





# ARTE, CIENCIA Y TECNOLOGÍA



EXPERIENCIAS DOCENTES Y CREATIVAS



MARIA CUEVAS RIAÑO (coord.) | IGNACIO ASENJO FERNÁNDEZ | LINO GARCÍA MORALES  
MARTINA ECKERT | JAVI F. GOROSTIZA | MÓNICA OLIVA LOZANO  
JOSÉ MARÍA PARREÑO VELASCO | TONIA RAQUEJO GRADO | MIGUEL A. SALICHS





**bellasartes**  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Departamento de Dibujo I



Vicerrectorado de Evaluación de la Calidad



**Idea y realización:**

Grupo del Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente (PIMCD) nº 188: Arte, ciencia y tecnología. Herramientas, estrategias y metodologías para la Innovación Educativa.

Ignacio Asenjo Fernández | Francisco Aznar Ballesta | María Cuevas Riaño | Lino García Morales | Mónica Oliva Lozano | José María Parreño Velasco | Tonia Raquejo Grado

**Responsable del Proyecto:**

María Cuevas Riaño

**Portada, diseño y maquetación:**

Pablo Gámez Navarro

**Autores:**

María Cuevas Riaño (coord.)

Ignacio Asenjo Fernández

Lino García Morales

Martina Eckert

Javi F. Gorostiza

Mónica Oliva Lozano

José María Parreño Velasco

Tonia Raquejo Grado

Miguel A. Salichs

© De los textos: sus autores

© De las imágenes: sus propietarios

**Edición:**

PIMCD 2011-2012 (Nº 188)

Vicerrectorado de Evaluación de la Calidad y Departamento de Dibujo I

Universidad Complutense de Madrid, 2012

Madrid, 2012

ISBN-10: 84-616-1892-0

ISBN-13: 978-84-616-1892-7

Depósito Legal: M-38797-2012

# Índice

<b>La universidad. Organización abierta al aprendizaje</b>	7
María Cuevas Riaño	
<b>La representación visual de las redes</b>	8
Ignacio Asenjo Fernández	
<b>Algunas notas sobre la complejidad</b>	22
María Cuevas Riaño	
<b>Transdisciplinariedad y complejidad</b>	36
Lino García Morales	
<b>Mecatrónica del gesto</b>	48
Lino García Morales y Martina Eckert	
<b>Networkism: La belleza de la complejidad</b>	54
Mónica Oliva Lozano	
<b>Un elogio de la complejidad</b>	60
José María Parreño Velasco	
<b>Aprendizaje experimental y uso de las TIC en la enseñanza de la Historia del Arte en Bellas Artes: Propuestas para un taller de meditación acústico-visual</b>	64
Tonia Raquejo Grado	
<b>Robótica. Diseño y aplicaciones robóticas en el arte</b>	80
Javi F. Gorostiza y Miguel A. Salichs	

---

## Algunas notas sobre la complejidad

Maria Cuevas Riaño

---

Actualmente, la definición de complejidad no se puede presentar como un conjunto consolidado de conceptos básicos, axiomas y proposiciones, sino como una denominación común que se utiliza en investigaciones muy diferentes. En este ensayo se aborda este concepto de forma esquemática, de modo que sirva de exploración para saber lo que la complejidad propone. El objetivo, por un lado, es poder aprender, a través de una observación metódica, las estructuras originales de un sistema complejo establecido: buscar su identidad; y, por otro, aprender a construir modelos personales complejos desde donde poder dar visibilidad a todo un entramado de conocimientos adquiridos sobre un dominio de estudios teóricos o prácticos específico.

### 1. ¿Qué es la complejidad?

*Considero el arte como una forma de conocimiento basado en el principio de comunicabilidad de complejidades no necesariamente inteligibles.* Jorge Wagensberg.

A pesar de los muchos artículos y libros en los que aparece este término, no existe ninguna disciplina teórica relacionada específicamente con este ámbito de estudio. La complejidad es un campo de investigación interdisciplinar que busca explicar cómo funciona un sistema. ¿Cuáles son los elementos que lo componen? ¿Qué relaciones existen entre ellos? ¿A qué modelo conceptual responden?

Los investigadores de los sistemas complejos afirman que en la naturaleza hay muchos ejemplos de sistemas complejos: sistema solar (conjunto de planetas relacionados que se organizan en torno al sol), sistemas financieros (conjunto de todas aquellas actividades relacionadas con las cuestiones bancarias, bursátiles o los grandes negocios mercantiles), cerebro, web,... La lista de ejemplos se podría ampliar tanto como se quisiese, ya que casi todo lo que nos rodea forma parte de uno de estos sistemas.

Respetando las particularidades específicas de cada uno de ellos, en todos se pueden encontrar una serie de comportamientos comunes. Todos están constituidos por un grupo de elementos relacionados entre sí que se comportan de acuerdo a un conjunto de reglas simples preestablecidas y dan origen a un comportamiento colectivo complejo, resultado de un proceso constructivo más o menos sofisticado.

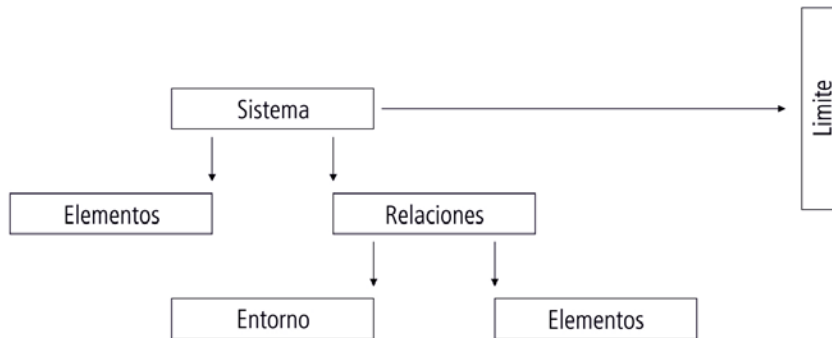


Figura 1. Elementos de un sistema.

