología que es científica, en cuanto establece la verificación empírica como criterio de validez, y que es dialéctica en su metodología de análisis de los procesos del desarrollo cognoscitivo, debe necesariamente tener, como tercera característica, la de ser una teoría abierta. En contraste con los sistemas filosóficos clásicos -Descartes, Leibniz, Kant, Hegel- la epistemología genética se mantiene abierta a la incorporación de aquellas modificaciones, ampliaciones o reorganizaciones que imponga el desarrollo de la propia ciencia que se propuso explicar.<sup>58</sup>

De este modo, la epistemología de donde parte García plantea una perspectiva constructivista del conocimiento la cual afirma que este (desde el más elemental hasta el científico) se genera a través de procesos constructivos que deben contar con los referentes empíricos necesarios para mostrar su validez, pero al mismo tiempo acepta que puede haber reorganizaciones de acuerdo a los procesos socio-históricos de la ciencia. Tanto García como Piaget aceptaron la

---

<sup>56</sup> J. Piaget y R. García, *op. cit.*, p. 227.

<sup>57</sup> *Ibid.*: p., 9.

<sup>58</sup> R. García, “Piaget y el problema del conocimiento”, p., 13.

provisionalidad de su enfoque aunque, si este llegara a cambiar, sería explicado en términos de reorganización.

### 1.3 LA TEORÍA DE SISTEMAS COMPLEJOS DE ROLANDO GARCÍA<sup>59</sup>

Una vez discutido el marco piagetiano en torno a la estructura, regulación, auto-organización y constructivismo podremos entrar de lleno a la propuesta de García. Empezaremos por entender el concepto sistema. Para el autor éste se refiere a un recorte arbitrario de la realidad en el cual incluimos conjuntos de elementos y de situaciones que de alguna manera funcionan como totalidad, el equipo de investigación define el sistema en un primer momento, pero la formulación final termina con la investigación.<sup>60</sup> Claro está, que una de las dificultades de todo recorte reside en saber qué dejamos fuera y qué tomamos como parte de la totalidad organizada. En cada nivel gobiernan ciertas leyes que a pesar de que no son reducibles a otros niveles, no son completamente independientes, podemos decir que son semi-autónomas en el sentido de que hay interacciones.<sup>61</sup> De este modo, un sistema complejo es aquel

[C]uyos elementos son heterogéneos en el sentido de que pertenecen al dominio de distintas disciplinas, pero son elementos que interactúan entre sí, de tal manera que son interdefinibles. Sin embargo, hay que tener claro que no todo conjunto de elementos es un sistema; no todo sistema de elementos heterogéneos es un sistema complejo; no todo estudio de la parte de un sistema, de conjuntos de partes de un sistema, es un estudio interdisciplinario.<sup>62</sup>

Un sistema complejo al ser problematizado como tal corresponde a una problemática compleja, pero, ¿qué es exactamente una problemática compleja?, ¿qué le da esa característica? De acuerdo a García estas son aquellas “que se caracterizan por la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada.”<sup>63</sup> El sistema agrario es un ejemplo de interdefinibilidad porque sus elementos como el suelo, el clima, la tecnología, las comunidades que lo trabajan, etc., no se pueden separar y estudiar de manera aislada. Si una modificación ocurre en uno de estos elementos, entonces afectará a los demás. Ello significa que el sistema no se puede descomponer y para estudiarlo se requiere de una

---

<sup>59</sup> Este apartado se desarrolló tomando como base el libro *Sistemas Complejos* de 2006, sin embargo, el autor ya había dado a conocer diversos artículos, entrevistas y ponencias en donde sostiene la misma posición respecto de los temas aquí abordados. De este modo, *Sistemas Complejos* constituye la culminación de una extensa obra que partió de las investigaciones con Piaget y los trabajos del IFIAS.

<sup>60</sup> *Id.*: “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático”, p., 197.

<sup>61</sup> *Ibid.*:

<sup>62</sup> *Ibid.*: p., 193. Cabe destacar que García retomó la definición de sistema del sociólogo marxista francés Lucien Glodmann.

<sup>63</sup> *Id.*: *Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, p., 87.

investigación interdisciplinaria. García afirma que la interdisciplina es una metodología, es decir, una forma de trabajar en la cual una misma problemática se estudia desde diferentes campos del conocimiento. Sin embargo, los sujetos involucrados en el análisis realizan la investigación de manera conjunta y jamás por separado. En la propuesta del científico argentino es de suma importancia que los especialistas interactúen y que se preocupen por establecer un marco conceptual y un lenguaje común. De este modo, el autor siempre insistió en que “la interdisciplina empieza en un equipo cuando un miembro de una especialidad es capaz de hacerle preguntas a otro miembro del equipo de otra especialidad que él mismo no se ha formulado.”<sup>64</sup> Un paso previo a la investigación interdisciplinaria consiste en la conformación de un equipo multidisciplinario de investigadores. Ello requiere el *expertise* de cada participante en su propio campo de conocimiento. ¿Cuál es la diferencia entonces entre multi e interdisciplina?

[L]a diferencia fundamental entre una investigación multidisciplinaria y una investigación interdisciplinaria está en el modo de concebir una problemática, en el marco epistémico común que hayan generado. En el caso del estudio de un sistema complejo es indispensable que dicha conciencia sobre la *construcción* del objeto de estudio y sobre el modo en que la *sociedad* condiciona esta construcción, esté permanentemente en acción, puesto que se trata de *problemáticas globales* donde los factores sociales juegan un rol fundamental.<sup>65</sup>

Así, uno de los requisitos para el trabajo interdisciplinario es que los miembros “compartan el marco epistémico, es decir, el conjunto de preguntas o interrogantes que los investigadores se plantean con respecto al dominio de la realidad que se han propuesto estudiar. Dicho marco epistémico representa cierta concepción del mundo y expresa la jerarquía de valores de las y los investigadores involucrados.”<sup>66</sup> En este sentido cabe preguntar si cualquier visión del mundo es compatible con la propuesta epistemológica y metodológica de García o si bien, es necesario adoptar las concepciones piagetianas sobre constructivismo y epistemología genética para trabajar desde este marco. En ese aspecto García puso distancia con respecto a los análisis de sistemas distintos al suyo ya que:

En general, en los análisis de sistemas, se habla más de la metodología de trabajo, que tampoco se dice metodología conceptual sino que son vistos sólo como procedimientos de trabajo. A la

---

<sup>64</sup> *Id.*: “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático”, p., 196. El requisito de García para llevar a cabo una investigación interdisciplinaria en sistemas complejos implica un reto para cualquier científico dado que además de dominar el lenguaje de la disciplina propia es necesario que el investigador tenga familiaridad suficiente con las otras. García,

<sup>65</sup> *Ibid.*: p., 204. La cursiva es nuestra

<sup>66</sup> R. García, “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático”, *op. cit.*: p., 102.

epistemología se suele hacer referencia, pero más bien como adorno, porque queda bien hablar de epistemología y la ontología queda absolutamente fuera de la discusión, pero yo creo que es de vital importancia invertir el problema, porque es la concepción epistemológica, lo que he llamado el marco epistémico, la idea que tiene el investigador o los investigadores acerca del tipo de realidad con el cual se están confrontando, de la cual se desprende una ontología y que es la que gobierna siempre la metodología.<sup>67</sup>

Por otra parte, también se advierte en García compatibilidad con el giro historicista respecto a la carga teórica ya que “no hay observables puros” y con el programa fuerte de la sociología de la ciencia pues acepta que el objeto de estudio está condicionado por la sociedad, situación que no debe ser ajena al investigador al momento de realizar el estudio.

La concepción tanto sociológica como socio-genética de la ciencia debe, además, ser común a todos los miembros del equipo de investigación. Por una parte, y con respecto al componente sociológico, la investigación de un sistema complejo responde generalmente a una situación crítica frente a la cual gobiernos, organizaciones y agencias deben intervenir de manera urgente. El contexto social en el que se inscribe la necesidad de diseñar un proyecto de estudio de cualquier problemática global condicionará de manera importante el tipo de preguntas que se formulen. Y las hipótesis de trabajo, que constituyen el punto de partida de un enfoque sistémico, serán fundamentales, puesto que esta metodología supone la reformulación continua de una problemática que se irá definiendo y redefiniendo en el transcurso de la investigación<sup>68</sup>

En este sentido, la investigación de sistemas complejos requiere de un equipo de varios especialistas que tienen como objetivo la solución de problemas de carácter global en el marco de las instituciones sociales. “En síntesis, lo que integra a un equipo interdisciplinario para el estudio de un sistema complejo es un marco conceptual y metodológico común, derivado de una concepción compartida de la relación ciencia-sociedad, que permitirá definir la problemática a estudiar bajo un mismo enfoque, resultado de la especialización de cada uno de los miembros del equipo de investigación.”<sup>69</sup>

Para García existen tres principios que rigen el estudio de los sistemas complejos:

a) Principio de estratificación. Existen niveles en el sistema, cada uno consta de ciertos elementos mismos que no se pueden deducir de otros niveles y sin embargo se encuentran en constante interacción con ellos.

---

<sup>67</sup> *Ibid.*: p., 205.

<sup>68</sup> *Ibid.*: p., 204.

<sup>69</sup> *Ibid.*: p., 206.



b) Principio de articulación. Ello implica la diversidad en el comportamiento de los elementos. Hay subsistemas muy bien articulados (con comportamientos más o menos uniformes entre los elementos) y otros con menor coherencia. La relación entre los subsistemas determina la estructura.

c) Principio de organización sistémica. Las perturbaciones en el todo modifican las partes. La interacción con el medio puede actuar ya sea en todo el sistema o solo en algunas partes del mismo. Si lo segundo ocurre, de cualquier modo el sistema como totalidad organizada será afectado.<sup>70</sup>

La comprensión de estos principios generales de los sistemas complejos constituye el punto de partida para la organización de la investigación interdisciplinaria. La no linealidad o el caos son fenómenos producto de la evolución por reorganización de un sistema. Para ello la totalidad recurre a un mecanismo de compensaciones que tiene como fin su conservación.

Ese mecanismo de compensaciones es capaz de recibir perturbaciones o fluctuaciones de fuera hasta cierto límite; la propiedad de vulnerabilidad que es una propiedad del sistema, o de resiliencia que sería la opuesta a la vulnerabilidad, es la capacidad de absorber las perturbaciones, aunque tiene un límite en todos los sistemas; una vez que se llegó a ese límite el sistema se desestabiliza y esa desestabilización es una ruptura de la estructura interna, esa ruptura significa desorganización; si continúa la perturbación el sistema de compensaciones inherente a este sistema que estamos estudiando, reorganiza las relaciones de tal manera que se puede formar una nueva estructura capaz de absorber la perturbación que antes desestabilizó y en eso consiste una reorganización.<sup>71</sup>

Dentro de un sistema complejo, el trozo de la realidad que se estudia, contiene procesos físicos, sociales, biológicos, económicos, etc. Los objetivos planteados dentro de la investigación establecerán la forma de abordar el problema y la pregunta de investigación guiará el proceso.<sup>72</sup> Las preguntas estarán orientadas de acuerdo a los intereses de los investigadores, a su concepción del mundo y a los factores extra disciplinarios que son los intereses externos. Al conjunto de datos empíricos que entran en el recorte a la hora de construir o configurar el sistema García le denominó complejo empírico. “Los datos empíricos no son el resultado de registros perceptivos sino del registro de observables. Lo que se deja afuera y adentro del sistema, cuáles son sus elementos y a qué estructura corresponden.”<sup>73</sup> De este modo, hay una división explícita en la teoría del

---

<sup>70</sup> *Ibid.*: pp.:197-198.

<sup>71</sup> *Ibid.*: p., 198.

<sup>72</sup> *Ibid.*

<sup>73</sup> *Ibid.*

meteorólogo ente datos, observables y hechos. García se adhirió a la posición de Russel Hanson<sup>74</sup> y aceptó que “toda experiencia está cargada de teoría” sin embargo, estaba convencido de que esto ya había sido demostrado –empíricamente- por Piaget desde una posición distinta: el constructivismo. Recordemos que el suizo afirmó que no hay una lectura directa de la experiencia ya que “todo observable, aun aquellos que parecen provenir de la percepción directa de las propiedades elementales de los objetos, suponen una previa *construcción* de relaciones por parte del sujeto.”<sup>75</sup> García recurrió a las explicaciones de Jean Piaget sobre el desarrollo de las nociones de movimiento, espacio y tiempo en el niño y las utilizó en el texto *Sistemas Complejos* como contraargumento a las propuestas de Rudolf Carnap y Karl Popper sobre el papel de la experiencia en la generación de conocimiento. A partir de su rechazo al empirismo lógico del Siglo XX, –y apegado a las tesis piagetianas– nuestro autor definió a los observables como “formas de organización de datos de la experiencia [*raw data*] que fueron elaboradas en niveles anteriores.”<sup>76</sup> Eso en cuanto a la distinción entre dato y observable. Ahora bien, casi tres décadas antes, el autor ya había profundizado sobre la diferencia entre observable y hecho en “Nature pleads no guilty” publicado por IFIAS, obra a la que hemos hecho referencia al principio del capítulo. En el artículo introductorio el antiguo alumno de Carnap explicitó:

Any "observable" assumes much more than a simple recording of something "given" in the perceptive field. From this point of view it is useful to introduce a distinction between an "observable" and a "fact". Both imply a certain interpretation of the raw data given in the experience. But the former is localized in space and time, whereas a "fact" (whether it refers to a property, to an action or to a more complete event) requires a much larger context. Still in a more obvious way than in the case of an observable, a fact is not the object of direct perception. It is assimilated by means of a pre-existing conceptual frame.<sup>77</sup>

García propuso como ejemplo de hecho que percibir una rama marchita como tal, y no solamente como un patrón óptico, implica poseer conocimiento previo de cómo es una rama viva y darse cuenta de que la posible razón de que ahora esté seca es la falta de agua.<sup>78</sup>

De este modo, para García los observables son datos de la experiencia ya interpretados. Los hechos se forman a partir de las relaciones entre observables, en ese sentido son construidos. El sujeto organiza los observables de diferente manera, unos a temprana edad los cuales constituyen

---

<sup>74</sup> Russel Hanson, *Patterns of Discovery*, 1958.

<sup>75</sup> Rolando García, *Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, p., 41. Las cursivas son del autor.

<sup>76</sup> *Ibid.*: p., 42.

<sup>77</sup> *Id.* *Nature pleads not guilty* p., 7.

<sup>78</sup> *Ibid.*

“la base de la experiencia común de todos los individuos, otros se organizan a edad más avanzada, y otros requieren alto grado de sofisticación de las teorías científicas.”<sup>79</sup> Cada etapa de organización representa un nivel distinto. En cada nivel hay observables a los cuales podemos acceder mediante la experiencia y los sentidos (para García no hay diferencia entre usar instrumentos o no en este sentido). “Pero tales observables constituyen formas de organización de datos de la experiencia que fueron elaboradas en niveles anteriores”<sup>80</sup>. En este sentido García afirmó que Marx sostuvo una oposición epistemológica similar cuando afirmó que lo concreto sólo puede ser considerado cuando se han tomado en cuenta una multiplicidad de relaciones. El argentino partió de la tesis que acepta que el conocimiento se genera cuando el sujeto cognoscente organiza la experiencia con lo cual rechazó la concepción inductivista de la ciencia.<sup>81</sup> Por otra parte, nuestro autor al igual que Piaget evitó caer en posiciones aprioristas, idealistas y subjetivas, pues consideró el conocimiento como un fenómeno social intersubjetivo. Sin embargo, un investigador que registra hechos lo hace siempre a partir de sus propios esquemas interpretativos.

Así, existe una tensión recurrente entre el mundo y cómo lo interpretamos. Entre la realidad externa y lo que el investigador tomará de ella de acuerdo a su esquema interpretativo para el estudio de una problemática compleja. De ahí que García acepte que los límites de un sistema complejo no están claros y tampoco son identificables a primera vista, es decir, no son precisos. Sin embargo, sus componentes no pueden elegirse arbitrariamente. Dos problemas se derivan de esta situación:

- i) la definición de los límites en forma tal que reduzca el mínimo posible la arbitrariedad que en el recorte se adopte; ii) la forma de tomar en cuenta las interacciones del sistema, así definido, con el ‘medio externo’ o, dicho de otra manera, la influencia de lo que queda ‘afuera’ sobre lo que queda ‘adentro’ del sistema, y recíprocamente.<sup>82</sup>

Los límites pueden ser físicos en primera instancia, (fronteras geográficas o políticas), pero a medida que se va desarrollando la investigación, pierden su claridad, ejemplo de ello son los límites que puede haber entre sistemas sociales, económicos, culturales, de valores entre otros. Una vez establecidos los bordes, es importante tener en cuenta que hay ciertos elementos que quedaron fuera. No obstante, si los elementos que se consideraron externos al sistema tienen una relación

---

<sup>79</sup> R. García, *Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, op. cit.:p. 42.