La complejidad es realmente un valor. Añade nuevas miradas al mundo. Permite realizar nuevos descubrimientos. La complejidad, en lugar de describir un sistema por los componentes que lo constituyen, mira en el sistema las cosas complicadas y sorprendentes que pueden emerger a partir de la interacción de los elementos que lo constituyen. La complejidad es una reacción a las aproximaciones reduccionistas tradicionales de entender el mundo a partir de comprender cada uno de los elementos que lo componen de una forma aislada.

Los requisitos más importantes para la determinación de un sistema complejo son: la constitución de elementos propios; la creación de relaciones entre los elementos; la creación de relaciones entre el sistema y el entorno; y la determinación de límites (figura 1).

Los sistemas deben poseer un ámbito determinado de influencia, estar sujetos a un conjunto de operaciones específicas propias y estar limitados por un entorno. Los límites suponen la existencia de una realidad más allá del propio sistema. Tienen, además, la doble función de separación y unión del sistema y el entorno. Lo separan del entorno para diferenciarlo de otros sistemas y dar sentido al propio; y lo unen para recibir feedback de entrada y salida de datos del entorno hacia el sistema o viceversa. Los límites, a veces, son ambiguos; sin embargo, otras veces están muy bien definidos. En estos casos, los elementos deben formar parte del sistema o del entorno.

Bajo este concepto de límite, los sistemas ya no se conciben como una oposición entre sistemas cerrados y abiertos sino como una relación de gradación entre ellos. Con la

ayuda de los límites, los sistemas pueden cerrarse y abrirse a la vez, utilizando, respectivamente, las relaciones internas del sistema o las relaciones entre sistema y entorno.

Humberto Maturana, especifica que, en las relaciones sistema y entorno, no puede haber ninguna aportación del entorno al sistema que vaya dirigida a mantener el funcionamiento interno del propio sistema. Las aportaciones por parte del entorno al sistema deben ser compatibles con la autonomía del sistema; el sistema debe depender de su propia organización.

En este punto hay que señalar que, la relación entre el sistema y el entorno debe reunir las siguientes características:

1. La relación sistema y entorno no debe darse con la totalidad del entorno, sino sólo con una parte de él, escogida de una manera muy selectiva.
2. Toda la parte del entorno que no se ha elegido para realizar la relación, sólo puede influir de una forma destructiva en el sistema.

Para comprender un sistema y obtener información sobre el modelo de realidad que plantea, es importante detectar qué conceptos mueve, cuál es su grado de complejidad, qué campo de posibilidades oferta y cuáles han sido las selecciones de elementos y relaciones que se han establecido para configurarlo.

Todo sistema está dotado de dos formas de organización: las estructuras y los procesos (figura 2). Las estructuras muestran la complejidad que ofrece la posibilidad de in-

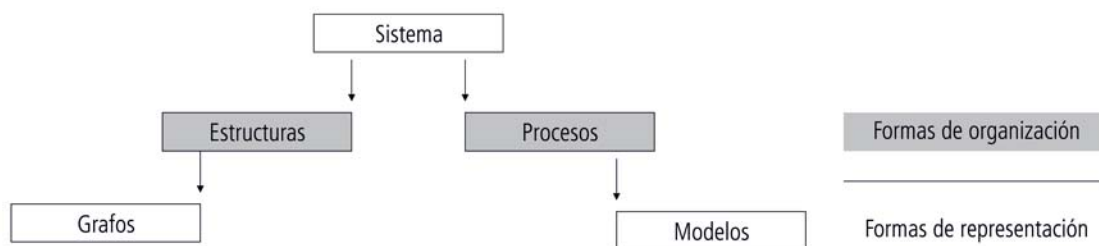


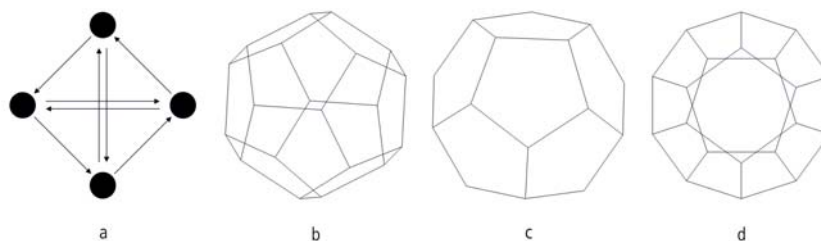
Figura 2. Formas de organización y representación de un sistema.

terrelacionar todos los elementos de un sistema. Permiten realizar la selección de un repertorio restringido de elementos dentro de todas las posibilidades factibles. Los procesos manifiestan el comportamiento del sistema. Se construyen realizando selecciones de acciones sucesivas en el tiempo. En este sentido, el sistema es capaz de cambiar el modo de relación de sus elementos si las acciones elegidas para actuar sobre él lo demandan.

Para realizar su representación gráfica, los sistemas pueden hacerlo mediante un grafo, si se describe su estructura; o mediante un modelo si se pretende, entre otras cosas, explicar su comportamiento (figura 3).

Para realizar un grafo, se crea un dibujo esquemático con los elementos que constituyen el sistema (nodos o vértices) y se unen entre sí, por medio de flechas, aquellos entre los que existe una relación (arcos o líneas entre nodos). El grafo da una información cualitativa muy elemental del sistema, sin embargo, se puede decir que suministra una visión de su organización global muy interesante. Además de esa información, se pueden obtener otras, relacionadas con el lenguaje sistémico, que hacen referencia a los modos de comportamiento del sistema (modelos).

Figura 3. (a). Grafo de cuatro nodos interrelacionados todos entre sí. (b,c,d). Modelos geométricos de un sólido platónico: el dodecaedro. Son modelos físicos de un concepto matemático que propone que se pueden utilizar polígonos regulares planos para ocupar el espacio tridimensional sin dejar huecos ni vacíos entre sus piezas.



Modelizar un sistema es un proceso exploratorio que requiere inducción y deducción. Se comienza estableciendo unos supuestos de comportamiento del sistema (reglas de comportamiento) y se observa a dónde conduce esta propuesta. De la experiencia que se genera, se intentan crear nuevos modelos o se deducen resultados más precisos.

Los modelos muestran la interpretación que un autor hace de un concepto o conjunto de ellos. Representan el proceso de sus propios pensamientos; los diagramas de sus modelos mentales. Muestran la forma de organizar una información y convertirla en conocimiento. Los modelos permiten no sólo heterogeneidad en sus datos sino, también en su comportamiento. Los modelos son necesariamente simplificaciones. Se utilizan para adquirir un conocimiento más profundo y coherente del mundo que nos rodea. Sirven para darle sentido. Son un esfuerzo de enseñar formas de pensar. Se utilizan para explicar y predecir fenómenos; construir y diseñar sistemas.

Desde un punto de vista esquemático, se puede definir la complejidad<sup>1</sup> de acuerdo a los siguientes presupuestos:

1. Término globalizador y multidisciplinar: globalizador, porque tiene un carácter general ya que no especifica un campo de aplicación concreto y unos límites determinados, sino que se utiliza en ámbitos tan diferentes como la

política, la sociología, el derecho, la biología o la economía. Multidisciplinar, porque se encuentra formado por aportaciones que proceden de campos muy diferentes como la cibernética, la neurociencia, la teoría de sistemas, la filosofía de la ciencia o el constructivismo.

2. Utiliza el pensamiento sistémico como método práctico para describir el sistema: el pensamiento sistémico, propio de la complejidad, es un método de pensamiento práctico que sirve para identificar los elementos del sistema, las relaciones que existen entre ellos, las estructuras que los soportan y las reglas y patrones que guían su comportamiento. También se utiliza para identificar el ámbito de actuación del sistema, sus límites y el grado de interacción que es capaz de establecer con el entorno.

3. Funciona cuando lo que se maneja son sistemas. La complejidad contempla el todo y las partes; pero para poder comprender el sistema estudia las conexiones que existen entre las partes y el todo. La complejidad es una disciplina para ver totalidades. Es un marco para ver interrelaciones en vez de cosas, para ver patrones de cambio, en lugar de instantáneas. Ve una combinación de factores que se influyen mutuamente.

4. Ofrece un lenguaje que comienza por la reestructuración del propio pensamiento: el pensamiento sistémico es la base de un razonamiento claro que muestra el modo en que un sistema piensa acerca de las cosas. Proporciona métodos eficaces para profundizar y ampliar el punto de vista sobre las cosas y para conocer nuevas estrategias de pensamiento. No sirve únicamente para resolver problemas, también para modificar el pensamiento que los origina.

## 2. Características de la complejidad

Según Melanie Mitchell, en su libro *Complexity. A guided tour*<sup>2</sup>, en todos los sistemas complejos existen unas características cualitativas comunes:

### Comportamiento colectivo complejo

Todos los sistemas están formados por grandes redes de componentes individuales interconectados (nombres, números, personas, direcciones, ubicaciones, trayectos,

sitios web,...), de acuerdo a unas reglas relativamente simples. No están dirigidos por un único elemento de control central capaz de gestionar las acciones de todos y cada uno de los elementos del sistema, sino que son las acciones colectivas entre los componentes relacionados las que producen modelos de comportamientos complejos, difíciles de predecir y capaces de seducirnos.

En todo sistema complejo emerge un nuevo orden de realidad que surge como consecuencia de la generación, estructura y organización del propio sistema. Es el propio sistema, con la elección de sus componentes y la definición de las relaciones que existen entre ellos, el que sugiere una nueva forma de ver el mundo.

### Codifican y procesan gran cantidad de información

Todos estos sistemas producen y usan información y señales (datos) de sus entornos internos y externos. Se trata de saber cuándo y por qué se necesita la información; dónde encontrarla y cómo evaluarla, utilizarla y comunicarla de manera eficaz.

### Adaptación al entorno

Los sistemas no están constituidos sólo por elementos relacionados entre sí, sino que también existen relaciones entre éstos y su entorno. Todas las partes de un sistema están conectadas directa o indirectamente, de modo que al influir el entorno en alguna de sus partes el efecto se propaga a todas las demás, que experimentan un cambio que, a su vez, termina afectando a la parte original del sistema.

Los elementos reciben información del entorno, aprenden, evolucionan y se adaptan, cambiando su comportamiento y dando resultados diferentes cada vez que se inicia el sistema. Se produce así una circularidad. Se genera un bucle que se denomina bucle de realimentación. En primer lugar, el sistema se adapta al entorno para poder sobrevivir. Después, el entorno se adapta al sistema; busca serle útil para su desarrollo (figura 4).

## 3. ¿Cómo se puede medir la complejidad?

No existe ningún método específico para medir la complejidad de un sistema o saber el grado de complejidad que tiene



Figura 4. Adaptación al entorno de los sistemas complejos.

con respecto a otro, que haya sido universalmente aceptado. Melanie Mitchell, recoge en el libro citado anteriormente algunos planteamientos sobre estas cuestiones.