<sup>80</sup> *Ibid.*:

<sup>81</sup> Conviene destacar que el tipo de inductivismo que García rechazó fue el que Alan F. Chalmers denominó en los años setenta como “inductivismo ingenuo”. *Vid.*: Alan F. Chalmers, ¿Qué es esa cosa llamada ciencia?, 1976.

<sup>82</sup> *Ibid.* p., 48.

directa con lo que está “adentro”, serán objeto de atención ya que podrían afectar al sistema. García se refirió a ello como las *condiciones de contorno*, y explicó que “tales condiciones se especifican en forma de flujos (de materia, de energía, de créditos, de información etc.) El factor más importante que se debe tener en cuenta en el estudio de tales flujos es su velocidad de cambio”<sup>83</sup>.

La velocidad de cambio se relaciona directamente con la escala temporal de los fenómenos a estudiar. De ello dependerá si consideramos los flujos como constantes (lentos) o como perturbaciones (rápidos). Sin embargo, el autor también nos advierte acerca del hecho de que “una modificación relativamente lenta de las condiciones en los límites puede producir efectos súbitos en un sistema que está cerca del umbral de inestabilidad. De ahí la necesidad de un análisis riguroso de las escalas temporales.”<sup>84</sup> Al respecto, García se preocupó por dejar claro que cada sistema tendrá una escala de tiempo específica. Además afirmó que tanto la naturaleza del sistema como la pregunta conductora determinan la escala temporal. Pero, ya que la pregunta conductora depende en gran parte del esquema interpretativo del equipo de investigación, la teoría del meteorólogo parece sugerir que el tiempo es un constructo. Ello tiene implicaciones metafísicas evidentes que valdría la pena contrastar a la luz de la posición de Germinal Cocho.

Acerca de qué dejar dentro y qué excluir de nuestro sistema, el argentino indicó que deben estar incluidos los elementos entre los cuales “se detectaron las relaciones más significativas. [...] Las interrelaciones entre ellos [los elementos que quedaron fuera] y los elementos que quedan dentro determinan las condiciones de los límites”<sup>85</sup> Una vez que elaborado el primer recorte conviene recordar que “los componentes de un sistema son interdefinibles, es decir, no son independientes sino que se determinan mutuamente. La elección de los límites debe realizarse en forma tal que aquello que se va a estudiar presente cierta forma de organización o *estructura*”.<sup>86</sup>

Un sistema complejo está compuesto de unidades que a su vez forman subsistemas interactuando entre sí. Como ya hemos señalado, la complejidad no radica en la heterogeneidad de las unidades o subsistemas, sino en las interacciones que existan entre los mismos. La dinámica entre subsistemas determina la estructura, esta última constituye el objetivo de la investigación. Rolando García ofrece un ejemplo concreto sobre un sistema complejo y sus unidades o subsistemas:

---

<sup>83</sup> *Ibid.* p., 49.

<sup>84</sup> *Ibid.* p. 51.

<sup>85</sup> *Ibid.*: p., 49.

<sup>86</sup> *Ibid.*:

Los sistemas ambientales, son sistemas complejos. [...] Un sistema ambiental tiene una localización geográfica y es el asiento de un conjunto de fenómenos que pueden agruparse, en principio, en un cierto número de componentes, que llamaremos subsistemas, y que varían según la naturaleza del sistema. En el caso de un sistema rural asentado en una región ecológica, por ejemplo, tendríamos un sustento físico, una flora y fauna características, un cierto tipo de producción, una población con determinada conformación social, un comportamiento económico, construcciones y obras de infraestructura, conjuntos de políticas que rigen diversos aspectos de la actividad dentro de la región.<sup>87</sup>

El investigador, entonces, requiere de una visión integral de la totalidad o sistema para acercarse a las causas más profundas de determinado problema y por supuesto hacerse las preguntas adecuadas.

El objetivo de identificar una estructura, no es la estructura en sí misma, sino los procesos que en ella se desarrollan. Para esa identificación, García estableció la necesidad de dividir los procesos por niveles. Cada nivel es espacial. El primer nivel corresponde al medio más inmediato al sistema. De tal modo, “Ellos [los procesos básicos o de primer nivel] constituyen, generalmente, el efecto local sobre el medio físico o sobre la sociedad que lo habita y lo explota, de procesos más amplios que tienen lugar en otros niveles”<sup>88</sup>

El primer nivel está dado por el problema que se busca resolver, a lo que García denomina “análisis complejos de carácter diagnóstico, que buscan describir la situación real y sus tendencias en el nivel fenomenológico más inmediato”<sup>89</sup>. El problema se manifiesta en el primer nivel del análisis; las raíces del problema pueden estar en niveles más generales.

Existen tantos niveles como el equipo que investiga el problema considere necesario, en tanto compartan un marco epistemológico en común. Los procesos se organizan de lo particular a lo general. Por otra parte, a lo largo de la obra del autor argentino aparece de manera constante la inquietud acerca del papel de las ciencias sociales en la generación de conocimiento. Una de las preocupaciones de García giró en torno a la tendencia cada vez más evidente de las comunidades científicas hacia las modelizaciones por computadora para unir variables entre niveles y a la investigación cuantitativa en detrimento de la cualitativa. Al respecto García expresó:

---

<sup>87</sup> *Id.*: “Interdisciplinariedad y sistemas complejos”, p. 90.

<sup>88</sup> R. García, *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, op. cit.: p., 56.

<sup>89</sup> *Ibíd.*:

La distinción de niveles con dinámicas características requiere comenzar por un análisis de tipo cualitativo que excluye la práctica corriente de empezar por poner juntas "todas" las variables y entrecruzarlas. Cuando a los datos provenientes de un nivel dado, se agregan los datos provenientes de otro nivel, no se está agregando información, se está introduciendo "ruido". En este punto suele haber confusión. Está claro que el análisis cualitativo incluye toda la información cuantitativa de que pueda disponerse. Esto no contradice la observación precedente, que se refiere a la forma de organizar la información, una tarea en la cual la computadora presta una ayuda muy valiosa, pero que no puede dejarse exclusivamente a su cargo.<sup>90</sup>

Aunado a lo anterior, García criticó el término "ciencias de la complejidad" porque veía detrás de tal denominación el peligro de caer en posiciones radicales donde se afirma que aquello que pertenece al campo de la complejidad debe ser modelado para considerarse científico.

En décadas recientes ha surgido una vasta literatura acerca de lo que se suele llamar, a mi juicio erróneamente, "las ciencias de la complejidad". Como es sabido, el desarrollo explosivo de esta literatura se debe, en gran medida, a la introducción de computadoras de gran capacidad, extraordinariamente rápidas, que permiten atacar problemas que estaban antes fuera del alcance de los métodos matemáticos. La variedad de problemas que fueron abordados, y la cantidad de resultados espectaculares obtenidos, han permitido extender enormemente la comprensión de los procesos no-lineales, pero ello ha llevado también, lamentablemente, a lo que me he permitido llamar "extrapolaciones matemáticas ilegítimas y falacias correlacionadas". Prevalece en la ciencia actual un cierto imperialismo de las computadoras que hace aparecer como no-científico todo estudio de procesos no "modelables" a través de un sistema de ecuaciones diferenciales no-lineales (o de otras modelizaciones más sofisticadas).<sup>91</sup>

Lo anterior implica que no se trata de dejar las computadoras de lado y los sofisticados programas existentes para el análisis y modelización de la realidad, sin embargo, desde la propuesta de García, los especialistas en las ciencias sociales siguen teniendo un papel activo y preponderante en la organización de la información y por ende en la construcción del sistema. Esto debido a que no es la suma de variables la que determina la organización, sino las interacciones que existen entre las mismas.

En resumen, la posición de García se desprende de los modelos de equilibración de Piaget, de la sociología de Lucien Goldman y de los sistemas disipativos de Ilya Prigogine. El estudio de un sistema complejo, desde la perspectiva constructivista aquí presentada, requiere de un trabajo interdisciplinario y a su vez, este tipo de sistemas fundamentan epistemológicamente la

---

<sup>90</sup> *Ibid.*: p., 80.

<sup>91</sup> *Ibid.*: p. 75.

investigación interdisciplinaria. En el siguiente capítulo abordaremos la propuesta de Germinal Cocho y de algunos de los investigadores que han colaborado con este autor a lo largo de su carrera.

## CAPÍTULO 2

### GERMINAL COCHO

#### 2.1 TRAYECTORIA INTELECTUAL Y ACADÉMICA

Adonis Germinal Cocho Gil nació en España en 1933 pero debido a la Guerra Civil emigró a nuestro país durante su infancia. Estudió en la UNAM donde se graduó como médico cirujano en 1955 y como físico en 1959. Un año después ingresó a la Universidad de Princeton en Estados Unidos para realizar el doctorado en materia de física de partículas elementales. Su elección por este campo surgió del interés por “explorar la frontera entre la física y la biología, y otras áreas como la medicina y la sociedad”<sup>92</sup> pues cuando cursó ambas carreras, la frontera principal de trabajo se encontraba en esa rama de la física. Posteriormente viajó a Trieste, Italia para colaborar en el Centro Internacional de Física Teórica de esa ciudad.<sup>93</sup> En la década de los setenta la línea de trabajo de Cocho se concentró en estudiar los sistemas biológicos bajo el enfoque de la física estadística. Ello a partir del reconocimiento de semejanzas matemáticas entre la física cuántica y la mecánica estadística.<sup>94</sup> Esta transición, aunada a su interés en la medicina, le llevó a estudiar enfermedades como el síndrome de inmunodeficiencia adquirida desde la frontera entre ciencias y no a partir de una sola disciplina. Él mismo lo explica del siguiente modo:

En los últimos años me he dedicado, por un lado, al aspecto de las secuencias genéticas, es decir, modelos matemáticos de cómo los genes evolucionan, mutan y se rompen. En colaboración con el doctor Gustavo Martínez Mekler, hemos trabajado en modelos de la evolución de las secuencias del virus del sida. La idea es que si entendemos cómo cambian, probablemente en algunas de sus peculiaridades podamos encontrar un nuevo ataque terapéutico.<sup>95</sup>

Mediante modelos matemáticos, Cocho y su equipo han buscado entender cómo es que el virus interacciona con los linfocitos y otras células del organismo, ello para prolongar el periodo de latencia de la enfermedad. Además de su profundo interés por las matemáticas, la física y la medicina, este investigador ha mostrado a lo largo de su carrera una profunda preocupación por

---

<sup>92</sup> Patricia Vega (comp.), *Galería científica mexicana*, vol. 2, p. 156.

<sup>93</sup> *Vid.*: Francisco Giral, *Ciencia española en el exilio (1939-1989): el exilio de los científicos españoles*, p. 106.

<sup>94</sup> Patricia Vega, *op. cit.*, p. 157.

<sup>95</sup> *Íd.*

desarrollar los vínculos entre ciencia y sociedad. Así lo demuestran las actividades que ha desarrollado desde los setenta, década en la que surgió el programa Ciencia y Sociedad en la Facultad de Ciencias con el cual “buscaba formar científicos conscientes de su propia ciencia”.<sup>96</sup> La idea del programa consistió en:

Hacer un análisis crítico de las interrelaciones entre ciencias naturales y la realidad económica y social en que se vive, y que esto nos permita disponer de elementos de juicio para proponer alternativas. Se ha dicho que el desarrollo de las ciencias naturales conduciría a una mejoría económica y a un mundo más justo; en otras palabras a una sociedad socialista. Sin embargo, el desarrollo de la ciencia en los últimos veinte años solo ha conducido al peligro de una catástrofe nuclear, a la explotación irracional de los recursos económicos, a la brecha cada vez mayor entre países capitalistas dominantes y dominados y, dentro de unos y otros a las diferencias entre clases que aumentan cada vez más. Esta preocupación mundial nació a partir de los conflictos estudiantiles que en todo el mundo se registraron en 1968.<sup>97</sup>

Los alumnos e investigadores participantes en el programa, con Cocho a la cabeza, han buscado desde su creación proponer alternativas para conectar a la Universidad con la sociedad mexicana. Para ello han organizado conferencias y simposios nacionales e internacionales de los cuales han derivado publicaciones. Al repasar los títulos de las ponencias y artículos, destaca la inquietud constante por cuestionar el sistema económico vigente y las alternativas para alcanzar una política científica en beneficio de la sociedad de los países en desarrollo<sup>98</sup>.

---

<sup>96</sup> Aleida Rueda, “El homenaje a Germinal Cocho, constructor de puentes interdisciplinarios”, en Noticias, Instituto de Física UNAM, URL= [http://www.fisica.unam.mx/noticias\\_homenajegerminalcocho2013.php](http://www.fisica.unam.mx/noticias_homenajegerminalcocho2013.php) [consultado el 12 de marzo de 2016]

<sup>97</sup> *Germinal Cocho Gil: imagen y obra escogida*, p. 10.

<sup>98</sup> Algunos de los trabajos de Cocho respecto a la interacción entre ciencia y sociedad encontramos: *Ciencia e ideología*, (1976) durante el Ciclo de conferencias impartidas en la Escuela de Ciencias Marinas de Ensenada, Universidad de Baja California Norte, *La transformación de la universidad mexicana y el caso de la Facultad de Ciencias* (1977), Trabajo colectivo del Programa de Ciencia y Sociedad. Facultad de Ciencias, *Las ciencias naturales y el modo de producción capitalista en colaboración con R. Montemayor* (1978) en el marco de la Discusión del paquete piloto de cursos de posgrado en la Facultad de Ciencias: "Dinámica de sistemas complejos abiertos físicos, biológicos y sociales", "Algunas influencias sociales y culturales sobre los primeros trabajos de Albert Einstein" en coautoría con F. Cocho y R. Rechtman (1979), *Jornadas Einsteinianas*; "Scienza, Società e Ideologia nella America Latina" en coautoría con F. Cocho. Trabajo invitado presentado en el coloquio sobre "Los problemas de una política de investigación científica en los países capitalistas de desarrollo intermedio" en la Universidad de Camerino, Italia, (20-29 de septiembre de 1979), *La revolución cultural y la enseñanza y la y la investigación en las ciencias naturales* (1982) en *Memorias de la 2a. Reunión Costa Rica-México de Enseñanza de las Matemáticas*; "Sobre la Reestructuración de la Investigación y Docencia en la Facultad de Ciencias" en el *Boletín de Enseñanza* 9, CEF, Facultad de Ciencias, (1984), "Grupos Universitarios Interdisciplinarios" en coautoría con F. Cocho y J.M. Lozano en *Publicaciones de Ciencia y Sociedad del Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas* (1985), solo por mencionar algunos.



## 2.2 DEL DEPARTAMENTO DE SISTEMAS COMPLEJOS DEL INSTITUTO DE FÍSICA AL CENTRO DE CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD (C3) EN LA UNAM

Para Germinal Cocho, la propuesta de practicar la ciencia desde un enfoque integral nació desde que estudiaba la carrera de medicina en los cincuenta. Influido por Karl Marx, Cocho veía que en la naturaleza hay diversos niveles con semejanzas y diferencias entre sí. Es decir, “yo veía que los átomos tienen núcleo, que las células tenían núcleo, que uno tiene cerebro, con ciertas diferencias”<sup>99</sup>. Por otra parte, también percibía “que la naturaleza trabaja en zona crítica”<sup>100</sup> cuando se empatan fuerzas.”<sup>101</sup> De este modo, el espíritu científico de Cocho partió de dos premisas 1) En la naturaleza hay diversos niveles con parecidos y diferencias entre ellos y 2) Los niveles trabajan mejor cuando se empatan fuerzas porque ahí es más fácil la regulación. Para ese momento Cocho ya había terminado una tesis de medicina sobre el metabolismo del sodio y el potasio en ratas. Así, bajo las anteriores premisas, Cocho pensó que el estudio de uno y otro tema tiene parecidos metodológicos respecto a los niveles de análisis: “hay que entender el nivel inferior, diríamos el de las partículas más pequeñas a sabiendas de que para pasar a otro nivel había que tomarlas en cuenta y me metí a estudiar física.”<sup>102</sup> En aquella época, la física de las partículas elementales gozaba de gran prestigio. Sin embargo, durante los setenta esta área sufrió un estancamiento a lo cual siguió una migración disciplinar en física.<sup>103</sup> Cocho lo relata de la siguiente manera:

En algún momento por un lado se atranca la física de partículas y por otro lado la gente se da cuenta de que en realidad ésta puede relacionarse con la física estadística en que se tienen muchas partículas que interaccionan entre ellas. Así, se dio un movimiento de los físicos de partículas hacia la mecánica estadística.<sup>104</sup>

---

<sup>99</sup> Entrevista a Germinal Cocho realizada el 22 de junio de 2015 en Ciudad Universitaria. Entrevistadores: María de la Paz Ramos Lara y Jackeline Argüello.

<sup>100</sup> Para este momento, Cocho aún no le nombraba “zona crítica” a tales fenómenos, pero la idea ya estaba planteada en esos términos. Posteriormente, este concepto será de gran utilidad para el desarrollo del programa de investigación del autor. Cuando los componentes de un sistema llegan a una integración tal que todos se influyen entre sí y los estados cambian dramáticamente con inputs muy pequeños hablamos de que se ha llegado a un punto crítico. Las propiedades del punto crítico afectan los alrededores y a esto se le denomina zona crítica.