Entre las muchas propuestas posibles, una sugiere medir la complejidad por el tamaño de un sistema. Esta estrategia hace referencia al número de elementos que constituyen el sistema. Puede parecer que cuántos más elementos tenga un sistema con respecto a otro, pueda ser más complejo. Sin embargo este punto de vista no tiene en cuenta la calidad de los elementos elegidos y por lo tanto no es apropiado para certificar la complejidad de un sistema.

Otra propuesta utiliza la entropía como herramienta valiosa para realizar esta tarea. La entropía sirve para medir el grado de orden o desorden de un sistema. Se dice que un sistema tiene entropía cuando los elementos que lo componen están ordenados de acuerdo a un criterio preestablecido. El mismo sistema tiene menor entropía cuando sus elementos se encuentran libres y/o en pleno desorden. Sin embargo, no siempre los sistemas más ordenados son los más complejos sino que, a veces, lo son los más aleatorios o caóticos.

Otros autores han utilizado para definir la complejidad de un sistema la longitud del contenido de los algoritmos que utilizan para construirlos. En estos casos, se trata de medir la complejidad teniendo en cuenta cómo de sofisticada sea la programación de un sistema; el conjunto de reglas que lo configuran y definen. Otra táctica para medirla es pensar en cuantificar qué dificultad tiene construir un sistema. El estándar comparativo que se utiliza en estos casos es pensar que los sistemas más complejos son aquellos que son más difíciles de construir. Otros han propuesto medir la complejidad según su dimensión fractal. Crear un sistema a base de repetir un mismo patrón hasta el infinito a diferentes escalas. Por último, algunos han encontrado en el número de subsistemas que configuran un sistema (grado de jerarquía) un referente para hablar de complejidad.

Todas estas metodologías sirven para medir de alguna manera la complejidad pero no son útiles del todo para caracterizar el grado de complejidad de un sistema.

#### 4. Arte, ciencia y tecnología. Descripción de sistemas complejos

El objetivo de este punto es agilizar y facilitar unos conceptos que sean útiles para desarrollar los planteamientos que se van a mostrar en el estudio de casos de proyectos de investigación relacionados con el arte, la ciencia y la tecnología. Nos vamos a basar en el análisis y construcción de modelos. Con los modelos podemos deducir las implicaciones conceptuales de un autor; sus compromisos constructivos; su grado de eficacia para resolver problemas y proponer soluciones o alternativas a sus planteamientos creativos sobre el mundo. Se trata de mostrar modelos capaces de absorber todos los datos, información y comportamiento de un sistema.

En este planteamiento es importante tener en cuenta la presencia del observador (autor). El observador es el que elige un cierto aspecto de su entorno; selecciona los elementos que van a estar dentro y fuera del modelo; establece las relaciones que quiere que existan entre ellos y define un sistema que recoge sólo aquellos aspectos que, en su opinión, son importantes con relación a su entorno. En definitiva, construye un modelo que representa una determinada forma de ver e interpretar su entorno.

En el proceso de construcción de un modelo<sup>3</sup>, por parte del observador, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Todo modelo surge como resultado de plantear un problema. A partir de ese instante, se trata de decidir una serie de acciones que se van a realizar para alcanzar unas metas concretas. En este sentido, un modelo no puede agotar nunca la realidad, sino que, en una situación determinada, elige determinados aspectos de la realidad que necesita para resolver el problema y llevarlo a buen término.
2. La experiencia propia o ajena sobre la construcción previa de otros sistemas análogos a aquél que se quiere construir. Se trata de disponer de toda la información necesaria para que el desarrollo del modelo se realice de la forma más eficaz y de la mejor manera posible.
3. Necesidad de un lenguaje que facilite al observador un repertorio de posibilidades de representación de la realidad entre las que tendrá que elegir aquellas que se ajusten mejor al tipo de modelo que conceptualmente quiere representar. Construir el modelo significa organizar los conceptos y símbolos necesarios para conseguir un objetivo determinado, de un cierto aspecto del mundo real.

A continuación vamos a describir los modelos relativos a algunos sistemas creativos complejos donde está presente la relación entre arte, ciencia y tecnología por razones distintas.

##### Caso 1. Arthur Ganson, *Faster!*<sup>4</sup>, 1982

Arthur Ganson es uno de los pioneros del arte cinético americano. Sus estudios y proyectos presentan un claro ejemplo de propuestas artísticas en las que la interacción entre arte, ciencia y tecnología es fundamental. Su trayectoria profesional está directamente



Figura 5. Arthur Ganson, *Faster!*, 1982, técnica mixta, MIT Museum Gallery, Boston, Cambridge. Captura de pantallas de la obra *Faster!* en movimiento obtenidas en el vídeo *Arthur Ganson, Machines created between 1978 and 2004*.



relacionada con la construcción de máquinas, más o menos complejas, en las que se puede ver un gran compromiso entre conocimientos de sistemas propios de las ingenierías, problemas relacionados con la mecánica y conceptos artísticos.

Este proyecto fue el resultado de una convocatoria realizada por la World Sculpture Racing Society de Boston para desarrollar un proyecto de escultura móvil capaz de desplazarse por un espacio público según unas reglas previamente establecidas. Ganson diseñó un dispositivo capaz de escribir a mano la palabra *Faster!* Construyó un carro de arrastre con dos ruedas que era impulsado por la energía y el empuje que le transmitía la persona que lo conducía al desplazarse corriendo a una determinada velocidad por un recorrido predeterminado. Este movimiento personal se transmitía a una reproducción escultórica de una mano que sostenía una pluma que se encontraban encima del carro. Una serie de mecanismos permitían relacionar la velocidad de la carrera de la persona que arrastraba el carro con la velocidad del carro y de la escritura de la palabra *Faster!* que realizaba la mano sobre un papel. A mayor velocidad de empuje, mayor velocidad de escritura.



Figura 6. Arthur Ganson, *Machine with 11 Scraps of Paper*, 1999, acero, motor, alambre, latón y papel, 107 (alto) x 46 (profundidad) x 51 (ancho) cm, MIT Museum Gallery, Boston, Cambridge.

Uno de los retos importantes a alcanzar en este proyecto era diseñar los mecanismos necesarios para que a través de un juego de engranajes y levas, la mano y la pluma pudiesen escribir de una forma legible la palabra seleccionada sobre el papel. Pero este no era el único desafío. Era importante sincronizar las velocidades de todos los elementos que participaban en el evento: el conductor del carro, el propio carro y la velocidad de escritura. Además había que tener en cuenta detalles que había que resolver de forma eficaz: sustitución de un papel por otro una vez que la palabra *Faster!* había sido escrita para que el proceso que daba sentido a la escultura pudiera reiniciarse una vez más (figura 5). Visto con perspectiva, la respuesta presentada fue muy funcional y atractiva.

### Caso 2. Arthur Ganson, *Machine with 11 Scraps of Paper*<sup>5</sup>, 1999

Ganson realiza a menudo una serie de máquinas basadas en una misma idea. Con cada propuesta, explora nuevos diseños y busca soluciones mecánicas diferentes a los mismos problemas. Esta fue la segunda propuesta de una serie más compleja (figura 6).

Esta máquina ha sido diseñada para realizar una tarea específica. Cada trozo de papel, doblado por la mitad, se activa individualmente y se mueve con un ritmo lento y suave imitando o sugiriendo el comportamiento de un pájaro en vuelo. El conjunto de los movimientos de los once trozos de papel produce el recuerdo de una bandada desplazándose acompasadamente. La utilidad de estos mecanismos sólo se puede apreciar cuando somos capaces de vincular los resultados obtenidos con el mundo de la estética. La suavidad de los movimientos y la integración de cada uno de ellos al conjunto induce a pensar el número de pruebas y prototipos necesarios que probablemente hubo que hacer en su construcción para que el resultado obtenido sea tan armónico.

### Caso 3. Gemmy Industries Corp, *My Pet Firefly*<sup>6</sup>, Robot luciérnaga

Las luciérnagas son unos insectos bioluminiscentes. Tienen en el abdomen unos órganos lumínicos especiales que son capaces de emitir una luz fría intermitente que brilla con un color



Figura 7. Gemmy Industries Corp, My Pet Firefly, Robot luciérnaga. Luciérnagas que aletean dentro del tarro, emitiendo luz de una forma realista. Bote 17,5 cm altura x 8,5 cm anchura.

y un modo específico según la especie (macho/hembra) a la que pertenecen. Las luciérnagas utilizan esta luz como referencia sexual y ayuda en el emparejamiento. Cada especie emite una secuencia de luces de distinta duración y frecuencia de repetición.

La luminiscencia se produce cuando un pigmento llamado luciferina que se encuentra en su organismo se combina con oxígeno en presencia de una enzima llamada luciferasa.

Gemmy Industries Corp. comercializa un robot luciérnaga que consiste en un bote de cristal que contiene un robot miniatura que simula el comportamiento bioluminiscente de una luciérnaga (figura 7). El robot funciona con pilas. El mecanismo se activa por un pulsador externo al bote. Cuando se presiona, se pone en funcionamiento un sistema electrónico que enciende un motor durante un tiempo determinado. El motor gira de forma desigual. Unas veces rápido, otras lento. El modelo artificial de luciérnaga diseñado está unido al motor por un hilo de alambre muy fino y largo lo que le permite realizar movimientos aleatorios e imprevisibles muy realistas. Al eje del motor va unido un pequeño bulbo que permite, al chocar con un gatillo, cerrar un circuito intermitente de luz.

#### Caso 4. José María Berenguer, *Luci-Sin nombre y sin memoria*, 1994

José María Berenguer, fascinado por el espectáculo visual y sonoro de las colonias de luciérnagas de Kuala Selangor, Selangor, Malasia, realizó en 1994 una instalación de 5 luciérnagas electrónicas inspiradas en su comportamiento bioluminiscente (figura 8).

Cada luciérnaga estaba construida a partir de un circuito electrónico muy conocido, el oscilador 555, que le confería un movimiento vibratorio muy sutil y acorde con el de las luciérnagas reales. Al circuito se le añadían cuatro emisores infrarrojos capaces de informar a las otras luciérnagas del estado de luminosidad que en cada momento tenían y cuatro sensores que utilizaban para recoger el estado dinámico de las otras luciérnagas del sistema. Se trataba de conseguir que las luciérnagas actuasen conjuntamente de acuerdo a un comportamiento lo más aleatorio e imprevisible posible. El reto consistía en diseñar procesos conceptuales capaces de establecer una sincronización entre todas las luciérnagas que formaban parte del sistema utilizando como



Figura 8. José María Berenguer, *Luci-Sin nombre y sin memoria*, 1994.

referente un conjunto de ritmos complejos. El proceso generaba sistemas capaces de cambiar, de alguna manera, en el tiempo debido a las acciones que surgían cuando interactuaban sus componentes de forma colectiva. La propuesta describía, en términos generales, los modos en que el sistema podía cambiar y los tipos de comportamientos que eran posibles predecir en el sistema.