<sup>101</sup> “Por ejemplo, podemos poner un columpio en una tabla y a dos niños, uno de cada lado. Si estos son de peso diferente, el más pesado eleva al más liviano, pero si ambos pesan igual, basta con que uno de ellos tome una piedra pequeña para que el equilibrio cambie.” Entrevista a Germinal Cocho realizada el 22 de junio de 2015 en Ciudad Universitaria. Entrevistadores: María de la Paz Ramos Lara y Jackeline Argüello.

<sup>102</sup> Entrevista a Germinal Cocho realizada el 22 de junio de 2015 en Ciudad Universitaria. Entrevistadores: María de la Paz Ramos Lara y Jackeline Argüello.

<sup>103</sup> *Vid.* Luis J. Boya, “Estancamiento en la física de partículas y florecimiento en la física matemática 1975-2000”, pp. 347-362.

<sup>104</sup> Entrevista realizada el 22 de junio de 2015 en Ciudad Universitaria. Entrevistadores: María de la Paz Ramos Lara y Jackeline Argüello.

Cocho pertenece a una generación de físicos que vivió un momento de cambio en el programa de investigación dando lugar a la reorientación de sus intereses científicos.<sup>105</sup> Nuestro científico decidió orientar sus esfuerzos hacia los sistemas colectivos no tradicionales, en particular los organismos vivos.

Algunos compañeros y yo intentamos echar a andar una licenciatura y maestría de biofísica en la Facultad de Ciencias. No estaba la situación madura<sup>106</sup> y en ese sentido, al moverme yo en esa dirección [de la mecánica estadística] tenía en mente de nuevo la idea de los diversos niveles y sus interrelaciones.<sup>107</sup>

Así, aunque la intención inicial de una licenciatura y maestría en biofísica no prosperó durante los setenta, la idea de arrancar un programa de investigación en el marco de los sistemas complejos dentro de la física teórica ya había germinado en Cocho y su equipo. En 1973 el médico encabezó el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias de la UNAM en el cual “se trató de definir y poner en práctica un enfoque progresista de izquierda de la ciencia”.<sup>108</sup> Cocho fungió como fundador y miembro activo del mismo durante una década (1973-1983). “Las labores realizadas en ese programa sirvieron de base a los esfuerzos organizativos que culminaron eventualmente en la formación del Departamento de Sistemas Complejos del IF-UNAM”.<sup>109</sup> En las reuniones los participantes discutían acerca de la física de los fenómenos críticos y los cambios cualitativos. Las herramientas de análisis para tal efecto eran tan amplias que abarcaban desde la matemática de la teoría de las catástrofes, hasta enfoques como el psicoanálisis y las propuestas de Piaget. Ello siempre “teniendo en cuenta la presencia de rasgos universales asociados a diversos ‘niveles de la materia’ en el punto crítico.”<sup>110</sup> En materia de enseñanza, el programa Ciencia y Sociedad buscó materializar lo que ahí se discutía mediante un paquete de posgrado sobre la dinámica de sistemas complejos abiertos físicos, biológicos y sociales. Germinal Cocho impartió en este paquete de 1978 a 1980 los cursos:

a) Análisis crítico de las ideas sobre la estructura de la materia.

---

<sup>105</sup> Por ejemplo, Shagen Hacyan, físico teórico del Instituto de Física de la UNAM, una vez terminado su doctorado en física de partículas en Sussex, Inglaterra, decidió abandonar esta rama de la física por la astrofísica y la relatividad general. *Vid.* Jorge Chimal, *Luz interior, conversaciones sobre ciencia y literatura*, 2001.

<sup>106</sup> Al expresar que la situación no estaba madura, Cocho se refiere a que había madurez de las ideas sin embargo, no contaban en ese momento con suficiente gente interesada en el proyecto.

<sup>107</sup> Entrevista a Germinal Cocho realizada el 22 de junio de 2015 en Ciudad Universitaria. Entrevistadores: María de la Paz Ramos Lara y Jackeline Argüello.

<sup>108</sup> Gustavo Martínez Mekler, “Una aproximación a los sistemas complejos”, p. 135.

<sup>109</sup> Currículum Germinal Cocho Gil. URL= [http://www.fis.unam.mx/pdfs/curr\\_Cocho.pdf](http://www.fis.unam.mx/pdfs/curr_Cocho.pdf) [fecha de consulta: 2 de enero de 2016]

<sup>110</sup> Gustavo Martínez Mekler, *op. cit.*: p.135, *el entrecomillado es del autor*.

b) Asimilación y aprendizaje en sistemas complejos.

c) Análisis crítico de la política científica y del modo de producir la ciencia en el mundo contemporáneo.

d) Métodos locales y globales en física.

Como se puede observar, el paquete además de incorporar las materias estrictamente científicas, también incluyó el análisis crítico de la relación entre política y producción en la ciencia. De manera paralela, en 1977 Cocho echó a andar el proyecto de investigación *Dinámica de sistemas complejos como parte del programa de altas energías* en el Instituto de Física (IF). En 1981 el proyecto se convirtió en programa e incorporó a un tercio del Departamento de Física Teórica. Ello llevó en 1989 a la fundación del Departamento de Sistemas Complejos.<sup>111</sup> Aunado a lo anterior, en 1985 Cocho propuso la formación de los Grupos Universitarios Interdisciplinarios y coordinó durante seis años el Grupo Universitario Interdisciplinario de Dinámica no Lineal y Fenómenos Colectivos “el cual contó con la colaboración de al menos 50 investigadores provenientes de una decena de dependencias de la UNAM.”<sup>112</sup> En este contexto, en el Instituto de Física de la UNAM con un fuerte impulso de Cocho Gil, se realizó un seminario semanal sobre Física Estadística y Sistemas Dinámicos. El físico relata que el proyecto nació “como una especie de reto porque inicialmente ubicábamos este tipo de sistemas complejos dentro de la biología, pero de repente surgió la pregunta “si somos físicos, ¿por qué no lo hacemos desde la física?”<sup>113</sup> Así, Cocho y su equipo empezaron a estudiar sistemas complejos biológicos desde el punto de vista de la física.

Eventualmente transformamos ese proyecto en el departamento de sistemas complejos con lo cual nos adelantamos al Instituto Santa Fe de los Estados Unidos. Pero a nivel personal el adelanto era mucho mayor porque yo tenía esa concepción desde los veintitantos años, con una visión, llamémoslo de izquierda porque de ahí venía, mientras que Santa Fe pues es más bien una visión de derecha.<sup>114</sup>

---

<sup>111</sup> *ibíd.*:

<sup>112</sup> Germinal Cocho, *Nuestros maestros*, p. 291.

<sup>113</sup> Entrevista a Germinal Cocho *op. cit.*:

<sup>114</sup> Germinal Cocho cuenta que a finales de los ochenta surgió la propuesta por parte de Santa Fe de establecer dentro de la UNAM una filial de su instituto pero “nosotros no veíamos una filial de Santa Fe en la UNAM” dadas las diferencias ideológicas de fondo. En otra anécdota, el físico relata que “en algún momento Santa Fe organizó una reunión de biología teórica [18 al 21 de agosto de 1991, *Encuentro anual de la Sociedad para la Biología Matemática*, Instituto Santa Fe, Nuevo México]. La gente que participó tenía la religión de los sistemas complejos, nosotros teníamos más de una religión. Nos gustaba lo simple y lo complejo y en particular el enfoque de izquierda, el materialismo dialéctico, pero éramos parte de la familia. Entonces,

Los miembros que conformaron en 1989 el Departamento de sistemas complejos del IF “eran gente que tenía doctorado y que manejaba técnicas físico matemáticas”.<sup>115</sup> No obstante, con el paso del tiempo y la consolidación del departamento, la investigación se ha ido abriendo hacia otras disciplinas. Gustavo Martínez Mekler, primer jefe del departamento de sistemas complejos, relata que:

La finalidad del Departamento fue la de promover estos estudios sobre sistemas complejos, dentro de un marco institucional. En la práctica, los miembros del Departamento siempre han sido físicos. Posteriormente, en 2008, con la creación del Centro de Ciencias de la Complejidad (C3), en la UNAM se amplió el horizonte al contemplar la participación de académicos con formación en otras áreas. En ambos casos, la finalidad ha sido desarrollar estudios interdisciplinarios que permitan abordar problemas de trascendencia. Para los físicos, esto nos abre una oportunidad para tratar problemas de impacto social, encaminados a un bienestar más justo.<sup>116</sup>

Además del Departamento de Sistemas Complejos (creado en 1989) y de la posterior conformación del C3<sup>117</sup> (2008), el programa de investigación en sistemas complejos iniciado por Cocho se expandió a otras instituciones dentro y fuera de la UNAM. En 1982 el Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias creó el Grupo de Biomatemática con integrantes formados por Cocho tales como Pedro y Octavio Miramontes Vidal<sup>118</sup> y que en la actualidad son colegas del científico mexicano.<sup>119</sup> La biología teórica ha sido objeto de discusión entre los científicos desde

---

cuando se inaugura esa reunión habló Stuart Kauffman, quién dijo textualmente lo siguiente: ‘somos conscientes de que en esto de los sistemas complejos hay mucha demagogia pero creemos en nuestra garantía y esa es que tenemos aquí mucha gente de buena fe que es inteligente.’ A los dos días de que Stuart Kauffman dice eso, se entrevista con banqueros y sale la noticia. Ahí dice algo totalmente diferente como que los sistemas complejos van a salvar a la economía. Entonces, lo que quiero decir es que hay demagogia de la cual los científicos son conscientes pero el instituto de Santa Fe apoya el segundo discurso, el de Stuart Kauffman, como consultores de la gente que hace negocio. Esto es mi punto de vista.” Entrevista a Germinal Cocho, *op. cit.*:

<sup>115</sup> Entrevista a Germinal Cocho, *op. cit.*:

<sup>116</sup> Entrevista a Gustavo Martínez Mekler, *Revista Digital Universitaria*, p. 7-xx. URL= <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num4/art44/art44.pdf> [fecha de consulta: 3 de febrero de 2016]

<sup>117</sup> El Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM (C3) nació a partir de la propuesta de investigadores del Instituto de Ciencias Nucleares, del Instituto de Física, del Instituto de Ecología y del Instituto de Ciencias Físicas (Cuernavaca); surgió primero como un proyecto virtual, después se consolidó como programa especial y eventualmente contó con un edificio propio inaugurado el 3 de noviembre de 2015. Antes de contar con su propio espacio, las actividades del C3 se llevaban a cabo de manera virtual y dentro de las instalaciones de la Torre de Ingeniería (TI). *Cfr.* Yureli Cacho, “Se inauguran las instalaciones del Centro de Ciencias de la Complejidad”, Agencia Informativa Conacyt, 3 de noviembre 2015. URL= <http://www.conacytprensa.mx/index.php/sociedad/politica-cientifica/3824-ojo-publicar-hoy-se-inauguran-las-instalaciones-del-c3-de-la-unam>, [consultado el 3 de marzo de 2016]

<sup>118</sup> *Cfr.* Octavio Miramontes, Currículum, URL= <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/cv2.html>;

<sup>119</sup> Cocho Gil dirigió la tesis de doctorado del primero y la de licenciatura del segundo, además han colaborado conjuntamente en numerosas publicaciones. Algunos ejemplos: “The effect of DNA stability on

principios del siglo XX. Los debates a favor y en contra de estudiar el mundo de la vida desde una concepción teórica de la biología se deben en parte, como señala Pedro Miramontes, a las divergencias entre lo que los científicos consideran como “teoría”.<sup>120</sup> Mientras que los físicos y matemáticos entienden por teoría un cuerpo de leyes y principios deductivos sujetos a comprobación posterior a partir de hechos empíricos (como en la física teórica), gran parte de los biólogos piensa que su ciencia “es histórica y contingencista y adicionalmente muestran desconfianza y resentimiento hacía el gremio de los físicos.”<sup>121</sup> Paralelamente a la discusión sobre la posibilidad de una biología teórica, otros problemas filosóficos de la ciencia surgen, como por ejemplo, si se debe matematizar la biología (los modelos matemáticos han contribuido enormemente al avance de la biología teórica, aun así, hay discrepancias respecto a qué se entiende por biología matemática, para unos significa biometría mientras que otros rechazan esta noción<sup>122</sup>) o acerca del papel que juegan conceptos como “organismo” y “gen” para el estudio de la vida. Este último problema, se ha convertido de cierta manera en un debate entre estudiar el todo o las partes vinculado a la perspectiva sistémica,<sup>123</sup> temas que los partidarios de una visión desde la complejidad en ciencia trabajan de manera constante. El Grupo de Biomatemática de la UNAM recogió en parte, con maneras y modalidades distintas, el legado académico del Programa Ciencia y Sociedad.<sup>124</sup> El propio Cocho es miembro del Grupo. En 1987 Cocho organizó junto con José Luis Rius la primera Reunión Internacional Waddington sobre Biología Teórica (1-5 de septiembre de 1987 en Oaxtepec, Morelos) a la cual asistieron figuras como Brian Goodwin, Peter Saunders, Mae-Wan Ho, Bernardo Huberman, Stuart Kauffman, René Thom, Francisco Varela, Christopher Zeeman y

---

mutation and sequence evolution.” L. Medrano, G. Cocho, P. Miramontes y J.L. Rius. *Evolutionary Theory* 39, 2 (1994); “Structural and thermodynamic properties of DNA uncover different evolutionary histories”, P. Miramontes, L. Medrano, R. Cedergren y, G. Cocho, *Journal of Molecular Evolution*, vol. 40, núm. 698 (1995), “Levy walk patterns in the foraging movements of spider monkeys (*Ateles geoffroyi*)”, G. Ramos-Fernández, J.L. Mateos, O. Miramontes, G. Cocho, H. Larralde y B. Ayala Orozco, *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 55, núm. 3, (2004), “DNA dimer correlations reflect in vivo conditions and discriminate among nearest neighbor base pair free energy parameter measures”, P. Miramontes y G. Cocho, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 321, núm. 3–4 (2003), “Modeling the searching behavior of social monkeys”, D. Boyer, O. Miramontes, G. Ramos-Fernández, J.L. Mateos y G. Cocho. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 342, (2003), “On the behavior of journal impact factor rank-order distribution”, R. Mansilla, E. Koppen, G. Cocho y P. Miramontes, *Journal of Informetrics* vol. 1, núm. 2 (2007).

<sup>120</sup> Cfr. Pedro Miramontes, “La biología matemática”, 2004

<sup>121</sup> *Ibid.*: p. 59.

<sup>122</sup> Vid. José Luis Gutierrez (Ed.), “Clásicos de la biología matemática”, 2002.

<sup>123</sup> Vid. Arantza Etxeberria y Jon Umerez, “Organismo y organicismo en la biología teórica. ¿Vuelta al organicismo?”, 2006.

<sup>124</sup> Cfr. Gustavo Martínez, “Una aproximación a los sistemas complejos”, 2012.

Lewis Wolpert entre otros. El objetivo de la reunión fue dar continuidad a las propuestas de Waddington sobre epigenética, evolución y biología teórica desde los sistemas complejos.<sup>125</sup>

Por otra parte, el Diplomado en Medicina y Complejidad, inaugurado en 2010 bajo la titularidad de Germinal Cocho, constituye otro esfuerzo significativo en la materia dentro de la Universidad. Los objetivos del diplomado son: 1. Revisar algunos de los problemas más relevantes y significativos en la ciencia médica. 2. Revisar los paradigmas de la ciencia en general y de la medicina para ubicar la situación actual. 3. Conocer los conceptos fundamentales de ciencia de la complejidad y las posibilidades de analogía en medicina. 4. Presentar el soporte matemático actual de ciencia de la complejidad y evaluar aplicaciones en la ciencia médica. 5. Presentar los fundamentos de teoría de redes y de cómputo. 6. Presentación de modelos. 7. Intercambiar conocimiento y experiencias con científicos dedicados a ciencias de la materia y la vida, cómputo y matemáticas. 8. Presentar propuestas de trabajo interdisciplinario para problemas en salud.<sup>126</sup> Educación Médica Continua de la Facultad de Medicina y el C3 conformaban las entidades participantes. Fuera de la Máxima Casa de Estudios, Cocho junto con otros investigadores de la UNAM ha contribuido como asesor en la creación de la maestría en “Sistemas complejos y dinámica no lineal” en el posgrado de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México<sup>127</sup>.