José María Berenguer describe sus inquietudes y motivaciones intelectuales de la siguiente forma:

*Desde un punto de vista que llamaré poético, me interesan algunas características del sistema que podrían ser consideradas como alegóricas. En primer lugar, el sistema parece funcionar de forma dualista. Por medio del par (luz, no luz) -equivalente al par lógico (sí, no)- se consiguen todos sus efectos. Pero resulta que -a mis ojos, lo más notable- los patrones polirítmicos de adaptación que el conjunto produce, no siempre son iguales: recorre caminos extremadamente largos y complejos hasta llegar al orden inevitable, análogo a la muerte. De esta suerte resulta que algo cuya naturaleza se muestra extraordinariamente simple, en virtud del número puede llegar a producir un comportamiento relativamente complejo. Contiene pues, en su esencia, dos principios opuestos. Me impresiona de Lucy su tendencia a terminar siempre en el mismo sitio, a pesar de que los puntos de partida y los recorridos puedan ser esencialmente diferentes. Es una alusión inquietante a la irreversibilidad de la vida y a la absoluta seguridad de la muerte. Una muerte única, a pesar de la gran diversidad de caminos que llevan a ella. Una muerte que en virtud de la discontinuidad aparece como parte integrante y concluyente de la propia vida. Por medio de pasos discretos se llega a ser una paradójica continuidad entre opuestos<sup>7</sup>*

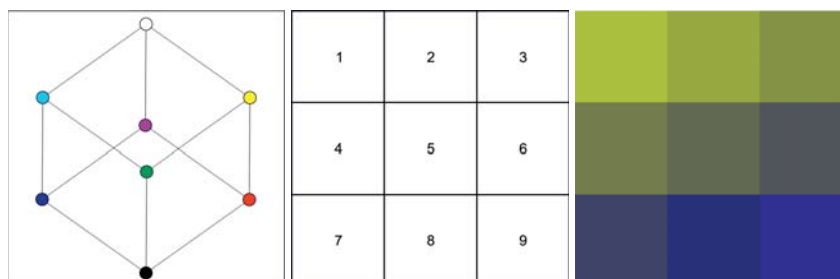
#### Caso 5. María Cuevas. *9 tonos para una plaza*, 2011

Todo proyecto en el que interviene el arte, la ciencia y la tecnología se puede describir, reconstruyendo el modelo que se ha utilizado para configurarlo. Este proyecto personal fue realizado en el transcurso del taller “26.000 píxeles” dirigido por Chris Sugrue y asistido por Massimo Avviati que tuvo lugar en el MediaLab-Prado de Madrid en 2011. El propósito del taller era crear un conjunto de obras que pudieran ser proyectadas sobre la fachada digital del edificio donde se encuentra ubicado el Medialab – Prado. Las imágenes debían ser de baja resolución, 192 x 157 píxeles; el tamaño de la pantalla de proyección era de casi 10 metros de altura y el lenguaje de programación utilizado para su realización era Processing.

La propuesta planteada consistía en representar una matriz de 3 x 3 elementos que mostrase una progresión cromática de 9 tonos desde un tono de inicio (*tono\_inicial*, (1)) hasta un tono final (*tono\_final*, (9)). El modelo obtenido fue el resultado de un algoritmo escrito en lenguaje de programación Processing<sup>8</sup>.

El punto de partida del proyecto fue seleccionar el sistema de color que se iba a utilizar para desarrollar el proyecto. Se eligió el sistema RGB. Su configuración inicial en forma de cubo permitía visualizar en sus vértices los 8 valores cromáticos básicos (blanco, amarillo, magenta, cyan, rojo, verde, azul violeta y negro). Su estructura funcional establecía la ubicación del blanco en uno de sus vértices y el negro, en el vértice diametralmente opuesto. El vértice blanco conectaba con otros tres vértices que acogían los colores: amarillo, magenta y cyan; y el negro, con otros tres: rojo, verde y azul violeta (figura 9).

Figura 9. Modelo conceptual del proyecto. Sistema RGB. Matriz con la distribución asignada a cada uno de los 9 tonos del sistema. El 1, representa el *tono\_inicial* y el 9, el *tono\_final*. Ejemplo de uno de los resultados obtenidos en una de las ejecuciones del programa.



Aleatoriamente se elegían dos colores en el sistema, origen (*tono\_inicial*) y destino (*tono\_final*), teniendo en cuenta la cantidad de los componentes R (rojo), G (verde) y B (azul) que formaban parte de su mezcla y respetando que su valor era un número que podía variar entre 0 y 255, donde el 0 indicaba que no existía ese componente primario en la mezcla y 255, que existía en su máxima saturación (figura 10). Para realizar esta tarea, se utilizó la función *random (min, max)* del lenguaje de programación Processing. Esta función generaba un número aleatorio cada vez que se iniciaba el algoritmo. Devolvía un valor no predecible comprendido entre los valores máximos y mínimos del rango especificado, min (0) y max (255).

Para obtener los tonos que se iban a colocar entre los dos extremos, se calculaban los 7 tonos intermedios por porcentajes de los colores extremos de forma que el resultado visual fuese perceptivamente una progresión modular, regular y pausada y de manera que el tono central estuviese compuesto por un 50% de los dos tonos extremos. Para realizar esta operación se utilizó la función *lerpColor (origen, destino, amt)*. *LerpColor ()* calcula un color o colores intermedios entre dos colores dados con un incremento específico. El parámetro *amt* es la cantidad a interpolar entre los valores 0 que equivale al primer punto, y 1 que equivale al último.

Para visualizar cada uno de los cuadrados de la obra, se eligió primero, el color con el que se iba a pintar la superficie (*fill (color)*) y después, se dibujó el cuadrado y se rellenó con el color establecido (*rect (x, y, ancho, alto)*). Los parámetros x e y de la función *rect*, eran las coordenadas donde se situaba la esquina superior izquierda del cuadrado; y ancho y alto mostraban las medidas del *ancho* y *alto* del rectángulo que se iba a dibujar.

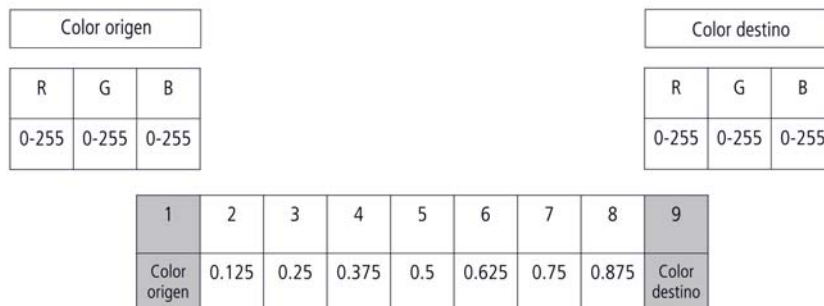


Figura 10. Gráfico de los parámetros cromáticos de cada uno de los componentes del sistema.

El código de programación utilizado en Processing para construir la obra es el siguiente:

```
void setup ()
{
size (300,300);
}
```

```
void draw ()
{
noStroke ();
```

```
float tono_rojo_1 = random (0, 255);
float tono_verde_1 = random (0, 255);
float tono_azul_1 = random (0, 255);
float tono_rojo_2 = random (0, 255);
float tono_verde_2 = random (0, 255);
float tono_azul_2 = random (0, 255);
```

```
color origen = color (tono_rojo_1, tono_verde_1,
tono_azul_1);
color destino = color (tono_rojo_2, tono_verde_2,
tono_azul_2);
```

```
color intermedio_1 = lerpColor (origen, destino, .125);
color intermedio_2 = lerpColor (origen, destino, .25);
color intermedio_3 = lerpColor (origen, destino, .375);
color intermedio_4 = lerpColor (origen, destino, .5);
color intermedio_5 = lerpColor (origen, destino, .625);
color intermedio_6 = lerpColor (origen, destino, .75);
color intermedio_7 = lerpColor (origen, destino, .875);
```

```
delay (1000);
fill (origen);
rect (0, 0, 100, 100);
fill (intermedio_1);
rect (100, 0, 100, 100);
fill (intermedio_2);
rect (200, 0, 100, 100);
fill (intermedio_3);
rect (0, 100, 100, 100);
fill (intermedio_4);
rect (100, 100, 100, 100);
fill (intermedio_5);
rect (200, 100, 100, 100);
fill (intermedio_6);
```

```
rect (0, 200, 100, 100);
fill (intermedio_7);
rect (100, 200, 100, 100);
fill (destino);
rect (200, 200, 100, 100);
}
```

#### 4.1. Características de los sistemas complejos

En mi tesis doctoral *Estructuras lógicas en las artes plásticas*<sup>9</sup> revisé algunas de las características que se presentan de forma repetitiva en el análisis y práctica de los sistemas complejos. Presento aquí las propiedades y/o principios que los caracterizan:

1. Un sistema complejo es un conjunto de elementos relacionados entre sí que funcionan como un todo. El comportamiento de un sistema complejo, su estructura global, depende más de cómo se relacionen entre sí los componentes que lo constituyen, que de los propios elementos en sí mismos. Todas y cada una de las partes de un sistema influyen en el sistema global. Cuando se cambia algún componente del sistema, se producen en él efectos secundarios. Si se quitan o añaden elementos al sistema, o si se modifica su disposición en él, éste cambia, ya que las partes están conectadas entre sí y funcionan de forma conjunta para crear una unidad.

Todo sistema se resiste a los cambios debido a la interconexión que existe entre sus elementos. No obstante, un sistema puede cambiar cuando se conoce y se actúa sobre puntos concretos de sus componentes o de su organización. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si se cambia la estructura de un sistema, se modifica su comportamiento ya que éste depende de la estructura global del sistema.

Cuando en un sistema se observan los patrones que se han utilizado para conectar las partes del sistema y no sólo los elementos que lo constituyen, se descubre que algunos sistemas formados por partes muy distintas y con funciones completamente diferentes pueden estar organizados de la misma forma, es decir, según el mismo conjunto de principios o reglas constitutivas. De este modo, es posible comprender sistemas muy diferentes

(el cuerpo, una empresa, la contabilidad personal o las relaciones personales) e influir sobre ellos utilizando los mismos principios.

2. Los sistemas forman parte de subsistemas mayores y están compuestos, a su vez, de sistemas más pequeños.

3. Las propiedades de un sistema son las propiedades del conjunto: no están en ninguna parte concreta. Cuanto más complejo es un sistema, mayor es la dificultad que existe para definir las propiedades del conjunto. Estas propiedades del sistema como un todo se denominan propiedades emergentes, porque se hacen visibles sólo cuando el sistema está en funcionamiento.

4. En todo sistema se puede realizar un análisis y una síntesis. Mediante el análisis se obtiene un conocimiento del sistema: cuáles son los elementos que lo constituyen, sus propiedades o atributos y cuáles son las relaciones que se establecen entre ellos. Mediante la síntesis se comprende el sistema: cómo se comporta cuando los elementos están en relación. En todo sistema, hay que tener en cuenta que cuando se descompone y se analiza, éste pierde sus propiedades, y que por lo tanto, para comprenderlo, hay que verlo en síntesis, como un todo.

5. En todo sistema se pueden distinguir dos tipos de complejidad: la complejidad de detalle y la complejidad dinámica. La complejidad de detalle implica que el sistema está formado por un gran número de partes distintas, y la complejidad dinámica, que hay un gran número de conexiones posibles entre las partes.

6. Si se divide un sistema en dos, no se consiguen dos sistemas más pequeños, sino un sistema defectuoso que probablemente no funcionará.