## 2.3 LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN GERMINAL COCHO.<sup>128</sup>

---

<sup>125</sup> Waddington y René Thom concibieron el proceso embriológico como un sistema dinámico en el que el desarrollo embrionario está restringido por el paisaje epigenético. Además de estas propuestas, Waddington dedicó su vida a la divulgación científica y al desarrollo de la biología teórica. Para ello, llevó a cabo cuatro encuentros en la Villa Serbelloni en el lago de Como, Italia. Las conferencias contaron con la participación de destacados filósofos y científicos como Karl Popper, John Maynard-Smith, Graham Cairns-Smith, entre otros. Tras la muerte en 1975 de Waddington las conferencias se suspendieron. Germinal Cocho y José Luis Rius retomaron la iniciativa y organizaron la primera en Oaxtepec. A este encuentro se sumaron nuevos participantes como Faustino Sánchez, Nina Pastor, Toño Lazcano, Julio Collado, Leonel Torres, Paul Davies, Santiago López de Medrano, Lynn Trainor y Pedro Miramontes entre otros. *Vid.* Pedro Miramontes, *Rio de tiempo y agua: procesos y estructuras en la ciencia de nuestros días*, 2010. Las ponencias presentadas en Oaxtepec en 1987 se encuentran reunidas en el libro editado por Peter Saunders y Brian Goodwin, *Theoretical Biology: Epigenetic and Evolutionary Order from Complex Systems*, 1989.

<sup>126</sup> Página web del Diplomado en Medicina y Complejidad, URL=<http://www.medicinaycomplejidad.org/objetivos.html> (Fecha de consulta: 11 de febrero de 2016)

<sup>127</sup> Además de Cocho Gil, entre los asesores al grupo de trabajo en Dinámica no lineal y Sistema Complejos se encuentran los siguientes académicos de la UNAM: Rafael Barrio, Denis Boyer, Octavio Miramontes y Luis de la Peña del IF, Ricardo Mansilla del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Gustavo Martínez Mekler del Instituto de Ciencias Físicas, Luis Medrano, Faustino Sánchez Garduño y Pedro Miramontes de la Facultad de Ciencias y Pablo Padilla del Instituto de Investigaciones Matemáticas.

*Vid.* URL=[http://c3.unam.mx/images/library/file/ConvocatoriaCienciasCompl\\_2015-1.pdf](http://c3.unam.mx/images/library/file/ConvocatoriaCienciasCompl_2015-1.pdf) [fecha de consulta: 21 de abril de 2016]

<sup>128</sup> Para el desarrollo de esta parte nos apoyaremos en los textos publicados por Cocho pero también recurriremos a sus alumnos y colegas, pues comparten la misma perspectiva.

Gustavo Martínez Mekler apunta a que no hay una sola definición universalmente aceptada del concepto sistema complejo. “En cierta forma esto es parte de su atractivo.”<sup>129</sup> En *Al borde del milenio, caos, crisis y complejidad*<sup>130</sup>, Cocho y Mekler explican que los sistemas complejos son aquellos que tienen muchos elementos “que interactúan fuertemente entre sí, dando lugar a la emergencia de comportamientos globales que se encuentran interrelacionados.”<sup>131</sup> La evolución temporal de estos sistemas es no-lineal, lo cual quiere decir que “los efectos no son proporcionales a las causas”<sup>132</sup>. En ese sentido, Cocho (al igual que García) afirma que si queremos caracterizar las propiedades emergentes en un sistema de esta naturaleza, no basta con estudiar los componentes individuales. La complejidad de un sistema “viene asociada con el nivel de descripción y con los aspectos estructurales, dinámicos y funcionales en que estemos *enfocando nuestra atención*.”<sup>133</sup> Si aceptamos lo anterior, entonces un sistema puede ser simple y complejo a la vez. Este enfoque permite suavizar la dicotomía holismo-reduccionismo “pudiéndose plantear una síntesis complementaria”.<sup>134</sup> Recordemos que para Cocho la materia se organiza en niveles. Los sistemas complejos también obedecen a determinados niveles de organización. Estudiar los componentes detalladamente para dar cuenta de las interacciones entre un nivel y otro será primordial en ciertos casos, en otras circunstancias esto será secundario.<sup>135</sup> De manera general, los sistemas complejos se caracterizan a partir de sus propiedades: son sistemas con muchos componentes con un alto grado de interacción entre ellos, presentan varias escalas de descripción y dan lugar a la emergencia de comportamientos colectivos.<sup>136</sup> La interacción entre los elementos es no lineal y derivado de ello se dan procesos de retroalimentación. “Cuando la retroalimentación es con el entorno del sistema, se tiene un proceso de adaptación, en cuyo caso se habla de sistemas complejos adaptativos.”<sup>137</sup> A continuación abordaremos algunos de los conceptos principales en la perspectiva de sistemas complejos de Cocho. Empezaremos por el concepto de “protectorado” que implica los niveles de organización de la materia para posteriormente pasar a la no-linealidad, caos, atractores, zona crítica y la auto-organización.

### **2.3.1 PROTECTORADOS**

<sup>129</sup> Gustavo Martínez, *Revista Digital Universitaria*, p. 3-xx. URL=<http://www.revista.unam.mx/vol.13/num4/art44/art44.pdf> [fecha de consulta: 3 de febrero de 2016]

<sup>130</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, 1999.

<sup>131</sup> *Ibid.*, p. 10.

<sup>132</sup> *Ibid.*

<sup>133</sup> Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.* p. 11. *Las cursivas son nuestras*.

<sup>134</sup> Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.* p. 11.

<sup>135</sup> *Cfr.* Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.*

<sup>136</sup> *Cfr.* Entrevista a Gustavo Martínez Mekler, *Revista Digital Universitaria*, p. 4-xx. URL=<http://www.revista.unam.mx/vol.13/num4/art44/art44.pdf> [fecha de consulta: 3 de febrero de 2016]

<sup>137</sup> *Ibid.*

Como hemos visto, Germinal Cocho parte de aceptar que en la naturaleza hay diversos niveles de organización con semejanzas y diferencias entre sí. Las semejanzas se traducen en propiedades macroscópicas que no se reducen a la naturaleza microscópica del sistema. Por ejemplo, nos dice Cocho, los líquidos tienen la propiedad de formar ondas sin importar si se trata de gasolina o agua y cualquier dispositivo analógico o digital tiene en principio, la propiedad de la computabilidad. Turbulencia y computabilidad son “propiedades protegidas”<sup>138</sup> de la materia. La materia a su vez, se auto-organiza en escalas y niveles diferenciados, “por ejemplo una escala es la de los quarks, otra lo es la de los hadrones (neutrones y protones) y otra la de los átomos. No hay una organización en escalas intermedias. [...] hay que elegir el nivel adecuado de descripción y análisis para entender un fenómeno: No tiene sentido resolver la ecuación de Schrödinger para estudiar por qué se funde un foco.”<sup>139</sup> Desde esta perspectiva, la biología y la física son ciencias de escalas en su dimensión material así como en la organización espacio-temporal. Es decir:

La predicción climática es prácticamente imposible de una semana a otra. Pero las estaciones se suceden a lo largo de los años con gran parsimonia; un huracán es una estructura de hermosa regularidad cuando se fotografía desde un satélite; pero una paloma atrapada en medio de ellos no piensa lo mismo. [...] una hormiga tiene un comportamiento irregular y desordenado mientras que el colectivo de hormigas es una organización coherente y armónica.<sup>140</sup>

Así, la materia se auto-organiza de manera espontánea dando lugar a una jerarquía a pesar de que en los componentes más elementales de la misma (por ejemplo los quarks, los genes, o las células) ello no está predeterminado. A modo de ilustración, Cocho y Pedro Miramontes presentan tres imágenes de fenómenos que son muy parecidos entre sí tanto cualitativa como cuantitativamente (los tres fenómenos presentan cualidad y dimensión fractal) lo que da lugar a patrones similares que sin embargo tienen orígenes diferenciados.

---

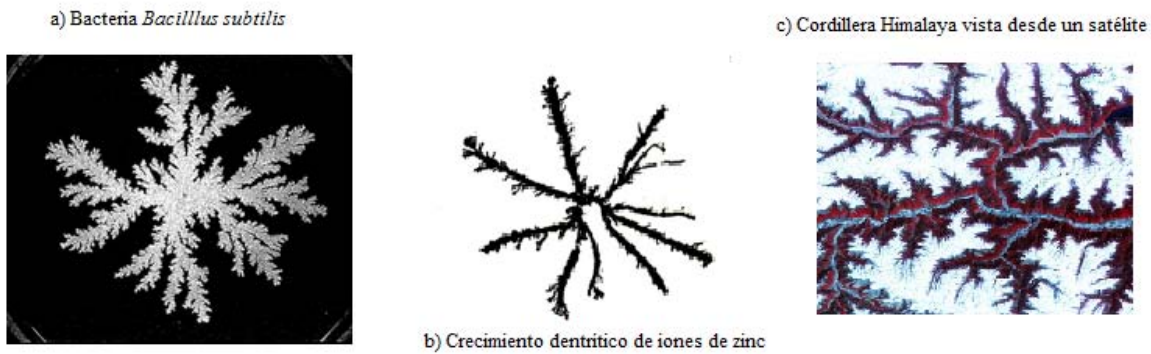
<sup>138</sup> Así las llaman Cocho y Miramontes en su artículo.

<sup>139</sup> Germinal Cocho y Pedro Miramontes, “Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados”, p. 193.

<sup>140</sup> *Ibid.*



Figura 1<sup>141</sup>



Cuando el conjunto de elementos de un sistema gana complejidad, la homogeneidad entre los componentes se pierde. A este proceso se le denomina ruptura de simetría.<sup>142</sup> Entonces, la complejidad origina la individualidad, pero dialécticamente, se manifiesta únicamente bajo acciones colectivas.<sup>143</sup> Desde el enfoque que propone Cocho, en la naturaleza existe un patrón que se repite de manera constante: los ingredientes de los niveles inferiores se agrupan sin que en su constitución interna se encuentre explícita la orden de agruparse, para dar lugar a los integrantes de los niveles superiores.<sup>144</sup> A este “proceso espontáneo de organización de elementos individuales en estructuras coherentes le llamamos auto-organización.”<sup>145</sup>

### 2.3.2 NO-LINEALIDAD Y CAOS

La linealidad en física y en matemáticas se refiere a que “el resultado de una acción es siempre proporcional a su causa: al doble de fuerza, doble de trabajo; a grandes males, grandes remedios.”<sup>146</sup> La no linealidad se da cuando un efecto no es proporcional a su causa. La relación entre estas magnitudes medibles se establece a través del factor de proporcionalidad. “Un problema lineal se considera resuelto cuando se tienen soluciones *cuantitativas*. Al abordar la no linealidad, las soluciones cuantitativas quedan por lo general fuera de nuestro alcance, pero no así los comportamientos cualitativos. Estos pueden ser descifrados y su estabilidad determinada.”<sup>147</sup> Aunado a ello, pequeñas modificaciones en el sistema conducen a cambios significativos.<sup>148</sup> La

<sup>141</sup> Imagen a) *Bacillus subtilis*. Fuente: Hiroshi Fujikawa y Mitsugu Matsushita, “Fractal Growth of *Bacillus subtilis* on Agar Plates”, 1989. Imagen b) crecimiento dendrítico de iones de zinc. Fuente: Vicente Talanquer, *Fractus, fracta, fractal: fractales, de laberintos y espejos*, 2010. Imagen c) Cordillera Himalaya. Fuente: satélite ASTER (17/2/2002) USGS National Center for EROS and NASA.

<sup>142</sup> Germinal Cocho y Pedro Miramontes, *op. cit.*, p. 196.

<sup>143</sup> *Ibid.*

<sup>144</sup> *Ibid.*

<sup>145</sup> *Ibid.* p. 199.

<sup>146</sup> Pedro Miramontes, *Rio de tiempo y agua: procesos y estructuras en la Ciencia de nuestros días*, p. 71.

<sup>147</sup> Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.* p. 13.

<sup>148</sup> *Cfr.* Entrevista a Gustavo Martínez Mekler, *Revista Digital Universitaria*, 2012.

mayoría de los fenómenos de la naturaleza son no-lineales.<sup>149</sup> Cocho y sus colegas han criticado la insistencia por parte de la comunidad científica por estudiar el mundo desde la linealidad. Pedro Miramontes por ejemplo, rescata en el libro *Río de tiempo y agua* una analogía de Gottfried Mayer Kress para responder al cuestionamiento sobre por qué los científicos insisten en el enfoque lineal: “La situación de la mayoría de las ciencias que persisten en usar enfoques lineales es la misma que la de una persona que pierde las llaves del carro y las busca bajo la luz de un farol porque en el sitio en donde las perdió está demasiado oscuro para poder buscar.”<sup>150</sup> Cocho y Martínez Mekler por su parte, afirman que dicha insistencia se debe a la inclinación de los científicos “por las soluciones exactas y al éxito de los tratamientos lineales en el mundo cuántico”<sup>151</sup>. Con el caos como concepto que va ganando terreno en la ciencia de los últimos cuarenta años, los fenómenos no lineales empezaron también a cobrar importancia dentro de las agendas de investigación. “El caos solo aparece con dinámicas no lineales, y como durante buena parte del siglo XX se confundieron sus manifestaciones con una especie de ‘ruido molesto’ que apantalla comportamientos regulares, predecibles y controlables, el estudio de los sistemas no lineales se vio relegado a un segundo plano.”<sup>152</sup> Sin embargo, Henri Poincaré y George D. Birkhoff ya habían estudiado sistemas dinámicos no lineales desde finales del siglo pasado. Stephen Kellert, afirma que cuando nos preguntamos por qué tomó a los investigadores tanto tiempo interesarse en la teoría del caos, una de las posibles respuestas es que hasta hace poco (mitad de siglo XX) no existían computadoras capaces de llevar a cabo los cálculos correspondientes. Sin embargo, para el filósofo de la ciencia norteamericano ésta es una respuesta a medias pues otros factores socioculturales intervinieron en el proceso.<sup>153</sup> Al demostrar en 1892 la imposibilidad de asegurar que el Sol se mantendrá siempre en su configuración actual, Poincaré cuestionó uno de los principales pilares de la mecánica newtoniana.<sup>154</sup> El matemático estadounidense Birkhoff retomó el trabajo del francés y siguió estudiando la inestabilidad en la mecánica celeste. Derivado de sus resultados, en 1916 acuñó el término “*remarkable curve*” para lo que actualmente conocemos como atractor. Cocho, retomando a Kellert, explica que el descuido por parte de los físicos hacia el caos y los fenómenos no lineales disminuyó cuando en 1978 Feigenbaum por un lado, y Treser y Couillet por otro, “mostraron que se

---

<sup>149</sup> Vid. Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.*, y Pedro Miramontes, “Del maligno librame señor”, 2012.

<sup>150</sup> Gottfried Mayer Kress, cit. por: Pedro Miramontes, *Ríos de tiempo y agua*, p. 5.

<sup>151</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, p. 13.

<sup>152</sup> *Ibid.*, p. 15.

<sup>153</sup> Entre ellos, el autor menciona por ejemplo el interés social en la explotación de la naturaleza, mismo que contribuyó a que las instituciones científicas dejaran de lado los sistemas físicos que aún no estaban sujetos a manipulación y análisis. Cfr. Stephen Kellert, *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems*, 1993.

<sup>154</sup> Cfr. Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, 1999.

puede obtener un comportamiento extremadamente complejo de una ecuación de evolución extremadamente sencilla.”<sup>155</sup> Las aportaciones del físico estadounidense Mitchell Feigenbaum fueron esenciales para el desarrollo de la teoría del caos pues demostró que puede haber movimientos erráticos en la naturaleza que no son aleatorios, sino que responden a reglas fijas. Para Cocho y Mekler, de las aportaciones del físico estadounidense se derivan dos consecuencias importantes. En primer lugar, a partir de las constantes que se han conocido como los números Feigenbaum, es posible cuantificar un comportamiento cualitativo. En segundo lugar y no menos importante, la propiedad de universalidad del comportamiento caótico de los sistemas ha motivado a los científicos a realizar:

[...] una serie de experimentos (por ejemplo, fluidos) que requieren para su descripción de un número infinito de variables (grados de libertad), con el resultado de que la medición de la constante de Feigenbaum corroboró el valor determinado con la logística. Con ello se mostró que algunos aspectos del comportamiento de fenómenos naturales muy elaborados obedecen a reglas de evolución muy simples.<sup>156</sup>

## Figura 2

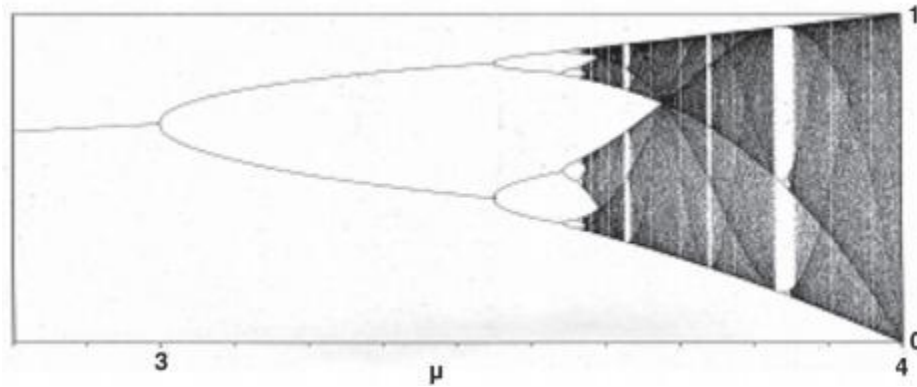
Diagrama de Feigenbaum<sup>157</sup>

---

<sup>155</sup> Cocho explica que “el mapeo o transformación que Feigenbaum es conocido con el nombre de logística y fue propuesto por Robert May (1976) para el estudio de la dinámica de poblaciones marinas. Su forma explícita es  $X_{t+1} = \mu X_t (1 - X_t)$ , donde  $X_t$  indica la densidad de población de una especie al tiempo  $t$  (el cual ha sido discretizado) y  $\mu$  es un parámetro asociado con la tasa de crecimiento de la población. La no linealidad viene del cuadrado de  $X_t$ , término que aparece en la forma de una retroalimentación y representa una restricción ecológica (poblaciones muy grandes reducen la capacidad de crecimiento). Con la anterior interpretación,  $X$  tiene sentido cuando toma valores entre 0 y 1. Si el rango de  $\mu$  se restringe entre 0 y 4, entonces las  $x$  se mantendrán en el rango adecuado a lo largo del tiempo. Sucede que al ir variando  $\mu$ , la dinámica a tiempos largos presenta cambios cualitativos para valores específicos de  $\mu$ ; al pasar por tales valores ocurre lo que en sistemas dinámicos se conoce como una *bifurcación*. Cuando  $\mu$  toma valores entre 0 y  $\mu=3.569945\dots$  la dinámica tiende a un comportamiento fijo o periódico para tiempos largos. Ese comportamiento estable corresponde a lo que se conoce como un *atractor*; las evoluciones temporales (órbitas) quedan eventualmente regidas por el atractor. Las órbitas van duplicando su periodo (doblamiento de periodo) al incrementarse  $\mu$  hasta llegar al valor  $\mu$ , para el cual se tiene un comportamiento de periodo infinito, lo que corresponde a la emergencia del caos” Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.*, p. 16.

<sup>156</sup> Germinal Cocho y Gustavo Martínez, *op. cit.*, p. 17.

<sup>157</sup> Fuente: Martín *et al.* *Iniciación al caos*, 1998.



### 2.3.3. ATRACTORES

Un sistema evoluciona con el paso del tiempo y “tiene varias posibilidades como destinos finales. A estos destinos [entes geométricos sumergidos en el espacio de fase] se les llama atractores.”<sup>158</sup>. Si el atractor es un punto fijo, se le conoce como atractor puntual (por ejemplo una canica moviéndose en el fondo de una vasija). En este caso el punto más bajo del recipiente es el atractor de la trayectoria.<sup>159</sup> Las órbitas planetarias son ejemplos de atractores periódicos. Los atractores de ciclo límite describen sistemas que pasan de manera periódica por el mismo conjunto de estados sin parar (tal es el caso de los satélites artificiales). En un sistema también puede haber más de un atractor. Al conjunto de estados iniciales “jalados” hacia un atractor particular se le conoce como *cuenca de atracción*. Los atractores puntuales y los de ciclo límite comparten la característica de regularidad, es decir, el sistema recorre puntos iniciales cercanos uno del otro conforme evoluciona. Sin embargo, en algunos casos esta propiedad se “transgrede”. Cuando eso sucede estamos ante un atractor extraño o caótico. “Un símil un tanto burdo de la estructura de este tipo de atractor es la trayectoria de una mariposa nocturna que, atraída por la luz del foco que ilumina una habitación, vuela desde cualquier punto de esta y da vueltas alrededor de la bombilla, de una manera que se antoja impredecible.”<sup>160</sup> Para que un atractor se considere extraño debe cumplir con ciertas características como trayectorias sensibles a las condiciones iniciales, acotadas y aperiódicas. Esto implica que las trayectorias a pesar de estar acotadas, recorren estados cuyos puntos divergen exponencialmente con el tiempo. No obstante de la irregularidad de su recorrido, los atractores extraños “poseen geometría fractal bien determinada.”<sup>161</sup> En este punto, conviene

<sup>158</sup> Germinal Cocho y Pedro Miramontes, “Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados”, p. 200.

<sup>159</sup> Cfr. Hortensia Gonzalez y Humberto Arce, “El caos, un intento por dar sentido a la realidad”, 2012.

<sup>160</sup> *Ibid.* p. 104.

<sup>161</sup> Germinal Cocho y Pedro Miramontes, “Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados”, p. 200.

recordar que si bien el caos requiere de la no linealidad, las dinámicas no lineales no llevan necesariamente al caos.

#### **2.3.4. ZONA CRÍTICA**

Cuando los componentes de un sistema llegan a una integración tal que todos se influyen entre sí y los estados cambian dramáticamente con perturbaciones muy pequeñas hablamos de que se ha llegado a un punto crítico. Las propiedades del punto crítico afectan los alrededores y a esto se le denomina zona crítica. Otra característica de la zona crítica es que los sistemas que se encuentran en ella experimentan fluctuaciones de todos los tamaños dentro de un rango relativamente amplio [...] a un bajo o nulo costo energético.”<sup>162</sup>

El magnetismo de los metales constituye un ejemplo común de los fenómenos críticos. Si calentamos un imán, el grado de magnetismo disminuye, el parámetro de control (temperatura) reduce el de orden (grado de magnetismo). El sistema atraviesa por una fase de transición en la cual a cierta temperatura se llega a un punto crítico en el que la propiedad magnética se desvanece por completo. Los sistemas complejos tienen la propiedad de sufrir cambios radicales en sus características cualitativas cuando el parámetro de control cambia en cierto punto crítico.

En el ejemplo del magnetismo el experimentador es quien ajusta los parámetros de control para observar el cambio en el parámetro de orden. No obstante, existen sistemas que llegan a un punto crítico sin intervención externa. Per Bak, Kurt Wiesenfeld y Chao Tang<sup>163</sup> demostraron en 1987 que si se deja caer una cantidad constante de granos en una pila de arena, habrá un punto en el que su pendiente comenzará a alzarse de tal modo que los siguientes granos que caigan derribarán a los que ya estaban en la pila. El sentido común dicta que las avalanchas incrementarán en tamaño y frecuencia mientras más pronunciada sea la pendiente. Cuando la arena que cae contrarreste a la que se agrega tanto pila como pendiente detendrán su crecimiento. Bak y compañía explican que estas distribuciones tienen “colas largas”, o puntos específicos en los que las condiciones son más susceptibles a cambiar de un momento a otro. Pedro Miramontes explica la ley que rige este comportamiento:

En el estado crítico existen avalanchas de todos los tamaños; muchas que involucran pocos granitos y pocas donde resbalan muchos. Si  $f$  denota el número de granitos que caen en una avalancha y  $n(f)$  el número de avalanchas (la frecuencia observada de  $f$ ) en las que participan exactamente  $f$  granitos, y los puntos de la forma

---

<sup>162</sup> *Ibid.*, p. 201.

<sup>163</sup> Per Bak, Kurt Wiesenfeld y Chao Tang, "Self-organized criticality: an explanation of  $1/f$  noise", 1987.

$$(\log(f), \log(n(f)))$$

se ajustan perfectamente a una línea recta de pendiente cercana a  $(-1)$ , de manera que, en las variables originales, los puntos

$$(f, n(f))$$

están bien representados por la hipérbola

$$n(f) = 1/f,$$

se dice que, la frecuencia y el tamaño de las avalanchas se relacionan mediante una ley muy precisa; la llamada “ley  $1/f$ ”.<sup>164</sup>

El modelo causó furor sobre todo por su capacidad de aplicación en fenómenos tan diversos como terremotos, las aglomeraciones de autos, fuegos forestales, ráfagas solares y estelares, colapsos económicos, etc. De hecho, Pedro Miramontes afirma con entusiasmo que: “los temblores catastróficos no se salen de la norma, no tienen ningún papel especial; siguen la misma ley que todos y es la misma dinámica la que les da origen: los acomodos de la corteza terrestre. No hay que buscarle tres pies al gato; la ley es la misma para todos: grandes, medianos y pequeños.”<sup>165</sup> No obstante, el científico mexicano aclara que a pesar de muchos fenómenos siguen la ley<sup>166</sup>  $1/f$ , la incertidumbre es un rasgo que acompaña a los sistemas con criticalidad auto-organizada. Ello se traduce en la imposibilidad de predicción. Con frecuencia la ciencia se asocia a la capacidad de explicación y predicción de los fenómenos. Por eso mismo las disciplinas sociales han luchado constantemente por legitimar su estatus científico. La criticalidad auto-organizada implica la evolución de un sistema al borde del caos. Aceptar que la ciencia también abarca aquellos fenómenos que se mueven en campos de incertidumbre constituye una manera extendida de comprender sus aplicaciones y objetivos. Es por ello que estamos de acuerdo con Miramontes cuando afirma que “quizá la consecuencia más sobresaliente del experimento de las pilas de arena es la enseñanza de que la consecuencia de la caída de un grano es completamente impredecible y, más aún, que la misma caída puede no tener efecto alguno o provocar una catástrofe. Es decir; a la misma causa, efectos diferentes: ¡la esencia misma de la no-linealidad!”<sup>167</sup> Y si a la misma causa, efectos diferentes, también hay para un mismo problema soluciones distintas. Desde esta perspectiva, ¿qué papel ocupan los sistemas complejos en la ciencia para Germinal Cocho?

---

<sup>164</sup> Pedro Miramontes, “Del maligno, señor, defiéndeme...”, p. 74.

<sup>165</sup> *Ibid.*, p. 75.

<sup>166</sup> Posteriormente se generalizó a un comportamiento  $1/f^a$  con “a” positivo.

<sup>167</sup> *Ibid.*

## 2.4. EL LUGAR DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN LA CIENCIA

Cocho Gil afirma que la medicina conforma un sistema complejo típico en el sentido de fuerzas contrarias ya que en esta ciencia la importancia radica en el diagnóstico diferencial. La visión de los sistemas complejos de Cocho difiere de otras posiciones respecto a que no los considera “como algo que está en el cielo por encima de las matemáticas. Más bien creo que están cerca de la medicina y entre la biología, la física y *dentro* de las matemáticas; no entre las matemáticas y el Olimpo” El científico mexicano sostiene que en ese sentido su propuesta difiere de Santa Fe. “Hace muchos años algunos en Santa Fe veían a los sistemas complejos como una religión algo como lo que pasó en el renacimiento, como un cambio muy grande y otros lo veían como negocio.”<sup>168</sup> A pesar del fuerte componente matemático que subyace a su perspectiva, también existe en Cocho un profundo respeto por los saberes tradicionales:

Yo diría que estoy más cerca de la cocinera que dentro de los matemáticos de vanguardia. En algún momento pasó por aquí Leo Kadanoff, profesor de la Universidad de Chicago, físico matemático duro y vino a dar un coloquio titulado “la mecánica de fluidos y los métodos de mi abuelita”. En ese coloquio explicó esencialmente lo siguiente: “En la mecánica de fluidos hay una ecuación que tiene un término pequeño no lineal, se ve pequeño, se ve sencillo pero no podemos resolver esa ecuación en tres dimensiones y no podemos predecir muchas cosas. Pero mi abuelita dice ‘me duele el tobillo, entonces va a llover’ y acierta. ¿Qué quiero decir con esto? En física nos enseñan que es importante la posición, la masa, la velocidad, la aceleración, pero para ciertos problemas eso no basta. Hay que mirar por la ventana y aprender lo que dicen la abuelita y el sentido común.”<sup>169</sup>

Cocho simpatiza con la visión de Kadanoff y acepta que en los sistemas complejos no bastan las categorías de los niveles que uno asocia a la física tradicional y hay que mirar en otras direcciones “El vulgo a lo mejor sabe otras cosas que los físicos agarran, expropian, le ponen matemáticas.”<sup>170</sup>

Por otra parte, Cocho afirma que su cercanía con Santa Fe recae en las herramientas matemáticas que sus equipos de investigación ocupan, sin embargo en cuestiones políticas y de relación entre ciencia y sociedad las posiciones se alejan: “Quizá sí estamos más cerca de Santa Fe- explica Cocho- en las técnicas pero no en las posiciones oficiales. Coincidimos con Santa Fe en que para resolver los problemas se necesita dominar un conjunto de herramientas matemáticas y que tarda un tiempo aprenderlas. Pero en los sistemas complejos hay muchas reglas “reglas del pulgar”

---

<sup>168</sup> Entrevista a Germinal Cocho, *op. cit.*

<sup>169</sup> *Ibid.*

<sup>170</sup> *Ibid.*

correlaciones que en algún momento no se pueden explicar y el vulgo las puede aprender y no se las enseñan a uno en la Facultad de Ciencias. Todos los sistemas son dinámicos en el sentido Heráclito en el punto de empate y es lo que los hace adaptables y que cambien. En ecología, por ejemplo el nacimiento es muerte.”<sup>171</sup>

Finalmente, la visión asociada al IF y en particular a Cocho surgió desde la firme convicción en que la dialéctica marxista es igual a los sistemas complejos del siglo XXI. A nivel de institución Cocho reconoce que siempre ha tenido apoyo para desarrollar esta agenda de investigación, pero también señala que ha tomado tiempo para que la gente lo entienda pues “es un punto de vista un poco diferente. A veces la gente cree estar ante una nueva ciencia, cuando en realidad lo que hay que entender es que lo que tú haces como científico es complejo en parte y lo que hace la cocinera también es complejo. Es una mezcla pero la gente se entusiasma y piensa que tenemos una ciencia diferente a partir de la cual todo va a cambiar.”<sup>172</sup>

De este modo, podemos observar que hay un fuerte componente social y político en la perspectiva sistémica de Cocho pero al mismo tiempo, una inclinación fehaciente hacia la concepción de las matemáticas como “la gramática de la naturaleza”.<sup>173</sup>

## **2.5 LAS APORTACIONES DE GERMINAL COCHO EN MATERIA DE COMPLEJIDAD**

A través del marco teórico conceptual expuesto anteriormente, Cocho y sus colaboradores han contribuido al desarrollo de la ciencia desde los sistemas complejos. Uno de los puntos focales de su estudio ha consistido en la comprensión del azar y su papel en la evolución. Así, la tensión entre necesidad y contingencia ha sido estudiada por los autores con resultados destacados. Desde la perspectiva de los sistemas complejos, el azar domesticado por la acción colectiva o caos de alta dimensión son lo mismo.<sup>174</sup> Esta visión del azar permite “zafarnos de las camisas de fuerza conceptuales e ideológicas que nos han impedido aceptar que la selección natural es discutible”.<sup>175</sup> Por ejemplo, en 1993 Ricard Solé, Octavio Miramontes y Brian Goodwin mostraron que un conjunto de osciladores caóticos con reglas de acoplamiento relativamente simples, dan como

---

<sup>171</sup> *Ibid.*

<sup>172</sup> *Ibid.*

<sup>173</sup> El libro *Matemáticas: la gramática de la naturaleza* constituyó una de las principales fuentes para este capítulo. Lo interesante de este libro, además de contar con la colaboración de colegas y alumnos de Cocho, está en el lugar que los autores que en él participan le atribuyen a las matemáticas. Como el nombre lo indica, estas son la gramática de la naturaleza, es decir, una serie de reglas que nos permiten hablar el lenguaje de la complejidad y los fenómenos no lineales.

<sup>174</sup> Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes, “La evolución biológica desde la teoría de los sistemas complejos”, p. 175.

<sup>175</sup> *Ibid.* p.176.



resultado pautas discernibles de comportamiento global. Con ello modelaron la conducta de sociedades de insectos “y la conclusión es una paráfrasis experimental, si se nos permite la expresión, de la visión de Gnedenko y Kolmogrov”.<sup>176</sup> En 1994 Germinal Cocho y Pedro Miramontes junto con otros colegas reportaron que las mutaciones en la base del ADN no son azarasas, sino que la frecuencia de su ocurrencia depende del enlace químico.<sup>177</sup> En 1995 L. Medrano, Cocho, P. Miramontes y R. Cedergen propusieron un índice de homogeneidad del ADN (IDH) basado en un modelo de distribución binaria que cuantifica los agregados estructurales y termodinámicos presentes en las estructuras primarias de ADN. El análisis extensivo del IDH reveló restricciones significativas de la secuencia de ADN además de aquellas derivadas de la función proteínica. El valor del índice radica en que claramente distingue entre organismos con orígenes evolutivos diferentes y los ubica en dominios distintos de la secuencia espacial del ADN. La consecuencia principal de estos estudios radica en revalorar el determinismo que surge de la interacción de componentes de un sistema aunque cada elemento tenga un alto nivel de irregularidad.

En materia de comportamiento social respecto a los patrones escondidos detrás de acciones irregulares, Cocho y su equipo han establecido puentes entre física y biología. Por ejemplo, en 2003 Cocho, Gabriel Ramos-Fernández, José Luis Mateos y Octavio Miramontes estudiaron a la comunidad de monos araña con vida silvestre (*Ateles geoffroyi*) en los bosques de la Península de Yucatán y encontraron que las trayectorias de esta especie son muy similares a lo que en física se conoce como vuelo de Lévy en difusión anómala. “La longitud de los pasos de sus trayectorias se describe mejor mediante una distribución de ley de potencia en la que la frecuencia de los pasos más grandes disminuye como una función de potencia negativa de su longitud.”<sup>178</sup> Miramontes explica que cuando se habla de una ley de potencia significa que, en una escala logarítmica, “las variables graficadas tienen una relación lineal entre sí y donde la pendiente de esa relación lineal se conoce como exponente de escalamiento. Esta relación funcional implica la existencia de una propiedad llamada auto-similaridad o de escala libre.”<sup>179</sup> Ello implica fractalidad. Lo anterior significa que los monos optimizan la búsqueda de alimentos explorando espacios más amplios con un patrón constante de pasos de diferentes longitudes, los cuales siguen una ley de potencias. Cabe destacar que este artículo, publicado en 2004, fue evaluado por la editorial alemana Springer-Verlag como uno de los 10 más citados de 2012 en la revista *Behavioral Ecology and Sociobiology*. Lo

---

<sup>176</sup> *Ibid.*

<sup>177</sup> *Ibid.* p. 175.

<sup>178</sup> Levy walk patterns in the foraging movements of spider monkeys (*Ateles geoffroyi*)”

<sup>179</sup> IFUNAM, Artículo sobre movimiento de monos, lo más citado en 2012, 30 de enero de 2013, URL=[http://www.fisica.unam.mx/noticias\\_movimientodemonos2013.php](http://www.fisica.unam.mx/noticias_movimientodemonos2013.php), [consulta 20 de junio de 2016]

anterior coincide con el interés que se ha dado en los últimos años por estudiar los tipos de movilidad que son eficientes.

En medicina, Cocho ha estudiado el parecido entre enfermedades degenerativas y sistemas complejos, pues en ambos casos hay factores generales que, dependiendo de si están activos o no, tienen mayor incidencia a gran escala en todo el sistema, y factores específicos a nivel de enfermedades y de persona. Cocho afirma que “en un país como México, [...] hay que buscar alternativas que le peguen a varias causas. Si los sistemas complejos tienen leyes generales y aspectos específicos, se pueden atacar las causas generales aprovechando que las enfermedades complejas comparten un nodo causal común, apostando a que de esta forma se pueden atacar problemas relacionados de forma eficiente.”<sup>180</sup> De este modo, entre 2002 y 2004 Germinal Cocho, Moisés Villegas y Enrique Ruelas realizaron con la Secretaría de Salud un proyecto interdisciplinario entre biólogos, físicos, médicos y matemáticos en materia de calidad en la salud. En este contexto, los autores realizaron una revisión crítica del modelo tradicional de salud en el cual los médicos realizan su quehacer de manera aislada en sus diferentes especialidades. Como resultado, se percataron de que el problema de la salud en toda la extensión de la palabra, requiere de una visión más integral en la cual se entienda que cada parte del sistema interactúa con otros componentes de manera estrecha. Dado que el objetivo consistió en estudiar la calidad de los servicios de salud, los autores traspasaron las fronteras disciplinarias y analizaron las teorías de la administración vigentes. Así, el estudio de los sistemas de salud partió de tres niveles de análisis: el de una estructura clave de este sistema en la organización, el de la atención al paciente a través de los casos de error médico y el de la situación de los usuarios. Para el primer nivel se aplicó la variedad multiescala, el cual hace posible “identificar la eficiencia funcional del sistema al considerarse el conjunto de acciones que pueden llevarse a cabo en las diferentes escalas.” La eficiencia está determinada por el número de componentes pero también por la coordinación de estas últimas. Es decir, el criterio cualitativo se torna fundamental sin dejar de lado el cuantitativo. Por medio de la red de la simulación multiagentes, algoritmos genéticos y la red de mapeos acoplados, los investigadores plantearon la posibilidad de conocer la robustez del sistema. respecto al segundo nivel, Cocho y su equipo encontraron que el error médico es una conducta emergente, resultado de las interacciones de los componentes del sistema. Para su estudio propusieron también la variedad multiescala y como propuestas de corrección plantearon la utilización de elementos como la redundancia, la automatización y la reducción de complejidad. Estos dos niveles se

---

<sup>180</sup>Entrevista a Germinal Cocho, “El estudio de los sistemas complejos, una visión que cambiaría la ciencia”, *Interdisciplina*, p. 108.

complementaron con el estudio de un tercero (la situación de los usuarios) en el cual se tomó en cuenta la experiencia derivada de la Cruzada Nacional por la Calidad.<sup>181</sup>

De este modo, se puede observar que las aportaciones de Cocho abarcan diferentes áreas de las ciencias, desde la física, la biología, la medicina y los sistemas sociales. Además de ser el sembrador de ideas en materia de complejidad, ha realizado junto con sus colegas, estudios de gran importancia que revelan nuevas facetas de la realidad (como en el caso del azar y el caos determinista) pero que también permiten entender el comportamiento de los sistemas complejos en los que hay una intervención directa del ser humano (como los sistemas de salud). Ello no solo implica el desarrollo de la ciencia, sino también robustece la legitimidad científica de los sistemas complejos como herramienta pertinente del quehacer científico.

## CAPÍTULO 3

### 3. REFLEXIÓN EN TORNO A AMBOS PROGRAMAS

La lucha por una ciencia crítica que cuestione los presupuestos del modo de producción capitalista y la interdisciplina como punto de arranque de programas de investigación que escapen a la camisa de fuerza del sistema dominante constituyen dos aspectos en los que ambos autores concuerdan. Los dos físicos abrazan la teoría marxista y relacionan la dialéctica materialista con los sistemas complejos. El trabajo de Rolando García y Germinal Cocho gira en torno a una profunda preocupación por dar respuesta a los problemas sociales desde el pensamiento de izquierda. Esto permite establecer importantes conexiones entre ambos programas de investigación, mismas que se abordan a continuación.

#### 3.1 POR UNA CIENCIA COMPROMETIDA CON LA SOCIEDAD

¿Qué tipo de ciencia debemos perseguir como humanidad? ¿Cómo avanza el conocimiento y a qué motivaciones responde? Estas son algunas de las preocupaciones que han ocupado gran cantidad de espacio a lo largo de las respectivas obras tanto de García como de Cocho. Cada uno ha articulado las respuestas a dichas interrogantes en torno a tres cuestiones: la relación ciencia-sociedad, los sistemas complejos como vía de comprensión del mundo que nos rodea y la interdisciplina como el vehículo para acceder a ese camino.

Los dos científicos coinciden en la necesidad de construir una ciencia comprometida socialmente. Así, su filosofía de la ciencia está permeada de una visión política de la misma que critica al *establishment* y busca una relación más estrecha entre científicos y la sociedad. Cocho Gil

---

<sup>181</sup> Cfr. Germinal Cocho, Enrique Ruelas, Moisés Villegas, “Complejidad, sistemas de salud y calidad”, 2006.

junto con dos de sus colegas censura la falta de crítica al imperialismo desde la ciencia y la filosofía a partir de la desintegración de la Unión Soviética:

Reconocido otrora como instrumento privilegiado de conocimiento, base de la promesa de que en el futuro sería mejor, el pensamiento científico genera ahora desconfianza y recelo; en general se le juzga porque sus contribuciones en beneficio de la gente común son menores si se les compara con los servicios que el sistema de producción científica presta al aparato de dominación del complejo político-financiero-ideológico-militar que se alzó con la victoria de la Guerra Fría.<sup>182</sup>

De manera similar, García denunció la complicidad entre científicos y sistema productivo en 1981 en el marco del programa “La sequía y el hombre” (Drought and Man). El meteorólogo describió al sistema económico como atractor en la disminución de alimentos mientras que otros científicos apuntaban al clima. En la introducción a “La naturaleza se declara inocente”<sup>183</sup> (Nature Pleads not Guilty) el autor se apoya en la siguiente analogía para denunciar el tratamiento erróneo de la cadena causal por parte de los científicos en torno al problema de la disminución de alimentos:

Let us take an extremely simple and frequently occurring example taken from the daily press. A car being driven at excessive speed on a slippery surface is unable to brake in time at a pedestrian crossing and runs over one of the pedestrians. The direct physical cause is the excessive speed brought about by a human cause: the carelessness of the driver. What would we think of the judge who would close the case by holding the slippery surface responsible? [...] In 1973 thousands of children died in the Sahel. What was the cause? Epidemics. And the cause of the epidemics? Malnutrition due to the widespread famine which resulted in the death of a large proportion of the inhabitants. And the cause of the famine? A very prolonged drought which lasted several years. At this point, most investigations stop. [...] We believe that further, wider, deeper analysis is necessary. We believe that human structures (societal, political, and economic) must be examined, and their interactions studied in order to reveal the actual forces at play. [...] It is one thing to hold a virus responsible, but a totally different matter to place the responsibility on an economic and social system.<sup>184</sup>

De este modo, para García las investigaciones deben ir más allá de la concepción lineal de la cadena causal. De lo contrario, el riesgo se traduce en llegar a explicaciones como la del automovilista que sufrió un accidente debido a la falta de fricción y no a su descuido. En el caso de la sequía de 1972, como apuntamos en el capítulo dedicado al físico argentino, Ernest Bourlaug y

---

<sup>182</sup> Germinal Cocho, Pedro Miramontes y José Luis Gutiérrez, “La evolución biológica desde la perspectiva de la teoría de los sistemas complejos”, 2007.

<sup>183</sup> Rolando García, *Nature pleads not guilty*, 1981.

<sup>184</sup> *Ibid.*, p. 8.

éste discutieron la misma problemática desde marcos epistémicos distintos. Julio Muñoz señala al respecto que “Bourlaug defendió la verdad oficial mostrando gráficos de la correlación positiva de cierto valor entre sequías y hambrunas. Rolando [narra que] se fue a la biblioteca y encontró una correlación de valor superior entre venta de armas y hambrunas.”<sup>185</sup> Por su parte, Germinal Cocho y su distanciamiento con respecto al Instituto Santa Fe (expuesto en el capítulo anterior) constatan el rechazo a una visión corporativista de la ciencia.

Ambos autores critican la desvinculación entre ciencia y sociedad. Cocho responsabiliza a las ciencias naturales de los grandes males de la sociedad actual, pero al mismo tiempo entiende que un mundo más justo será posible solo en tanto no se abandone la racionalidad como guía de la acción. De este modo expresa:

Nos parece fundamental que un científico incluya dentro de su preparación la problemática económica, ideológica y política del país en que vive; eso le permitirá elegir el momento para realizar sus investigaciones, aplicar lo que llamamos extensión académica para que las comunidades rurales y urbanas, por ejemplo, posean elementos de juicio que les permitan tomar decisiones en problemas como la contaminación, la comunicación e información.<sup>186</sup>

De igual forma, en García encontramos una ciencia enfocada en la solución de problemas sociales.<sup>187</sup> Su metodología de estudio para los sistemas complejos contempla dentro de los objetivos de la investigación elaborar un diagnóstico del sistema y posteriormente las alternativas de solución. En este sentido, la elaboración de propuestas para resolver una problemática compleja debe:

[E]star dirigida, en primer término, a detener y, en lo posible, revertir los procesos que han significado un progresivo deterioro del sistema socio-ambiental, o que tiendan a producirlo. [D]ebe poder reorientar el sistema productivo, conduciendo a un desarrollo sustentable, definido no solamente en términos de productividad y de conservación del medio ambiente biofísico, sino también -como condición sine-qua-non- con el requerimiento de que los beneficios generados en la región permitan directa o indirectamente, elevar el nivel de vida de las poblaciones involucradas en los procesos productivos que ella abarque.<sup>188</sup>

---

<sup>185</sup> Julio Muñoz, “Rolando García: científico, historiador de la ciencia y epistemólogo referente”, p. 59.

<sup>186</sup> *Germinal Cocho Gil: imagen y obra escogida*, 1984.

<sup>187</sup> De hecho, en *Sistemas complejos* dedica todo un apartado a las ciencias sociales.

<sup>188</sup> Rolando García, “Interdisciplinariedad y sistemas complejos”, p. 82.

El reconocimiento de que la ciencia posee una dimensión social les llevó a plasmar sus inquietudes de manera distinta. En el trabajo de García desde los sistemas complejos encontramos el tratamiento de problemáticas ambientales y agroalimentarias. Cocho por su parte, ha puesto énfasis en los sistemas de salud y el virus del VIH. Rolando García fue uno de los principales impulsores del programa Teoría y Metodología de la Ciencia en el CINVESTAV. Germinal Cocho fue el sembrador de ideas que eventualmente se materializaron en infraestructura institucional como el programa Ciencia y Sociedad. En resumen, ambos científicos comparten una profunda preocupación por el desarrollo político, económico y social, sobre todo de los individuos más vulnerables. Los dos están convencidos de que practicar la ciencia desde la complejidad marca una alternativa prometedora ante los retos que enfrenta la humanidad. Otro punto de encuentro entre Cocho y García se presenta en el modo de afrontar dichos retos civilizatorios. Los dos científicos apuestan por la interdisciplina como forma de aproximación al conocimiento en materia de complejidad.

### **3.2. LA INVESTIGACIÓN INTERDISCIPLINARIA ASOCIADA A LOS SISTEMAS COMPLEJOS**

Con algunos matices, los autores encuentran vínculos entre los sistemas complejos y la investigación interdisciplinaria, a la vez que comparten una profunda preocupación por la especialización excesiva actual en ciencia. Aunque los dos aceptan la importancia de la articulación de diversas ciencias para el estudio de los sistemas complejos, en cada uno ésta adquiere un enfoque diferenciado. Ambos aceptan que los sistemas complejos requieren de una metodología interdisciplinaria, hecho que implica un equipo de investigación que comparta un marco teórico y lenguaje conceptual común.<sup>189</sup> Así, Cocho expresa que en este sentido el objetivo apunta a “construir puentes” desde los cuales surge una “síntesis”. El autor relata el ejemplo de una síntesis interdisciplinaria cuando finalmente convergieron los evolucionistas darwinianos y los genetistas, proceso al que denomina “síntesis evolucionista”.<sup>190</sup>

La síntesis evolucionista fue entonces obra de constructores de puentes: miembros de la escuela genético-estructuralista como Serguei S. Chetverikov, genetistas como Edmund B. Ford, sistematistas como Bernhard Rensch, Ernst Mayr y George G. Simpson, zoólogos como Julian S. Huxley y botánicos como Edgar Anderson y George L. Stebbins, todos ellos biólogos diatópicos, con un pie en cada lado, investigadores en una de las zonas capaces de comprender lo

---

<sup>189</sup> *Vid.* Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes, “La evolución biológica desde la perspectiva de los sistemas complejos”, 2007.

<sup>190</sup> *Ibid.*

que hacían los de la otra; arquitectos que empezaron por crear nueva terminología que sería el lenguaje común de todos los biólogos evolucionistas.<sup>191</sup>

El pasaje anterior es parte de un artículo donde los autores proponen a los sistemas complejos como trinchera para enfrentar a los partidarios del “diseño inteligente” en biología. A lo largo del texto Cocho, P. Miramontes y J. L. Gutiérrez explican las discusiones y divergencias entre evolucionistas cuya primera gran síntesis consistió en la construcción de puentes conceptuales. Rolando García por su parte, afirma que este episodio de la ciencia significó “la más profunda reconceptualización y reorganización del estudio de los seres vivientes en su totalidad”<sup>192</sup> e interpreta el caso como un cambio de marco epistémico:

Lo que con Piaget se ha llamado (en *Psicogénesis e historia de la ciencia*) marco epistémico no es una concepción particular que determina la teoría en una disciplina dada, sino un sistema de pensamiento rara vez explicitado que influye las concepciones de la época y condiciona el tipo de teorizaciones que van surgiendo en diversos ámbitos. Los cambios de marco epistémico marcan grandes épocas. No se originan en las teorías que contemplan aspectos particulares de las disciplinas, aunque sí pueden resultar de un cambio profundo en la concepción de una disciplina. Un caso frecuentemente de esto último es la irrupción de la teoría de la evolución en biología, si bien se trata de un ejemplo que habría que contextualizar históricamente para darle la precisión necesaria.<sup>193</sup>

De este modo, tanto Cocho como García entienden la incorporación de la teoría de la evolución en biología como un proceso que reconfiguró los planteamientos fundamentales de esta ciencia. Cocho ve una síntesis derivada de los “constructores de puentes” de las diversas disciplinas biológicas (interdisciplina), García percibe un marco de cambio epistémico. Desde el punto de vista del físico argentino, para hablar de interdisciplina, los dominios materiales que componen el objeto de estudio deben pertenecer a diversas ciencias. En el caso citado el dominio material pertenece exclusivamente al de las ciencias biológicas. Por otro lado, Cocho afirma que la biología es en sí misma interdisciplinaria:

Al incursionar en los sistemas complejos, la interdisciplinariedad adquiere una nueva dimensión. Por ejemplo, la biología participa en forma preponderante (incluso se ha expresado que la investigación en sistemas complejos *es* la biología): evolución, morfogénesis, inmunología, ecología, neurociencias...todas entran en el ruedo. Se relacionan procesos que se

---

<sup>191</sup> *Ibid.*, p. 159.

<sup>192</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, p. 23.

<sup>193</sup> Rolando García, “Fundamentación de una epistemología en las ciencias sociales”, p. 619.

presentan en la meteorología, la astrofísica, la geofísica. Se replantean líneas de investigación y desarrollo en las ciencias sociales y económicas.<sup>194</sup>

Las últimas dos líneas de la cita anterior muestran el papel que Cocho asigna a las ciencias sociales. García impone como requisito para la interdisciplina que los especialistas de los diferentes dominios materiales (incluyendo las ciencias sociales) construyan un marco epistémico común y Cocho propone estudiar los fenómenos de las ciencias sociales a partir de las líneas de investigación replanteadas por los procesos que se presentan en la meteorología, la astrofísica, etc. La física para el investigador mexicano juega un papel fundamental como guía en el estudio de los procesos complejos en ciencia en todas las áreas del conocimiento, no solamente en las sociales. De hecho, Cocho y sus colegas afirman que “[b]ien haría la comunidad biológica en hacer el esfuerzo de comprender los fenómenos de emergencia y autoorganización [...] y de dar a la Física el papel, que le ha regateado por mucho tiempo, de ser el filtro esencial que separa lo viable de lo imaginable y que prepara el escenario para que otros mecanismos (entre ellos, la selección natural) hagan la parte que les toca en el maravilloso proceso de la evolución.”<sup>195</sup> Los alumnos de Cocho se han preocupado por seguir esta línea de pensamiento desarrollando programas que conciben el estudio de los fenómenos sociales desde el campo de la física. Por ejemplo, Octavio Miramontes y su investigación en torno a las comunidades de hormigas.

El estudio de los fenómenos sociales es hoy en día un tema de interés para la física de los sistemas complejos. Tradicionalmente estos temas han estado reservados a otras disciplinas, como la psicóloga, la socióloga, la historia, la economía, etcétera. Sin embargo, la física moderna también tiene mucho que decir al respecto, a tal punto que existen sub disciplinas bien establecidas como la "econo-física" y la "socio-física". Los sistemas complejos no solo se interesan por los fenómenos sociales de naturaleza humana. Se interesan también en sociedades de otros tipos, desde las de primates hasta las de bacterias. [...] La ciencia de los sistemas complejos se interesa por el fenómeno social como una propiedad emergente de un colectivo de individuos en interacción, sin importar demasiado sus detalles materiales<sup>196</sup>. A esto se debe que el estudio de los fenómenos sociales sea, como lo es en sí el estudio de la complejidad, una actividad profundamente interdisciplinaria.

Esta situación es considerada por García como casos en los que, fenómenos o procesos que entran en el dominio de una disciplina (la economía o la sociología), se interpretan o explican a

---

<sup>194</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis y complejidad*, pp. 32-33. [Itálicas del autor. El subrayado es nuestro.]

<sup>195</sup> Germinal Cocho, Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes, “La evolución biológica desde la perspectiva de los sistemas complejos”, p. 178.

<sup>196</sup> Protectorados, concepto abordado en el capítulo dedicado a Germinal Cocho.



partir del campo teórico de la otra ciencia (la física). “Tal como ocurrió en la fisicoquímica que se constituyó como disciplina cuando la física desarrolló la teoría atómica y pudo explicar las combinaciones químicas.”<sup>197</sup> A pesar de que en la actualidad una práctica frecuente consiste en

[...] juntar el nombre de dos disciplinas (con guión intermedio o sin él- para establecer un dominio de estudio que exige el aporte de ambas. Este camino por sí mismo, tampoco conduce necesariamente a la interdisciplinariedad. Las nuevas disciplinas (por muy compuestos que sean sus nombres) terminan también por definir temas de estudio tan súper especializados como las disciplinas originarias que aparecen ahora “unidas” por un guion o integradas en una sola palabra.<sup>198</sup>

En este sentido, García postula requisitos epistemológicos específicos para alcanzar la interdisciplina. Por una parte, se torna insuficiente analizar el objeto material de una disciplina con el aparato teórico-conceptual de otra. La investigación requiere de un equipo (puesto que desde su perspectiva no hay personas interdisciplinarias) multidisciplinario. Por otro lado, dicho equipo construirá un marco teórico y conceptual común, derivado del conocimiento propio de cada especialización.

### **3.3 APROXIMACIONES CONCEPTUALES Y METODOLÓGICAS A LOS SISTEMAS COMPLEJOS**

Una de las motivaciones principales que guía este trabajo se desprende de la complejidad asociada al estudio de lo social. Dado lo anterior, se hará referencia a un par de conceptos que impactan de manera directa en las ciencias sociales. Éstos son complejidad e interdefinibilidad. García afirma que no hay una definición del sustantivo complejidad. Sin embargo, como adjetivo “identifica fenómenos, situaciones, comportamientos, procesos, a los que se puede calificar de complejos en un sentido que es necesario precisar en cada caso. Hablamos de algoritmos complejos, de comportamientos complejos, de estructuras complejas. En cada una de estas expresiones cambia el sentido del término.”<sup>199</sup> Cocho por su parte expresa que la complejidad “viene asociada con el nivel de descripción y con los aspectos estructurales, dinámicos y funcionales en que estemos enfocando nuestra atención.”<sup>200</sup> Desde la perspectiva de Cocho, la no linealidad es una de las características de un sistema complejo. García afirma que “las llamadas teorías de la complejidad se basan en el estudio de sistemas dinámicos representados por ecuaciones diferenciales no lineales. Complejidad se ha convertido así en un término monopolizado por

---

<sup>197</sup> Rolando García, *Sistemas Complejos*, p. 27.

<sup>198</sup> *Id.* Interdisciplinariedad y sistemas complejos, p. 70.

<sup>199</sup> *Ibid.*

<sup>200</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, p. 11.

quienes, con el auxilio de poderosas computadoras, construyen *modelos formales* para analizar fenómenos que sean *formalizables*.<sup>201</sup>

Cocho afirma que “los sistemas complejos se caracterizan, entre otras cosas, por ser heterogéneos, tanto en los componentes como en las relaciones entre ellos.”<sup>202</sup> En la misma dirección, Rolando García expresa que los sistemas complejos están constituidos por elementos heterogéneos en interacción -y de allí su denominación de complejos. “La ‘complejidad’ no está determinada aquí sólo por la heterogeneidad de las partes constituyentes, sino, sobre todo, por la mutua dependencia de las funciones que desempeñan dentro de una totalidad.”<sup>203</sup> Se aprecia que ambos comparten esta noción de interdefinibilidad aunque Cocho no la denomina como tal. Al respecto, el científico mexicano explica que los sistemas complejos comprenden “sistemas con muchos componentes que interactúan fuertemente entre sí, dando lugar a la emergencia de una variedad de comportamientos globales que se encuentran interrelacionados”<sup>204</sup> De este modo, se puede observar que la noción de interdefinibilidad o componentes que interactúan fuertemente entre sí constituye un requisito para que un sistema sea considerado complejo en ambos programas de investigación.

### **3.3.1 METODOLOGÍA: ORGANIZACIÓN POR NIVELES**

Los dos autores estudian la evolución de los sistemas complejos a partir de la diferenciación de niveles. García por ejemplo, afirma que una vez caracterizados el sistema y la estructura, el paso siguiente consiste en el estudio de los principios de organización para explicitar las interacciones entre los diferentes niveles. Cocho por su parte, afirma que la materia está organizada en diversos niveles jerárquicos. De ahí la importancia de los protectorados pues “la materia se auto-organiza en niveles y escalas bien distinguibles”<sup>205</sup> García también reconoce la organización jerárquica de la materia aunque para él ésta constituye un caso particular dentro de las formas de organización características de los sistemas naturales. El autor expresa que:

La forma característica de los sistemas complejos responde a lo que denomino el principio de estratificación, al presentar una disposición de sus elementos en niveles de organización con dinámicas propias pero interactuantes entre sí. Dicho de otra manera, el conjunto de factores que directa o indirectamente determinan el funcionamiento de tales sistemas

---

<sup>201</sup> Rolando García, *El conocimiento en construcción*, p. 66.

<sup>202</sup> Germinal cocho, “Complejidad, criticalidad y humanismo creativo”, p. 68.

<sup>203</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, p. 137.

<sup>204</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, p. 10.

<sup>205</sup> Germinal Cocho, “Complejidad y procesos en la naturaleza, la importancia de los protectorados”, p. 59.

se distribuye en niveles estructuralmente diferenciados con dinámicas propias semi-autónomas, pero no necesariamente interrelacionadas jerárquicamente.<sup>206</sup>

La cita anterior pertenece al libro *El conocimiento en construcción*. Posteriormente en *Sistemas complejos* García retoma la cuestión y aunque sigue marcando su distancia con respecto a las propuestas que ven en los sistemas complejos la necesidad de jerarquizar los niveles, acepta que una parte fundamental del estudio de este tipo de sistema consiste en jerarquizar las estructuras:

En el comportamiento de un subsistema dentro de un sistema, pueden entrar en juego unas pocas relaciones determinantes que, en cierta manera, "integran" toda la complejidad de las relaciones internas dentro de ese subsistema. Esto permite establecer jerarquías de subsistemas dentro de un sistema y definir niveles de análisis correspondientes a los niveles de organización dentro del sistema. Así resolvemos el dilema de la elección del burro o de la célula como unidad de análisis. Cuando queremos estudiar el comportamiento del burro, no intervienen, como "variables" a tomar en cuenta, el análisis de las reacciones químicas en el interior de las células.<sup>207</sup>

Del mismo modo, Cocho ve en la diferenciación de niveles un punto medular para el estudio de un sistema complejo. La metodología de Cocho consiste en tomar los niveles de organización dados en la naturaleza. La de Rolando García establece jerarquías de subsistemas dentro del sistema mediante niveles de análisis diferenciados. Los dos buscan una reconciliación entre el todo y las partes y resuelven el dilema de la unidad de análisis enfocándose en aspectos específicos de cada nivel:

. (...) pero no ¿no les parece que lo que hay en la naturaleza son sistemas en los cuales ocurren procesos y son estos los que pueden o no presentar comportamientos complejos? La complejidad viene asociada con el nivel de descripción y con los aspectos estructurales, dinámicos y funcionales en que estemos enfocando nuestra atención.<sup>208</sup>

El enfoque de los autores permite suavizar la dicotomía holismo-reduccionismo y plantea una síntesis complementaria.

### **3.3.2 DIALÉCTICA Y SISTEMAS COMPLEJOS**

Los dos científicos consideran que las partes y el todo en un sistema complejo interactúan de manera dialéctica. "El sistema, como totalidad, tiene un funcionamiento a través del cual

---

<sup>206</sup> Rolando García, *El conocimiento en construcción*, p. 74.

<sup>207</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, pp. 125-126.

<sup>208</sup> Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, p. 10.

impone, por así decir<sup>209</sup>, sus propias leyes a los subsistemas. [...] La interacción dialéctica caracteriza a un sistema complejo en todos los niveles, tanto entre el sistema como totalidad y cada uno de los subsistemas que lo componen, como entre cada subsistema y las partes o elementos que lo constituyen.”<sup>210</sup> La dialéctica aparece mediante las inferencias de los investigadores al establecer los componentes y las relaciones entre ellos. Dichas inferencias incluyen las oposiciones que se dan en las “interacciones del sujeto y el objeto, diferenciaciones e integraciones, relativizaciones o coordinaciones de subsistemas de pensamiento, reorganizaciones retroductivas.”<sup>211</sup> Desde otro ángulo de la dialéctica, Cocho y sus colegas afirman que en la naturaleza existen procesos dialécticos independientes del sujeto que los observa. Miramontes proporciona un ejemplo ilustrativo de la afirmación anterior cuando sentencia a muerte “al indeterminismo metafísico y al determinismo *laplaciano* y concibe el caos determinista como síntesis dialéctica de ellos.”<sup>212</sup> Recordemos también que para Cocho:

La complejidad origina la individualidad, pero *paradójicamente* se manifiesta únicamente bajo acciones colectivas. Aunque más que paradójicamente deberíamos decir *dialécticamente*. Sin embargo, en estos tiempos de neoliberalismo en lo económico y de enajenación en lo educativo y cultural, dialéctica es una palabra que pasó de ser maldita durante la guerra fría a inexistente en nuestro mundo orweliano que ha encontrado en la televisión a su *big brother*.<sup>213</sup>

De este modo, en ambas propuestas la dialéctica juega un papel fundamental. Para García en la generación de conocimiento, para Cocho en las manifestaciones de la naturaleza.

### 3.4. GENERALIDAD Y ESPECIFICIDAD

Ambos autores abrazan la idea de que en los sistemas hay algo de general y algo de específico. Cocho afirma que por analogía se pueden extraer implicaciones desde los sistemas físicos a los biológicos y sociales, esto se podría interpretar como la dialéctica entre generalidad y especificidad. Por esta razón, el autor defiende la importancia de los protectorados en la naturaleza,<sup>214</sup> ya que existen propiedades similares entre sistemas de diferente índole sin importar la

---

<sup>209</sup> La expresión “por así decir” indica que García no se encuentra totalmente cómodo al hablar de un sistema que impone sus leyes a los subsistemas, puesto que el investigador se encarga de determinar los componentes y las relaciones de la totalidad organizada.

<sup>210</sup> Rolando García, *sistemas complejos*, p. 190.

<sup>211</sup> *Vid.* Retroductivas en el sentido de Charles Sanders Peirce. Rolando García, “Piaget, las ciencias y la naturaleza”, p. 2002.

<sup>212</sup> Pedro Miramontes, “Predecir el clima es una cosa, predecirlo correctamente es otra”, p. 11.

<sup>213</sup> Germinal Cocho, “Patrones y procesos en la naturaleza, la importancia de los protectorados”, p. 17. [Las cursivas son de los autores]

<sup>214</sup> *Vid.* Capítulo anterior.

materia que los constituye. Así, el autor explica que “los organismos biológicos, los organismos sociales, y muchos de los fenómenos físicos que se nos presentan ahora, son fenómenos complejos y estos implican una doble cosa: que va a haber leyes genéricas muy amplias, pero que vamos a tener especificidades.”<sup>215</sup> Del mismo modo, García apunta a encontrar las diferencias y similitudes como uno de los objetivos de la investigación de los sistemas complejos. Las investigaciones que el físico argentino realizó en varios países de África y en la región del Bajío en América tenían desde el inicio como objetivo obtener conclusiones comunes.

Esto no podría ser obtenido por medio de cualquier tipo de "generalización inductiva", con la excepción de algunas analogías más bien superficiales. La pregunta preliminar que nos planteamos fue entonces: ¿Cuáles son los criterios de comparabilidad que pueden ser usados en la búsqueda de características comunes entre los diferentes proyectos? Los diferentes estudios de caso desarrollados fueron poniendo en evidencia que, mientras que cada proyecto tenía características particulares que lo diferenciaban de los estudios precedentes, había profundas similitudes en el comportamiento de varios sistemas. Estas similitudes no pueden ser identificadas sólo por la comparación de datos que describen el estado de los sistemas en momentos determinados. De nuevo, el enfoque sistémico basado en el análisis de los procesos se volvió una herramienta indispensable.<sup>216</sup>

La búsqueda de similitudes conforma una de las características principales dentro del pensamiento sistémico. En tanto que el sistema para García no está dado sino que se construye, la búsqueda de similitudes para el autor argentino consiste en comparar los procesos estudiados al interior de diferentes proyectos de investigación (en el caso que él desarrolló, los proyectos consistieron en el estudio de los sistemas agroalimentarios en diversos países). Cocho por su parte, busca similitudes en los procesos dados en la naturaleza. De la misma manera, la identificación de diferencias en cada sistema será fundamental para una mejor comprensión del mundo que nos rodea. El diagnóstico diferencial constituye en ambas propuestas un objetivo central de cualquier investigación de un sistema complejo.

### **3.5 MATEMÁTICAS, CIENCIAS FÍSICAS Y CIENCIAS SOCIALES.**

Al estudiar de cerca a los autores se puede observar que ambas escuelas tienen puntos de coincidencia respecto a los modelos matemáticos y su papel en los sistemas complejos. Santiago Ramírez considera que “matematizar es poner los objetos a disposición para ser pensados y experimentados.”<sup>217</sup> La finalidad del pensamiento sistémico entraña la idea de comprensión de los

---

<sup>215</sup> Germinal Cocho, “Complejidad, criticalidad y humanismo creativo”, p. 72.

<sup>216</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, p. 169.

<sup>217</sup> Santiago Ramírez, *apud*: José Luis Gutiérrez, “Teorías, sistemas y comprensión del mundo”, p. 109.

procesos que se dan entre y al interior de los sistemas. Por esta razón, se torna indispensable establecer los sistemas “como cuerpos de enunciados formales en donde es posible inferir teoremas, su lectura ilumina los procesos que se han vuelto a presentar y permite deducir su comportamiento más allá de lo inmediato.”<sup>218</sup> Su colega José Luis Gutiérrez sostiene que formalizar permite pasar de la descripción a la comprensión. Gutiérrez también advierte que existe una gran diferencia entre el empiricismo estadístico y los intentos de interpretación teórico-sistémica que buscan, por ejemplo, estructuras, niveles de interrelación, dinámicas, principios generales o leyes.

De manera similar, García ahonda en sus trabajos acerca de la importancia de los modelos matemáticos “como instrumento que sirve para revelar posibles indicadores de situaciones no explicadas”<sup>219</sup> y además también se posiciona en contra de los excesos del empirismo en general, además del estadístico. Así como Gutiérrez afirma que las matemáticas aplicadas a fenómenos sociales aún se encuentran en un estado rudimentario,<sup>220</sup> García asevera que los modelos que hasta ahora se han desarrollado son de tipo input/output y no pueden “representar, ni lejanamente, un conflicto de clases o la degradación ambiental y social generada por la explotación abusiva de recursos naturales en vastas regiones del mundo.”<sup>221</sup> El problema de la representación se debe a las diacronías y sincronías. García sostiene que el estudio de un sistema complejo se realiza mediante la combinación de análisis sincrónicos y diacrónicos. El primer tipo determina las propiedades estructurales del sistema en un período dado de tiempo y el segundo identifica los procesos que condujeron a esa forma particular de organización.<sup>222</sup> Los modelos tipo entrada/salida no dan cuenta de esta doble componente sincrónica y diacrónica. A pesar de estas limitaciones, García sostiene que con ayuda de las matemáticas sí se pueden modelar procesos parciales.

En ambas propuestas se refleja la importancia de las matemáticas para el estudio de los sistemas complejos enfocados a la resolución de problemáticas sociales. De un lado y otro se reconocen también las dificultades actuales de esta ciencia en materia social.

Aunado a lo anterior, en ambas propuestas existe un fuerte componente físico para el estudio de lo social. Por ejemplo, García afirma que “ya no es la física quien trata de imponer sus paradigmas a las ciencias sociales, sino que son éstas las que llevan su problemática al campo de las “ciencias duras”, recibiendo a su vez nuevos instrumentos de análisis que estas últimas

---

<sup>218</sup> José Luis Gutiérrez, “Teorías, sistemas y comprensión del mundo”, p. 95.

<sup>219</sup> Rolando García, *sistemas complejos*, p. 134.

<sup>220</sup> José Luis Gutiérrez afirma que Una cosa es que la matemática para representarlos todavía esté por construirse o se encuentre en pañales, y otra, que la imposibilidad epistemológica para su representación sea cierta. *Vid.* José Luis Gutiérrez, “Teorías, sistemas y comprensión del mundo”, 2014.

<sup>221</sup> Rolando García, *El conocimiento en construcción*, p. 67.

<sup>222</sup> *Id. Sistemas complejos*, p. 135.

elaboran.”<sup>223</sup> De manera muy similar, Cocho en general considera que “sería importante estudiar a los sistemas sociales como sistemas complejos en zona crítica.”<sup>224</sup>

### 3.6 CONCLUSIONES

Rolando García y Germinal Cocho representan dos autoridades en materia de complejidad e interdisciplina. El primero dedicó sus esfuerzos a hacer de los sistemas complejos una teoría uniforme a favor de una estructura conceptual específica. Cocho por su parte, ha incorporado con entusiasmo los avances que se dan en todas las ciencias en materia de complejidad: teoría de redes, atractores, lógicas no clásicas, entre otros. Así, cada uno ha perseguido sus objetivos desde caminos distintos pero con puntos de encuentro acerca de los que vale la pena profundizar. Tal y como apunta Martínez Mekler, “no existe una definición de sistema complejo, universalmente aceptada. En cierta forma esto es parte de su atractivo.”<sup>225</sup> La complejidad como enfoque teórico y metodológico lleva consigo un alto grado de subjetividad pues depende “en buena medida de quién se hace la pregunta y qué aspecto de un fenómeno o problema se está analizando. Un informático puede pensar en una complejidad algorítmica; un ingeniero en una sistémica, y un biólogo en una funcional.”<sup>226</sup>

En este sentido, entre los resultados de esta investigación sobresalen las similitudes filosóficas, conceptuales y metodológicas en los programas de investigación de Germinal Cocho y Rolando García, mismos que desarrollaron a partir de la década de los setenta y que merecen una investigación más profunda. Tanto García como Cocho coinciden en el establecimiento de niveles de análisis como base para el estudio de los sistemas complejos. También hay convergencia en la importancia de las matemáticas y la física para lo social desde la interdisciplina. Además, los dos reiteran su compromiso social desde una ciencia crítica. Los sistemas complejos en ambas propuestas funcionan como medio para el cuestionamiento del estatus quo. Además, tanto Cocho como García buscan superar los límites de la metodología reduccionista heredada del paradigma mecanicista.

Desde esta perspectiva, contar con científicos como los aquí estudiados enriquece el desarrollo teórico de los sistemas complejos en México. Es evidente que ambos autores han heredado una tarea ardua para las próximas generaciones particularmente en el campo de lo interdisciplinario. Por ejemplo, como hemos visto para ambos proyectos la matemática constituye

---

<sup>223</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, p. 129.

<sup>224</sup> Germinal Cocho, “Complejidad, criticalidad y humanismo creativo”, 2013.

<sup>225</sup> Entrevista Gustavo Mekler, *Revista Digital Universitaria*, p. 3.

<sup>226</sup> *Ibid.*

una herramienta indispensable para comprender la naturaleza y la sociedad desde los lentes de lo complejo. De este modo, un sociólogo (por ejemplo) interesado en participar del enfoque, tiene que dominar herramientas matemáticas específicas para el estudio de los fenómenos sociales. Esto equivale a resucitar al hombre del Renacimiento que lo mismo era matemático que pintor.<sup>227</sup> Dada la estructura educativa y cultural actual, la “tendencia a que se borren las fronteras entre las diversas ciencias y entre los diversos medios de expresión artística así como entre ciencias naturales y sociales”<sup>228</sup> supone una aspiración que requiere de una profunda transformación del complejo educativo, científico y social.

Del lado de la propuesta de García también se abren campos de investigación que, al igual que en Cocho, ponen a la interdisciplina en el centro del debate. Al respecto, el autor argentino afirma que “ya no es la física quien trata de imponer sus paradigmas a las ciencias sociales, sino que son éstas las que llevan su problemática al campo de las "ciencias duras", recibiendo a su vez nuevos instrumentos de análisis que estas últimas elaboran.”<sup>229</sup> Los científicos interesados en el estudio de los fenómenos tienen la tarea de sobrepasar los límites disciplinarios para establecer puentes entre ciencias.

Por otra parte, tanto García como Cocho han dejado claro que la ciencia debe estar comprometida con el desarrollo social. Por ello, cada uno se enfoca en aspectos clave para la sobrevivencia humana como la salud y la seguridad alimentaria. Esto deja a las futuras generaciones con la tarea de repensar las categorías sociales y políticas dadas. Ejercer la crítica a las estructuras de dominación actual desde la trinchera de la ciencia está en la agenda de los sistemas complejos inaugurada por Cocho y García. Otro punto de coincidencia destacado es la generalidad y especificidad como guías de investigación en las dos propuestas. Tanto García como Cocho buscan generalidades entre sistemas y especificidades que los hacen únicos. Así, los interesados en continuar su labor tienen el reto de profundizar en la investigación en sistemas complejos para elaborar herramientas teóricas y conceptuales que coadyuven al diagnóstico diferencial.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el presente estudio no intenta ofrecer conclusiones definitivas, por el contrario, busca mostrar que estamos ante un panorama rico en posibilidades metodológicas y conceptuales. Rolando García y Germinal Cocho allanaron el camino para futuros estudios en materia de complejidad ya que

---

<sup>227</sup> Una referencia interesante al respecto se puede encontrar en Germinal Cocho y Marisol Cocho, “Espacio, movimiento y cambio en las ciencias y en las artes”, 2005.

<sup>228</sup> en Germinal Cocho y Marisol Cocho, “Espacio, movimiento y cambio en las ciencias y en las artes”, 2005.

<sup>229</sup> Rolando García, *Sistemas complejos*, p. 129.



a) Ambos formaron una comunidad científica sólida que continua desarrollando sus ideas y aportaciones

b) Los dos crearon organismos que se mantienen vigorosos formando a nuevas generaciones

c) Las obras y contribuciones de Cocho y García siguen siendo pilares en las ciencias exactas y sociales respectivamente

Ahora toca a las generaciones subsecuentes retomar los frutos de esta labor y dar continuidad a la indagación teórica y práctica en sistemas complejos.

## FUENTES DE CONSULTA:

- Bautista Ramos Raymundo, *Las matemáticas y su entorno*, Siglo XXI, 2004
- Bertalanffy Von Ludwig, *Teoría general de los sistemas. Fundamento, desarrollo, aplicaciones*, trad. Juan Almela, México, FCE, 1976.
- Braunstein, Néstor et., *al. Psicología, Ideología y Ciencia*, 'México, Siglo XXI, 1975.
- Bunge, Mario, "The GST Challenge to the Classical Philosophies of Science", *International Journal of General Systems*, núm. 1, vol. 4, Estados Unidos, Taylor and Francis, pp. 29-37.
- Capra, Fritjof, *The web of life: a new synthesis of mind and matter*, Londres, HarperCollins, 1996, 320 pp.
- Chalmers, Alan F. *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, tercera edición, España, Siglo XXI, 2006.
- Chimal Carlos, *Luz interior: conversaciones sobre ciencia y literatura*, UNAM, 2001.
- Cocho Gil Germinal, *Germinal Cocho Gil: imagen y obra escogida*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1984.
- Cocho Germinal, Medrano L., Miramontes P. y Rius J.L., "The effect of DNA stability on mutation and sequence evolution." en *Evolutionary Theory* 39, 2, 1994).
- Cocho Germinal, "Structural and thermodynamic properties of DNA uncover different evolutionary histories", en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 40, núm. 698, 1995.

- Cocho Germinal, Ramos-Fernández G., Mateos, J.L, Miramontes O., *et. al.* “Levy walk patterns in the foraging movements of spider monkeys (*Ateles geoffroyi*)”, *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 55, núm. 3, (2004),
- Cocho Germinal, Ruelas Enrique, Villegas Moisés, “Complejidad, sistemas de salud y calidad”, en Enrique Ruelas, Ricardo Mansilla, Javier Rosado (Coords.) *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: ensayos y modelos*, Secretaría de Salud e Instituto de Física del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, 2006.
- David Byrne y Gill Callaghan, *Complexity Theory and the Social Sciences, the state of the art*, Nueva York, Routledge, 2013.
- Dupuy, Jean Pierre, *On the Origins of the cognitive science. The mechanization of the mind*, Princeton University Press, Estados Unidos, 2009.
- FAO, *El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Enseñanzas de los últimos cincuenta años*, ONU, 2000.
- Feyerabend, Paul, (1976) *Tratado contra el Método. Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*, Madrid, Técnos, 1986, 319 pp.
- Feyerabend, Paul, *¿Por qué no Platón?*, 3ra edición, Madrid, 2009, p. 155.
- García, R. y Piaget J, *Psicogénesis e historia de la ciencia*, undécima edición, España, Siglo XXI, 2008.
- García, R., Piaget, J, *et. al. Homenaje a Jean Piaget. Epistemología genética y equilibración*, España, Editorial Fundamentos, 1981.
- García, Rolando “Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático”, *Enfoques-CEIICH*, vol. 1, núm. 1, 2013.  
----- *Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, Gedisa Editorial, Barcelona, 2006  
----- “Piaget, las ciencias y la dialéctica”, URL= <http://www.herramienta.com.ar/revista-herramienta-n-19/piaget-las-ciencias-y-la-dialectica> [consultado el 23 de diciembre de 2015]  
----- “Piaget y el problema del conocimiento”, Rolando García y Santiago Ramírez (Coords.) *La epistemología genética y la ciencia contemporánea: homenaje a Jean Piaget en su centenario*, España, Gedisa, 1997.  
----- *Nature pleads not guilty. The 1972 Case Study*, Elsevier, 1981.

-----*Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, Barcelona, Gedisa, 2006.

-----“Interdiscipliniedad y sistemas complejos” en Enrique Leff (comp.), *Ciencias Sociales y Formación Ambiental*, Gedisa, Barcelona, 1994

- García, Rolando y Piaget, Jean, *Hacia una lógica de significaciones*, España, Gedisa, 1987.
- García, Rolando y Piaget, Jean, *Las explicaciones causales*, España, Barral Editores, 1971.
- García, Rolando y Piaget, Jean, *Psicogénesis e historia de las ciencias*, México, Editorial Siglo XXI, 1983.
- Gutiérrez Sánchez José Luis, *Clásicos de la biología matemática* (Siglo XXI, 2002); ‘Complejidad Y Sistémica’ <<http://www.iieh.com/complejidad-y-sistemica/articulos/sistemas-complejos#Origen01>> [accessed 26 April 2016]
- Herrera, Rodolfo, “Sistema y lo sistémico en el pensamiento contemporáneo”, *Ingeniería*, núm. 2, vol. 17, Costa Rica, Revista de la Universidad de Costa Rica, pp. 37-52.
- Hiroshi Fujikawa y Mitsugu Matsushita, ‘Fractal Growth of Bacillus Subtilis on Agar Plates’, *Journal of the Physical Society of Japan*, 58.11 (1989), 3875–78 <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.58.3875>
- Instituto de Física UNAM, ‘El Homenaje a Germinal Cocho, Constructor de Puentes Interdisciplinarios’, 2013 <[http://www.fisica.unam.mx/noticias\\_homenajegerminalcocho2013.php](http://www.fisica.unam.mx/noticias_homenajegerminalcocho2013.php)> [accessed 18 April 2016];
- Inhelder B. y Piaget J, *La representación de l'espace chez l'enfant*, Francia, Press Universitaire de France, 1977.
- Kellert Stephen H., *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems* (University of Chicago Press, 1993)
- Lacasa, Pilar, “Equilibración y equilibrio en la epistemología genética de Jean Piaget”, *Estudios de Psicología*, núm. 17, 1984.
- Martínez Mekler Gustavo, “Una aproximación a los sistemas complejos”, *Ciencias*, julio-septiembre, núm. 59, UNAM, 2000, pp- 6-9.
- Martínez Mekler Gustavo y Cocho Germinal, *Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad*, UNAM, 1999.
- Miramontes Pedro, *Rio de Tiempo y Agua: Procesos y estructuras en la Ciencia de nuestros Dias* (CopIt ArXives, 2010)

- Muñoz, Julio, “Rolando García, científico, historiador de la ciencia y epistemólogo referente”, *Elementos*, num. 90, 2013, pp. 57-59.
- Piaget, J, *Le développement des notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, France, Press Universitaire de France, 1946. [en línea] [http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/textes/index\\_extraits\\_chrono3.php](http://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/textes/index_extraits_chrono3.php)
- ----- *El Estructuralismo*, trad. Floreal Mezia, Buenos Aires, Proteo, Colección Ensayos y Estudios Fundamentales, 1971.
- Portuondo, Maria, 2009. “Constructing a Narrative: The History of Science and Technology in Latin America”, en *History Compass*, vol. 7, núm. 2, 2009, pp. 500-522.
- Richardson, Kurt; Ciellers, Paul, “What Is Complexity Science? A View from Different Directions”, *Emergence: Complexity and Organizations*, núm. 1, vol. 3, Estados Unidos, Emergent Publications, 2001, pp. 5-23.
- Rodríguez, José Luis, “Teoría de catástrofes y ciencias sociales, una entrevista con René Thom”, *El Basilisco*, núm. 13, España, Fundación Gustavo Bueno, noviembre 1981- junio 1982, pp. 70-73.
- Ramírez Santiago (Coord.) *Perspectivas en las Teorías de Sistemas*, Colección Aprender a Aprender, México, Siglo XXI, 1999, 104 pp.
- Skytner Lars, *General Systems Theory, Ideas & Applications*, Reino Unido, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001, 330 pp.
- Talanquer A. Vicente, *Fractus, fracta, fractal: fractales, de laberintos y espejos* (Fondo de Cultura Economica, 2011)
- Thrift, Nigel, “The Place of Complexity”, *Theory Culture and Society*, num. 3, vol. 16, Estados Unidos, Sage Publications, p. 31 (31-69)
- Urry, John, “The Complexity Turn”, *Theory Culture and Society*, núm. 5, vol. 22, Londres, Sage Publications, octubre, 2005, pp. 1-14.
- Walby, Sylvia, “Complexity Theory, Systems , and Multiple Intersecting Social Inequalities Philosophy of the Social Sciences”, *Philosophy of The Social Sciences*, núm. 4, vol. 37, New York, Sage Publications, diciembre, 2007, pp. 449-470.
- Waldrop, Mitchel, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Simon and Schuster, 1993, 380 pp.

- Watts, Duncan, *Six Degrees: The Science of a Connected Age*, Norton and Company Inc., 2004, 384 pp.