## 5. Conclusiones. El pasado y el futuro de las ciencias de la complejidad

La primera reflexión va dirigida a la extensión y difusión que se está realizando hoy día de los sistemas complejos en todos los ámbitos de conocimiento. Desde mi punto de vista los sistemas complejos están siendo observados desde dos lugares diferentes. Por un lado, existe una gran curiosidad

por comprender en toda su extensión la terminología que este campo de conocimiento abarca y las ideas y herramientas que maneja. Se han creado programas de código abierto donde poder experimentar visualmente con la construcción de sistemas basados en estos principios. En todos los casos se trata de mostrar relaciones que no son visibles de otro modo o de poner lo conocido y familiar en el contexto de otras posibilidades. Existen también laboratorios en universidades de prestigio cuyo objetivo es trabajar y desarrollar proyectos en torno a este concepto. Por otro lado, los modelos y sistemas complejos se están aplicando a una gran variedad de áreas profesionales tanto desde el punto de vista teórico como práctico: física, biología, neurociencia, sociología, creación artística, diseño,... Todos comparten estrategias y lenguajes comunes. Sería interesante poder exportar las prácticas e interpretaciones de la complejidad de unos sectores a otros.

La segunda conclusión hace alusión a la importancia en el campo creativo de cambiar las estrategias de observación de la realidad y las metodologías de documentación, planificación y creación de proyectos para generar propuestas donde intervengan el arte, la ciencia y la tecnología. Ya no sirven los parámetros tradicionales. Realizar proyectos en este ámbito requiere desarrollar un conjunto de habilidades, conocimientos y estrategias muy complejas que rara vez se dan en una misma persona. Es necesario trabajar de forma colaborativa para que las aportaciones que provienen de diferentes campos del conocimiento sean integradoras. El valor de estas propuestas creativas está en la capacidad que tienen para formular preguntas y plantear espacios conceptuales abiertos a nuevas interrelaciones profesionales. Tienen en cuenta que existen muchas formas diferentes de resolver los proyectos planteados. Es el propio proceso de investigación y desarrollo el que definirá las respuestas. Con este modo de proceder, se reclama una nueva teoría del conocimiento y práctica artística, capaz de captar y ordenar la realidad más acorde con el momento creativo actual.

## Notas

- 1 Cuevas, M. (2008). Estructuras lógicas en las artes plásticas. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, p. 61.
- 2 Melanie Mitchell. (2001). *Complexity. A guided tour*. Nueva York: Oxford University Press.
- 3 Cuevas, M. (2008). Estructuras lógicas en las artes plásticas. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, p. 24.
- 4 Más rápido!
- 5 Máquina con 11 trozos de papel.
- 6 Mi mascota luciérnaga.
- 7 [www.sonoscop.net/jmb/masluci/luciarco.html](http://www.sonoscop.net/jmb/masluci/luciarco.html). Consultada en junio de 2012.
- 8 Processing: lenguaje de programación open source diseñado por dos investigadores del MIT Media Lab, Ben Fry y Casey Reas en 2001, para trabajar en el campo del arte y del diseño.
- 9 Cuevas, M. (2008). Estructuras lógicas en las artes plásticas. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones., pp. 25-26.

## Bibliografía

- AA.VV. (1989). *Zehar: boletín de Arteleku: Sobre la complejidad*. San Sebastián: Diputación Foral de Guipúzcoa, Departamento de Cultura: Arteleku; D.L.
- Aracil, J. (2002). *Dinámica de sistemas*. Madrid: Alianza Editorial.
- Barabási, A-L. (2003). *Linked: How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. New York: Plume.
- Bertalanffy, L. (1987). *Tendencias en la Teoría General de Sistemas*. Madrid: Alianza Editorial.
- Bertalanffy, L. (1992). *Perspectivas en la Teoría General de Sistemas: Estudios Científico – Filosóficos*. Madrid: Alianza Editorial.
- Bohm, D. (2005). *Thought as a System*. Londres; Nueva York: Routledge.
- Carr, W. y Kemmis, S. (1988). *Teoría crítica de la enseñanza: La investigación-acción en la formación del profesorado*. Barcelona: Martínez Roca.
- Cuevas, M. (2008). *Estructuras lógicas en las artes plásticas*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Echeverría, R. (2008). *El observador y su mundo (V. II)*. Santiago: J.C. Sáez, Comunicaciones Noreste.
- Johnson, N. (2010). *Simply Complexity. A clear guide to complexity theory*. Oxford: Oneworld.
- Klir, G. (1980). *Teoría General de Sistemas: un Enfoque Metodológico*. Madrid: Ediciones ICE.
- Luhmann, N. (1996). *Introducción a la teoría de sistemas*. México DF: Anthropos Editorial; Universidad Iberoamericana.
- Luhmann, N. (1998). *Complejidad y Modernidad: De la Unidad a la Diferencia*. Madrid: Trotta.
- Mitchell, M. (2011). *Complexity. A guided tour*. Nueva York: Oxford University Press.
- O'Connor, J. et al. (1998). *Introducción al pensamiento sistémico: Recursos esenciales para la creatividad y la resolución de problemas*. Barcelona: Ediciones Urano.
- Senge, P. et al. (1999). *La quinta disciplina en la práctica: Estrategias y herramientas para construir la organización abierta al aprendizaje*. Barcelona: Ediciones Granica.
- Senge, P. et al. (2000). *La danza del cambio: Cómo crear organizaciones abiertas al aprendizaje*. Barcelona: Ediciones Gestión 2000.
- Senge, P. (2005). *La quinta disciplina: El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Buenos Aires: Ediciones Granica.
- Wagensberg, J. (2003). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets.