

Itinerarios de la Complejidad II
**“LA REVOLUCIÓN DEL SABER
CONTEMPORÁNEO”**

Dr. Pedro Sotolongo - Dra. Denise
Najmanovich

CLASE 4

Por Pedro Sotolongo

Seminario “La revolución del saber contemporáneo”

CLASE N° 4 por el Dr. Pedro Sotolongo

- ***El empleo concertado de nociones transdisciplinarias para las estrategias de indagación de las dinámicas complejas.***
- ***Sus abordabilidades y los atractores de la dinámica.***
- ***La geometría formal y la geometría real del mundo. ¿Porqué se fractaliza el mundo? Fractalidad y solución de conflictos entre dinámicas.***

El empleo concertado de nociones transdisciplinarias para las estrategias de indagación de las dinámicas complejas

Las estrategias multiámbitos de indagación de procesos sistémico-complejos a las que aludimos en la Clase Segunda de nuestro Seminario, requieren incorporar *concertadamente* las nociones que vienen siendo construidas transdisciplinariamente por el Pensamiento y las Ciencias de “la Complejidad”.

Entre tales nociones destacan algunas que ya hemos mencionado, como la de las “abordabilidades” del proceso de cambio y transformación –de la dinámica compleja- a indagar; la de sus “procesos emergentes” (de lo local a lo global) e “inmergentes” (de lo global a lo local); la de la “causalidad compleja” o “causalidad inter-ámbitos” suscitada por la articulación en red (en-red-ada) de tales procesos “emergentes” e “inmergentes”; la de la presencia en la dinámica estudiada de ciertas características “fractales” espaciales o en el tiempo; así como también la de su “auto-organización”; la de su “memoria-en-red”, o sea, el “reconocimiento de los patrones o pautas de cambio y transformación” que la propia interacción en-red-ada entre los componentes de la globalidad sistémica va generando; los “atractores” de esa dinámica “compleja” de cambios y transformaciones; los eventuales conflictos entre

dichos atractores que conducen a las “bifurcaciones” de la dinámica en cuestión; las denominadas “estructuras o conformaciones disipativas”, entre otras nociones.

A todo ello le prestaremos atención más detallada en esta Cuarta Clase.

Sus abordabilidades y los atractores de la dinámica

Como ya señaláramos en nuestra Clase Segunda, ya la selección misma de

✓ *los componentes*, o sea, los entes de menor escala que el propio indagador del proceso estudiado estime como capaces, por sus características inherentes, *de en-red-arse holísticamente en el proceso de cambio y transformación o dinámica compleja a estudiar* en cada caso particular;

✓ *el entorno*, es decir, aquel ámbito o porción del medio ambiente (éste último en principio inmenso) que ese indagador considere como aquél que *impacta globalmente a la dinámica a estudiar* y con el cuál esa dinámica en-red-ada, en tanto “compleja”, está siempre abierta, es decir, intercambiando sustancias (masas), energía, información y sentido identitario¹ con tal entorno;

redunda al mismo tiempo en lo que denominamos como “rango de abordabilidades” del proceso de cambio y transformaciones a estudiar. Lo que equivale a la gama de alternativas de comportamiento que podrá presentar esa dinámica –por serles “abordables”- dado esos componentes (y no otros) y ese entorno (y no otro).

¹ Tipos de intercambio con el entorno que examinaremos más de cerca en la Clase del Seminario que dedicaremos a la articulación de los procesos “emergentes” de la “auto-organización” con la problemática de la “morfogénesis”.

De suyo se comprende que si se toman en cuenta *adicionalmente otros* componentes o se dejan de tomar en cuenta algunos *de los inicialmente seleccionados*; y/o si se modifica el entorno tenido en cuenta, *ampliándolo o reduciéndolo*, cambiarán a su vez las "abordabilidades" de la dinámica a indagar. Es por lo mismo un rasgo de la experiencia y/o de la intuición del indagador (esto último sobre todo en los casos del estudio de dinámicas desconocidas o poco estudiadas) la *adecuada* selección de los componentes y del entorno de los procesos de cambio y transformación sistémico-complejos (naturales, sociales, de la subjetividad humana, tecnológicos, etc., etc. etc.) que se apresta a estudiar. Indicio adicional, si hacía falta, de la ineludible imbricación del indagador con lo indagado.

Y según sean sus abordabilidades, la dinámica compleja a indagar estará sujeta, eso sí, con mayor o menor propensión y/o más tarde o más temprano, a presentar ciertas maneras o modalidades características de su cambiar y transformarse, hacia las cuáles como que "quedara particularmente atraída". Por lo que las mismas se caracterizan diciendo que esa dinámica ha "caído" o "ha quedado atraída o atrapada" ya en uno, ya en otro "*atractor dinámico*". De manera que un "atractor" dinámico no es más que *una u otra manera o modalidad que se torna característica* para el cambiar y transformarse del proceso que estamos estudiando. Manera o modalidad de la cuál como que "le cuesta trabajo salir" (aunque eventualmente "sale" de ese "atractor"), pero para quedar atraída o atrapada en otro "atractor".

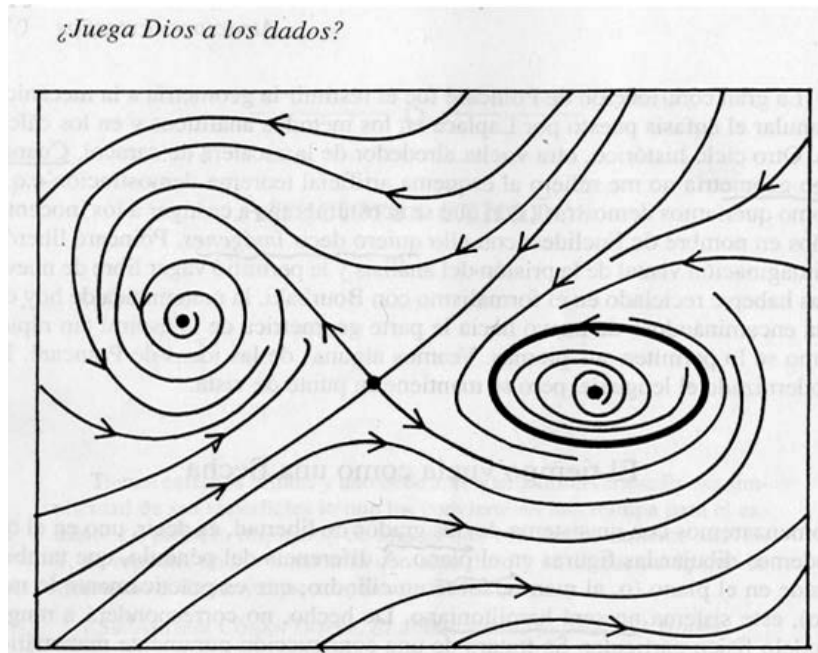
Esta circunstancia de quedar una u otra dinámica "atraída" o "atrapada" en una u otra manera o modalidad característica de su cambiar y transformarse, era ya conocida por la manera tradicional "de hacer Ciencia" que en nuestra Segunda Clase calificáramos como analítica, lineal y organizada por disciplinas. Sólo que debemos subrayar, que no se le solía denominar como "atractores dinámicos" y, por otro lado, lo que es mucho más importante, que dicha Ciencia solamente tenía que vérselas *con dos tipos de "atractores": los fijos o puntuales y los cíclicos o periódicos*. Tipos

de atractores de la dinámica que están asimismo presentes en ocasiones, por lo general, brevemente, en las dinámicas sistémico-complejas estudiadas por el Pensamiento y Ciencias de "la Complejidad", pero que no son los que las caracterizan.

Por cierto, los "atractores dinámicos" no se ven en el espacio y en el tiempo reales. Lo que vemos es esa manera característica de cambiar y transformarse el proceso estudiado que le corresponde, cuando el mismo queda "atraído" o "atrapado" en el "atractor" dado. Entonces, ¿dónde es que podemos "visualizarlos"? Los podemos "visualizar" representándolos en un espacio simbólico (matemático-topológico) que se denomina "espacio de estados". En el cuál cada punto de ese espacio corresponde a un estado del proceso estudiado, y cada línea corresponde a una sucesión de dichos estados, es decir, a una trayectoria de cambio y transformación. Y que tiene tantas dimensiones como características sean necesarias para describir la dinámica representada en el mismo (por supuesto que si éstas últimas son más de 3 ya no podremos "visualizarlas" todas).

Como ilustración, veamos ahora como se "visualizan" esos dos tipos de atractores dinámicos que estudiaba –sin denominarlos siempre así– la Ciencia de la modernidad (*analítica* –por *desmembradora* de las globalidades "complejas" por "complicadas" para "analizar" sus partes "más sencillas", es decir "menos complicadas"; *lineal*, por estudiar sólo interacciones *externas* a esas globalidades desmembradas, y entonces con variaciones en las consecuencias *siempre proporcionales* a las variaciones de las causas; y *disyuntiva*, por quedar organizada esa Ciencia por *disciplinas en compartimentos estancos*, que poco a poco se subdividieron adicionalmente en "especialidades", éstas en "especializaciones" y así, como alguien se ha expresado: "cada vez sabemos más....acerca de menos"...

“Visualizemos” pues los atractores fijos o puntuales y los atractores cíclicos o periódicos en el aludido espacio de estados:

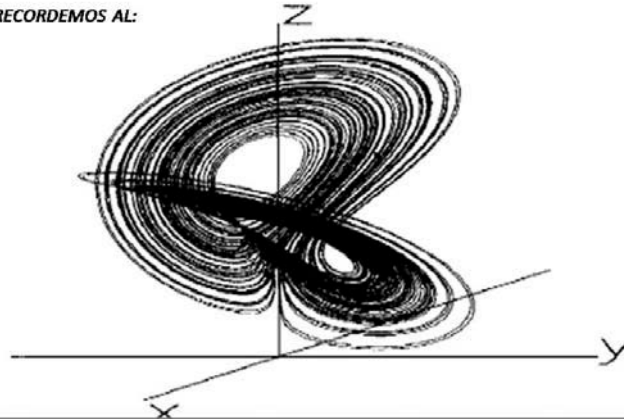


Dónde están representados (en los puntos negros en el espacio de estados) *atractores fijos o puntuales en sus tres variantes posibles*: de “sumidero” (a la izquierda) con todas las trayectorias de la dinámica (la “cuenca de atracción” del atractor) convergiendo en un punto; de “fuente” (a la derecha), con todas las trayectorias en la “cuenca de atracción” saliendo del punto; y de “silla-de-montar” (en el medio) con algunas de las trayectorias de la cuenca de atracción convergiendo y otras divergiendo del punto del atractor. Mientras que también está representado a la derecha un *atractor de tipo cíclico o periódico*, con la línea gruesa cerrada ovalada, como el conjunto cíclico de estados que recorre esa dinámica, para volverlos a recorrer, etc. Vemos, asimismo, cómo una dinámica (la de la derecha) del tipo fijo-o-puntual-“fuente”, se transforma en otra dinámica tipo *cíclica o periódica*.

Por el contrario, las dinámicas sistémico-complejas, objeto de la atención de la nueva manera “de hacer Ciencia” para los comportamientos de “lo-que-queda-en-el-medio” (recordar nuestra Clase Segunda), presentan *otro tipo de comportamiento* para el que resulta más característico el quedar “atraído” o “atrapado” en un

"atractor dinámico" *distinto* a los mencionados y que se denomina como "atractor raro, extraño o caótico". Cuyo acertado nombre quedará más evidenciado al comparar con los más arriba ya visualizados, cómo se representa *este otro tipo de "atractor"* en el espacio de estados:

RECORDEMOS AL:

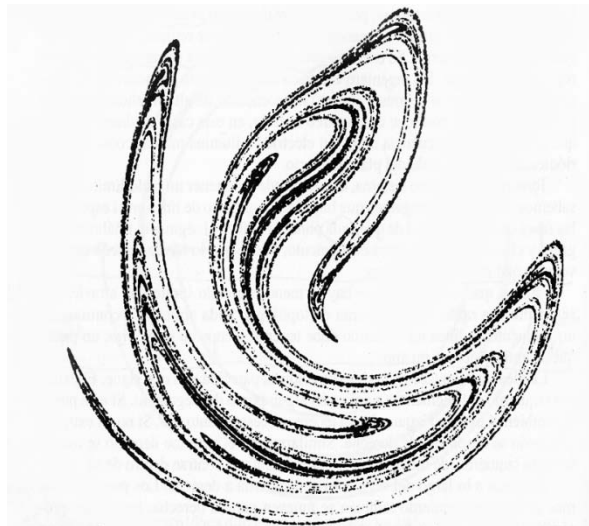


Atractor "raro" o "caótico" de Lorenz
(Bucle "anudado" en un espacio de fase de
3 dimensiones).

No es difícil constatar, de la lámina anterior, el porqué pareció "raro", o "extraño", e incluso "caótico" dicho "atractor" -en comparación con la sencillez relativa de la imagen de los atractores fijos o puntuales y de los cíclicos o periódicos vistos más arriba. Pero tal "caos" no es en realidad tal, sino una dinámica *sumamente compleja*, debido a que ha quedado atraída o atrapada en un atractor tal que al ser representado en el espacio de estados, en un volumen no infinito del mismo, *exhibe infinitas trayectorias posibles (que, además nunca se intersectan)*, lo que es resultado de un alternarse el orden y el desorden, la estabilidad y la inestabilidad, el equilibrio y el desequilibrio, en dicha dinámica, *por lo que se torna no factible el pronosticar o predecir su curso ulterior*, ya que puntos (estados) muy próximos en el espacio de estados divergen significativamente alejándose mutuamente, mientras otros puntos (estados) muy alejados, convergen, hallándose entonces muy próximos. Lo que condiciona *la presencia siempre de una gama de alternativas ulteriores* para tales

dinámicas sistémico-complejas. Una de las razones por las que la manera tradicional de “hacer Ciencia” no se ocupaba de tales dinámicas, como veremos más adelante.

Veamos ahora otro atractor “raro”, “extraño” o “caótico”:



¿No les recuerda la forma que adopta un fluido al ser agitado o revuelto?...

Por cierto, que los atractores “raros”, “extraños” o “caóticos” presentan una propiedad muy singular, denominada como “autosimilaridad”, y que consiste en que si tomamos fotos de diversas porciones suyas –a muy diferentes escalas- en el espacio de estados y las ampliamos todas al mismo tamaño, es difícil discernir cuál de ellas representa el atractor en su totalidad y cuál corresponde sólo a una o a otra porción del mismo. Ello es debido a la geometría “arrugada” –“fractal”- de éstos atractores. Geometría a la que le dedicaremos atención al final de esta Clase.

Pero, ¿porqué la manera tradicional “de hacer Ciencia” se concentraba en los procesos de cambio y transformación que característicamente quedaban “atraídos” o “atrapados” sólo en los atractores fijos o puntuales y/o en los cíclicos o periódicos?

No era por casualidad. Por el contrario, era porque dada la índole de semejantes maneras características de comportarse una dinámica:

❖ siempre más-de-lo-mismo, el mismo estado (el reposo; el movimiento inercial; la rutina; la quietud; ciertas adicciones, etc.), como lo correspondiente a los atractores fijos o puntuales;

❖ un recorrer uno u otro ciclo de estados, para volverlo a recorrer y volverlo a recorrer y así, *ad-infinitum* (un péndulo no amortiguado; las oscilaciones eléctricas de ciertos circuitos; el reiterarse cada cierto tiempo algunos procesos sociales –deseados o indeseados, etc.) como lo correspondiente a los atractores cíclicos o periódicos;

constituían procesos acerca de los cuáles –además de su más fácil estudio- es *factible siempre realizar pronósticos* Así, si nos preguntan: ¿qué va a sucederle a la dinámica (natural, o social, o la que fuere) atraída o atrapada en un atractor fijo o puntual, dentro de una hora, un día, un mes, un año, un quinquenio, etc., podemos afirmar: *"se comportará tal y como se está comportando actualmente"*. Y si nos preguntan lo mismo acerca de una dinámica "atraída" o "atrapada" en un atractor cíclico o periódico, igualmente podemos afirmar: *"recorrerá ese ciclo de estados, para volverlos a recorrer, y así sucesivamente"*... En otras palabras, son los tipos de dinámica susceptibles de acomodarse *al ideal de pronosticación, de predicción*, imperante en esa manera tradicional de "hacer Ciencia". Amén de ser particularmente adecuados para su matematización –y con ecuaciones lineales y/o linealizables- que como es conocido constituyó otro de los ideales de ese tipo de Ciencia.

No obstante, si aquellos procesos de "más de lo mismo" y/o de "recorrer ciclos de los mismos estados ya recorridos" resultan *demasiado "pobres"* dinámicamente hablando, pues prácticamente *todo se conserva como está*, los otros procesos ya

aludidos atraídos o atrapados en "atractores raros, extraños o caóticos" resultan *demasiado "ricos"* (lábilis, variacionales) dinámicamente hablando. Es decir, en ellos prácticamente *todo cambia constantemente, nada se conserva*, ni lo deseable, ni lo indeseable, por lo que es también una dinámica no óptima.

Por ello precisamente, los procesos de la naturaleza en sus diferentes ámbitos, se van situando en una modalidad de su cambiar y transformarse que los coloca en lo que, en la jerga de las Ciencias de "la Complejidad" se denomina "al-borde-o-límite-de-Caos" (como si hubiesen quedado atraídos o atrapados en un "atractor" de tipo "raro, extraño o caótico, pero no tanto"..., es decir, sin trascender completamente hacia ese otro comportamiento dinámico ya aludido en que nada se conserva). Y tales procesos naturales se comportan así auto-organizadamente (es decir, de una manera espontánea), en la que *ninguno de los componentes en-redados en la dinámica natural de que se trate le dicta a los demás componentes lo que tienen que hacer o no hacer*.

Así, las redes de interacciones entre componentes (las dinámicas en-red-adas) auto-organizantes, lo son así, mientras más "distribuida" (es decir, menos "jerárquica") es dicha red de interacciones. Por ello mismo, y en tanto las redes de interacciones sociales en las sociedades actuales –de tirios y de troyanos- son sumamente jerárquicas (poco distribuidas), las redes sociales rara vez presentan ese carácter auto-organizante, sino que son "hetero-organizadas", lo que equivale a que a sus componentes (seres humanos, sus instituciones, etc.) *son otros de los componentes sociales (otros seres humanos, otras instituciones) las que le dictan lo que pueden o deben hacer y/o lo que no pueden y/o no deben hacer*. Y así les va a unas y a otras sociedades, a las de los tirios y a las de los troyanos....

Pero no es por casualidad, aunque sea espontáneamente, que tales redes de interacciones dinámicas auto-organizantes se comportan de esa manera. Existen circunstancias que condicionan tal comportamiento. Son cuatro, al menos, y tienen que ver con que tales dinámicas en-red-adas *al situarse en ese ámbito del cambiar y transformarse "al-borde-o-límite-del-Caos"*, al mismo tiempo logran *optimizar*:

- el grado de conectividad entre sus componentes en-red-ados,
- la capacidad de procesar la información que les es necesaria,
- la gama de alternativas de cambiar y transformarse ulteriormente,
- la adaptabilidad y evolutibilidad ante cambios internos y/o del entorno,

dónde, como se constata, cada una de tales optimizaciones propicia a las demás.

De dónde se desprende una importante "moraleja": Haríamos bien en propiciar que nuestras sociedades al menos fuesen lo más distribuidas que resulte factible y lo menos jerárquicas que resulte necesario, pues en la medida en que así fuesen, estarían más cerca de lograr las aludidas características de optimización, de las que carecen las actuales sociedades.

Para captar las diversas circunstancias por las que puede atravesar la dinámica sistémico-compleja que estemos estudiando, lo que es equivalente a *captar los diversos "atractores" en que la misma es susceptible de quedar "atraída" o "atrapada"* (de entre los aludidos más arriba, pues hemos mencionado ya todos los tipos de "atractores" que se conocen), se hace necesario, como parte de su estudio, *el "hacerle recorrer" el rango o gama de sus "abordabilidades"*. Para ello, es conveniente tener en claro aquellas características de esa dinámica sobre las cuáles podemos incidir (como indagadores), pero *sin cambiar la índole de la misma, es decir, sin modificar la cualidad de lo que "la-hace-ser-la-dinámica-que-es"*. A tales características se les llama *"características o parámetros de control"*:

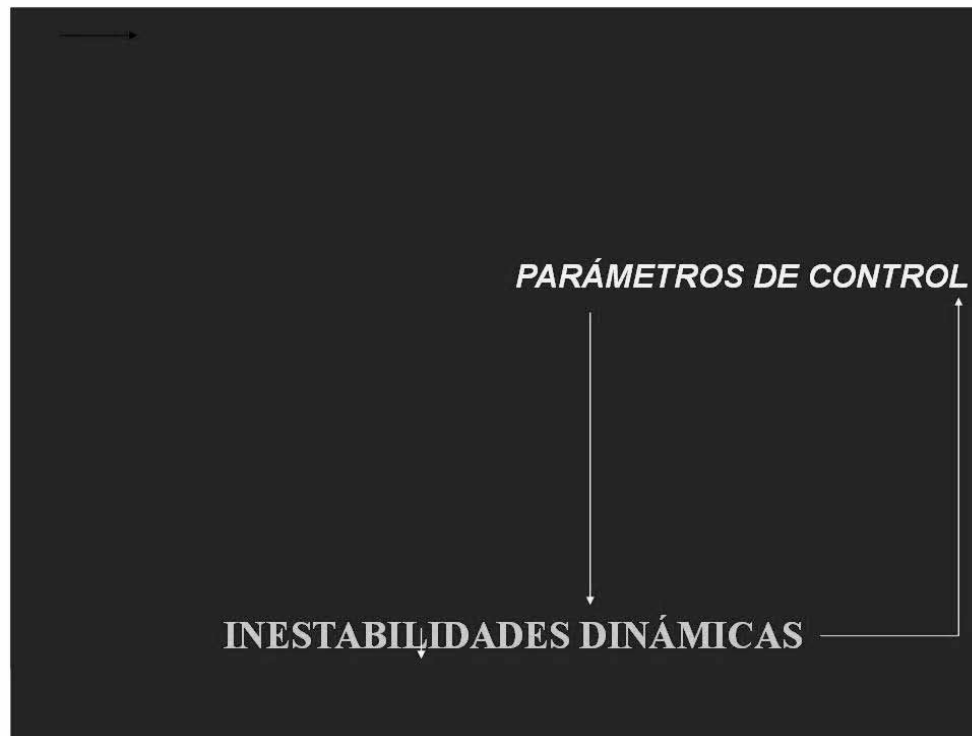
**LOS “PARÁMETROS” DE “CONTROL”
QUE AYUDAN A ESTUDIAR LA DINÁMICA, SON
AQUÉLLAS CARACTERÍSTICAS SUYAS
SOBRE LAS QUE PODEMOS EJERCER
CIERTA INFLUENCIA, PARA PROPICIAR QUE
EL CAMBIO Y LA TRANSFORMACIÓN
A ESTUDIAR “RECORRA” EL RANGO DE SUS
ABORDABILIDADES EN UN LAPSO DE TIEMPO
CONVENIENTE A LA INDAGACIÓN,
PERO QUE NI PRESCRIBEN, NI CODIFICAN
LA ESPECIFICIDAD DE ESA DINÁMICA.**

**ACTUANDO SOBRE
LOS PARÁMETROS DE “CONTROL”
SE PROPICIA
EL PODER PRECISAR
CUÁNDO Y COMO LA DINÁMICA INDAGADA
LLEGA A DESESTABILIZARSE
Y/O
VUELVE A ESTABILIZARSE
(ES DECIR, SUS PUNTOS CRÍTICOS
O DE BIFURCACIÓN).**

Lo que puede apreciarse en esta lámina de arriba representa una circunstancia muy propia de las estrategias de indagación de las dinámicas sistémico-complejas, que las distingue de las metodologías tradicionales. Para la manera tradicional “de hacer Ciencia”, “inestabilidad” es una “mala palabra” que se intenta eludir a todo costo. Por el contrario, en de las dinámicas “complejas”, una de las cosas que se busca es precisamente el constatar *dónde, cómo y cuánto se desestabiliza el cambio y transformación estudiado*. Es en tales condiciones de inestabilidad, como apuntáramos en la Clase Segunda, que se torna más fácil distinguir las denominadas

"características o variables de orden o colectivas" que la caracterizan más sintéticamente facilitando su aprehensión. Por otra parte, tales inestabilidades por lo general van acompañadas de un cambio de "atractor" de la dinámica indagada, es decir, la misma queda atraída o atrapada en ese momento por otro atractor diferente, pero del mismo tipo del que la había atraído o atrapado anteriormente o incluso por un atractor de un tipo distinto del que la había atraído anteriormente. Esos cambios-de-atractor se acompañan de la aparición de lo que en ocasiones denominamos "conformaciones o estructuras disipativas", en tanto en el nuevo atractor, queda disipado(a) por el momento el desequilibrio, el desorden, la inestabilidad que había alejado la dinámica del(a) anterior orden, equilibrio, estabilidad, ya que es en esas condiciones alejadas (aunque no demasiado) del orden, del equilibrio, de la estabilidad, dónde tiene lugar el emerger de nuevos grados "de Complejidad".

**EN LA CIENCIA TRADICIONAL
BUSCÁBAMOS A TODO COSTE
LAS CONDICIONES DEL EQUILIBRIO,
DE LA ESTABILIDAD, DEL CAMBIO Y LA
TRANSFORMACIÓN (DE LA DINÁMICA)
INDAGADA.
LAS PALABRAS "INESTABILIDADES DINÁMICAS"
ERAN "MALAS" PALABRA ALLÍ.
POR EL CONTRARIO, EN LAS ESTRATEGIAS
DE INDAGACIÓN DE "LA COMPLEJIDAD"
LAS INESTABILIDADES DE LA DINÁMICA
JUEGAN UN *IMPORTANTE* PAPEL HEURÍSTICO.**



*LAS ESTRATEGIAS DE INDAGACIÓN Y DE MODELACIÓN
DE FENÓMENOS COMPLEJOS Y SU CONTRASTACIÓN CON LAS METODOLOGÍAS
CIENTÍFICAS TRADICIONALES.*

**¿PORQUÉ ES IMPORTANTE EL LLEVAR
LA DINÁMICA “EN-RED-DADA” QUE SE
INDAGA A SUS PUNTOS CRÍTICOS O DE
INESTABILIDAD (DE BIFURCACIÓN)?**

**PORQUE AL CAMBIAR BRUSCAMENTE
(BIFURCÁNDOSE) ESA DINÁMICA,
ES CUÁNDO MÁS POSIBLE RESULTA
DISTINGUIR CIERTAS CARACTERÍSTICAS
DE LA MISMA COMO UN TODO (denominadas
por eso mismo “colectivas” o “de orden”)**

Las aludidas "conformaciones o estructuras disipativas" o "conflictos" entre atractores, entre diferentes maneras características de cambiar y transformarse uno u otro proceso, suscitan asimismo las "bifurcaciones" de la dinámica; que son inherentes a las dinámicas no-lineales, pues las dinámicas lineales no se bifurcan, atraídas por el mismo tipo de atractor (que son siempre de los "fijos" o "puntuales" y/o de los "cíclicos" o "periódicos").



Digamos algo adicional con relación a nuestras ya mencionadas "características o variables de orden o colectivas". Ellas deben reunir en si los siguientes rasgos:

- Caracterizar *el emerger (o el cesar)* de una u otra pauta o patrón de correlaciones entre los componentes de la dinámica (su sinergia),
- *Cambiar con las transiciones* de pauta (o patrón) a pauta (o patrón)

- *Variar con más lentitud* que las características o variables individuales (no colectivas),
- Incorporar a ellas una “causalidad circular o local-global-local” típica de las dinámicas complejas en-red-adas

todo lo cuál les confiere esa ya aludida útil capacidad para facilitar la indagación del cambio y transformación sistémico-complejo de que se trate, reduciendo su “dimensionalidad dinámica” (recordar la Segunda Clase).

**LAS ESTRATEGIAS DE INDAGACIÓN Y DE MODELACIÓN
DE FENÓMENOS COMPLEJOS Y SU CONTRASTACIÓN CON LAS METODOLOGÍAS
CIENTÍFICAS TRADICIONALES.**

**PARA LAS VARIABLES COLECTIVAS
O DE ORDEN ES FACTIBLE, EN OCASIONES,
PLANTEAR *ECUACIONES NO LINEALES*
ENTRE ELLAS
(UNA RELACIÓN FUNCIONAL NO LINEAL).
TALES ECUACIONES PUEDEN PRESENTAR
SOLUCIONES DEL TIPO:
*Fijo o puntual,
Cíclico o periódico,
De Multiestabilidad,
Del Caos complejo,
según el atractor predominante.***

Aunque como hemos ya apuntado, las dinámicas complejas sólo transitoriamente quedan atraídas o atrapadas por los atractores fijos o puntuales y/o cíclicos o periódicos, siendo los característicos para ellas los atractores raros, extraños o de Caos complejo, o al borde de los mismos. Esos son los que suelen ser

más multiestables y su mera presencia ya nos da la certeza de que estamos en presencia de una dinámica compleja, pues sólo ellas quedan atraídas por esos otros tipos de atractores (no así las dinámicas lineales no complejas).

Así, podemos ahora representar esquemáticamente todo lo apuntado de la siguiente manera:



Siendo ello equivalente a las denominadas variantes "desestabilizadoras"- "estabilizadoras"- "desestabilizadoras" de las *estrategias de indagación multi-ámbitos de las dinámicas sistémico complejas*. Pues todo ello, recordémoslo, ocurre a través del en-red-arse de unos u otros *componentes* (físicos, químicos, biológicos, sociales, de la subjetividad humana, tecnológicos, etc.) en una u otra *dinámica "en-red-ada"*, y abierta siempre a la interacción no lineal (con consecuencias no siempre proporcionales a las causas) entre esos componentes y de la red en que se "en-red-an" como un todo *con el entorno*. Comportamiento dinámica característico –con sus *atractores "raros", "extraños" o "caóticos"*- del mundo, como vimos en la Clase Segunda, "de-lo-que-queda-en-el-medio".

La geometría formal y la geometría real del mundo. ¿Porqué se fractaliza el mundo? Fractalidad y solución de conflictos entre dinámicas.

Ya tuvimos ocasión de apuntar que las dinámicas "caótico-complejas", al ser representadas en el espacio de estados, presentan autosimilaridad (semejanza de conformación a diversas escalas), que es una de las propiedades de la geometría y cronometría fractales. Es decir, de las conformaciones espaciales y en el tiempo *del mundo real*. Muy diferentes a las formas clásicas tradicionales –pero ideales- de la geometría que nos enseñan en la escuela (la euclideana; por Euclides, el griego), con sus esferas, circunferencias, planos, líneas rectas, que no por cómodas de manejar geoméricamente, son reales, pues nadie ha visto nunca en el mundo real ninguna de esas perfectas formas. Por supuesto para todos los fines prácticos acostumbramos a decir que la Tierra o una naranja, son "redondas" y con dimensión 3; que la calle por dónde caminamos es plana y con dimensión 2; y que la línea que dibujamos con la crayola en la pizarra, es eso, una línea y con dimensión 1. Pero son sólo cómodas –por perfectas y "lisas" (no arrugadas") útiles aproximaciones.

Sin embargo, en realidad ni la Tierra ni la naranja son una esfera perfecta (o para este caso, ninguna cosa real es una una figura cúbica perfecta); ni nuestra calle es una superficie perfecta (y para este caso, ningún objeto es un cuadrado, o triángulo exacto); ni dibujamos una línea perfecta en la pizarra (y para este caso nada es una línea exacta en el mundo real). Por el contrario, cuando vemos *tal-como-son* los objetos ya mencionados, o la línea de una costa, o el perfil de una cordillera, o la copa de un árbol, o una coliflor, o el humo que emerge de un cigarrillo, lo que constatamos son formas "rugosas"

Tomemos una hoja de papel, supuestamente (despreciando su grosor, que siempre lo tiene) de dimensión 2, en tanto superficie "lisa" (mientras no la examinemos con un microscopio), y comprimamos con el puño cerrado dicha hoja de papel "arrugándola": ¿Cuál dimensión presenta ahora? Ya no es 2. ¿Tres? Pero tampoco la hemos comprimido tanto que resulta una esfera perfecta. ¿Entonces?....

Aquí es dónde "hace su entrada" su "dimensión fractal" (del latín *fractum*, fracturado o arrugado). Ese papel arrugado presenta una dimensión "fractal" ("fracturada") entre 2 y 3. Digamos, 2.5. Y si la aprieto y arrugo más, 2.7, o 2.8 si sigo apretándola y arrugándola. Lo mismo ocurre con la coliflor, o con el humo del cigarrillo, o con la copa de un árbol. El perfil de una cordillera o la "línea# de una costa no son una línea de dimensión 1, sino en realidad, constituyen formas rugosas con dimensión fractal ("fracturada") entre 1 y 2 en estos casos. Por ejemplo, la costa de Noruega, con sus conocidos "fiordos", tiene una dimensión fractal mucho más cercana a 2 (pero sin llegar a 2) que la costa de Inglaterra o que la de Argentina. Mientras que la de Africa del Sur, por ser menos "arrugada", está mucho más cercana a 1, sin serlo tampoco.

Y si hacemos lo mismo que expresáramos para el caso de los atractores caóticos, y le tomáramos fotos sucesivas pero a distintas escalas a cualquiera de las manifestaciones mencionadas del mundo real y después las ampliáramos al mismo tamaño, no pudiéramos reconocer un pedazo de cordillera o de la costa, de la cordillera o la costa completa; ni para el caso, un pedazo de la coliflor, de la coliflor entera, etc. Son todas formas auto-similares, es decir fractales.

Otras dos propiedades que caracterizan a los fractales son:

- ✓ El llenado del espacio (space filling).
- ✓ La interacción fuerte en el contacto entre fases (en una u otra interfase).

Comencemos por esta última: Todos hemos ido a una playa en un día muy soleado y de poco viento (son los mejores para ir allí). Y solemos decir al mirar al mar: "Está como un plato"... "Parece un plato"...etc. Y si nos fijamos en el horizonte –dónde se unen a la vista el mar (la fase acuosa) y el aire (la fase gaseosa), se nos aparece a todos los fines prácticos como una línea, porque debido al poco viento y al buen tiempo, *la interacción entre las dos fases es muy poco intensa*. Pero he aquí que comienza a soplar una brisa, y ésta se hace cada vez más intensa. El mar nos deja de parecer "un plato" y se va encrespando. Vemos olas cada vez más significativas. Y si nos fijamos de nuevo en la "línea" del horizonte, ésta "ha desaparecido"...Lo que vemos es una rugosa conformación, en la que el agua a veces está encima de un tramo de aire, y en otro lugar el aire está por debajo de otro tramo de agua. *Por la fuerte interacción esta vez entre ambas fases en esa, su interfase*. Y si hiciéramos lo ya sugerido, es decir, tomáramos fotos de esa línea del horizonte a diferentes escalas y las ampliáramos a un mismo tamaño, no discerniríamos cuál representa 10 Kms, de cuál representa 3 ms de "línea" de horizonte, y lo que veríamos son figuras rugosas agua-aire, con auto-similaridad, debido a la ya aludida característica fractal *de las fuertes inter-fases de interacción*.

Abordemos ahora la otra característica específica de los fractales espaciales que es denominada como el "llenado-del-espacio" (space-filling). Lo que, por otra parte, nos servirá para contestar a la interrogante formulada en el título de este acápite de la Clase:

¿Porqué se fractaliza el mundo?

Imaginemos, por ejemplo, el proceso del crecimiento del tronco de un árbol. Se trata, por lo mismo, de un proceso de cambio y transformación –de una dinámica-vegetal, que, en tanto es *de crecimiento vegetal*, implica una direccionalidad *vertical de-abajo-hacia-arriba*. A medida que va creciendo el tronco del árbol, añadiendo por ello tejido vegetal tras tejido vegetal a si mismo, dichos tejidos, en tanto tienen masa,

pesan, es decir, *interactúan con la fuerza de la gravedad terrestre*, en lo que constituye una dinámica esta vez de índole *física* que conlleva una direccionalidad *también vertical*, pero esta vez *de-arriba-hacia-abajo*.

Es decir, nos hallamos en presencia de *dos dinámicas antagónicas*: una, la vegetal, que tiende a que crezca el tronco del árbol, "impulsándolo" hacia arriba; y la otra, la física, que tiende a "aplazar" el tronco hacia abajo, dificultando su movimiento hacia arriba. Primero, mientras el tronco pesa poco, predomina la dinámica vegetal por sobre la física, pero a medida que el tronco crece, ambas se van igualando, hasta que en cierto momento como que se equilibran. En ese momento, o se detiene el crecimiento del árbol (sin llegar a serlo) o la naturaleza tiene que "resolver el conflicto entre las dos dinámicas".

Es esto último lo que sucede, y de manera espontánea. En ese momento del advenimiento del equilibrio entre ambas dinámicas contrapuestas, ocurre una bifurcación –que ya sabemos que ocurren concomitantemente a la resolución del conflicto entre dos (o más) atractores de una u otra dinámica (acá representados por el atractor proveniente del crecimiento del tronco -de índole vegetal- y el atractor proveniente de la otra dinámica -de índole física); y entonces el árbol se "ramifica" (en este caso, literalmente), comenzando a crecer dos ramas en diferentes direcciones. Por supuesto que habiendo resuelto el conflicto anterior, éste vuelve a plantearse, pero esta vez entre el ulterior crecimiento de cada una de las ramas (que asimismo tienen peso, aunque menor que el del tronco inicial) y son atraídas por la gravedad terrestre. Lo que, como habrán adivinado lo que esto leen, conduce más temprano que tarde, a un nuevo equilibrarse ambos procesos y....a una nueva bifurcación; proceso que se repite y se repite, cada vez entre ramificaciones más y más pequeñas, pero no por ello ajenas a ambas dinámicas.

El resultado global no es otro que lo que conocemos como "copa del árbol", constituida por todo el conjunto de todas las grandes, medianas, pequeñas y pequeñísimas ramas resultado de las sucesivas bifurcaciones –aquí literamente ramificaciones- cada una de ellas solucionadora del conflicto previo. Y aquí "entra en escena" lo fractal. Si tomáramos –una vez más- fotos de diversas partes de esa copa de árbol, pero a diferentes escalas de la misma y después las ampliáramos todas a un mismo tamaño, no distinguiríamos la copa del árbol prácticamente completa de cualquiera de sus porciones parciales. Es decir, nuestra copa-de-árbol es "autosimilar", tiene una de las propiedades de la geometría fractal.

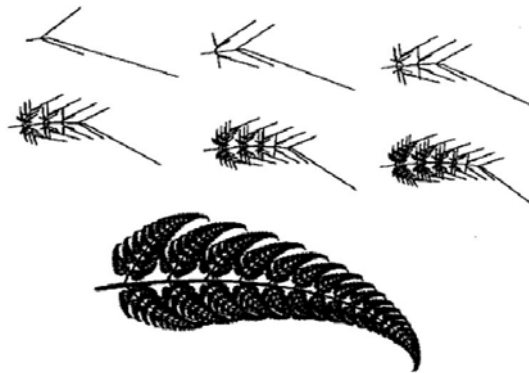
De manera que a la pregunta de: *¿porqué se fractaliza el mundo?* podemos responder afirmando que lo hace para resolver-espontáneamente (es decir auto-organizadamente) y cada vez que se hace presente, *un conflicto entre dinámicas contrapuestas.*

Pero ahí no queda el asunto: Si examinamos el espacio ocupado por *todas* las ramas (grandes, mediana pequeñas) en esa copa-de-árbol, comprobaríamos que aunque no ocupan completamente ese espacio (pues podemos ver a través de los intersticios entre ramas lo que está del otro lado de esa copa de árbol), *no habría otra disposición de esas mismas ramas que –habiendo existido la presencia del antagonismo aludido entre dinámicas opuestas- pudiese haber llenado-de-manera-mejor ESE espacio.* En otras palabras, el proceso de fractalización natural descripto más arriba, constituye, *al mismo tiempo,* un proceso de *optimización natural (suficiente, aunque no necesario),* de cómo llenar en las conflictivas condiciones dinámicas confrontadas, el espacio en el que las mismas actuaban. Es esa precisamente, la característica de los fractales conocida como "llenado-del-espacio"

(space-filling). Que bien pudiera llamarse asimismo "optimización del llenado del espacio en condiciones de la presencia de dinámicas antagónicas".²

Apuntemos para finalizar nuestra breve excursión por la geometría fractal, que *ese llenado óptimo del espacio* al que hemos aludido, tiene en ocasiones consecuencias notables ulteriores *NO necesarias*. Por ejemplo, volvamos a nuestra copa-de-árbol: En sus ramas crecen hojas. En las hojas están los llamados "cloroplastos", organelos de las células vegetales responsables por el proceso de captación y aprovechamiento de la energía solar (conocido como "fotosíntesis"), sin el cual no se concibe el despliegue del reino vegetal en la Tierra. De manera que podemos concluir que la fractalización anterior, a través de sucesivas bifurcaciones (ramificaciones) creó las condiciones *suficientes*, aunque *NO necesarias*, para propiciar, *SIN que fuera ese el objetivo*, la optimización del llenado de ESE espacio, *para a su vez, SIN que fuese tampoco el objetivo, optimizar el proceso fotosintético en el mismo*.

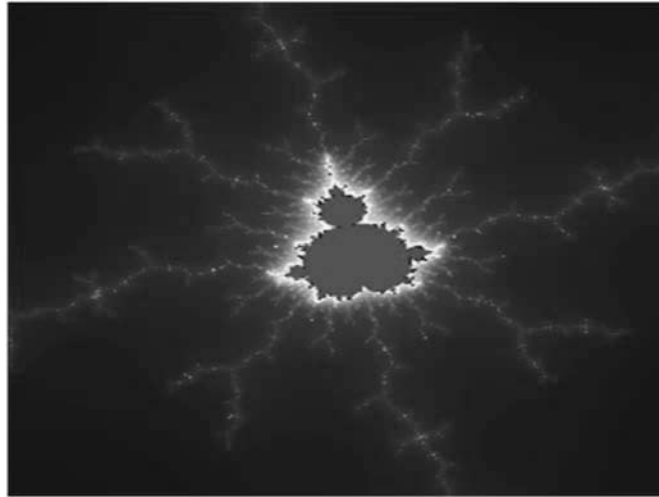
¿¡Sorprendente!?!...Sí, no hay duda. Pero yo diría más....¡Bello!.... ¿o no? Pero más bellas son algunas de las formas fractales: ¡Disfrútenlas ahora!...



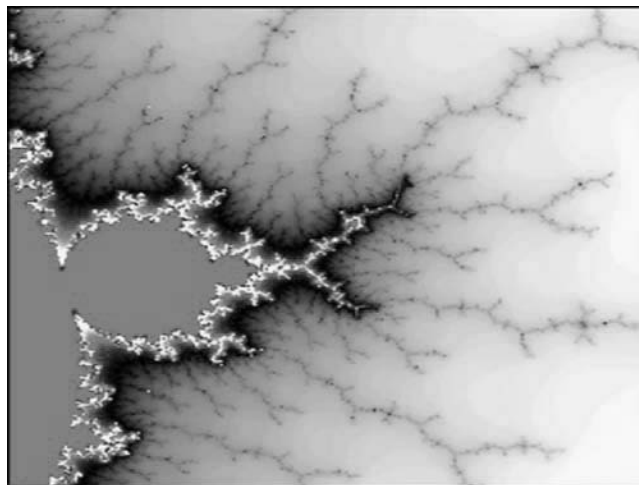
Formación fractal de un helecho.

² Si se piensa en la "línea" del horizonte para el caso del agua de mar y el aire atmosférico a la que aludíamos más arriba en este texto, podríamos concluir que *ese espacio es asimismo llenado óptimamente* por el agua-aire en condiciones del antagonismo de la dinámica hidráulica (que tiende a aplanar el mar) y la dinámica gaseosa –el fuerte viento- (que tiende a agitar ese mar). Ya vimos como esa "línea" del horizonte se fractaliza, adquiriendo la cualidad de autosimilaridad, además de ésta ahora mencionada.

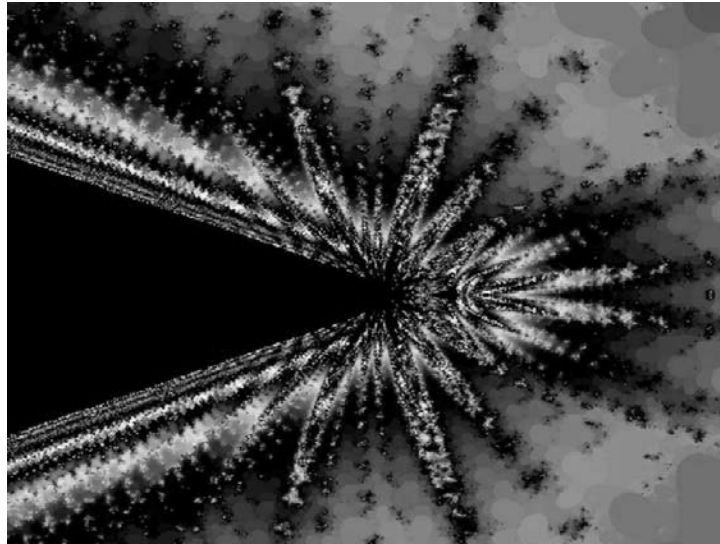
De dónde se desprende que "el-mundo-no-se-complica-la-vida" y plasma formas que nos parecen sumamente complejas, mediante acciones sumamente sencillas, como una muy frecuente, la de la "iteración", es decir, *repetir la operación hecha ya, con el resultado que se obtuvo*, y volverla a repetir con el nuevo resultado obtenido, y así sucesivamente. Como en la figura del helecho.



El de arriba es el denominado "conjunto de Mandelbrot" (el creador de la geometría fractal). Parece increíble, pero resulta de "iterar" (reiterar) lo obtenido con la expresión $z = z^2 + c$



Un “pedacito” (una “puntica”) de un tramo del “conjunto de Mandelbrot” en el que se contienen múltiples otros pequeños “conjuntos de Mandelbrot” si lo amplificamos.



Formas fractálicas generadas por computación.



Material complementario sugerido con la clase

Textos:

- Sotolongo, P. “Los presupuestos y las implicaciones filosóficas del pensamiento –y de las ciencias– de la complejidad”
- Sotolongo, P. “Sobre la correlación entre procesos emergentes y normativos sociales”
- Stewart, Ian “Ensayo pictórico” en “¿Juega Dios a los dados?” (sobre fractales)
- Gleick, J. “Una geometría de la naturaleza” en “Chaos” (sobre fractales)
- Ibáñez, J. (comp.) Teoría de los objetos fractales (sobre fractales)

Presentaciones de diapositivas:

- Estrategia interámbitos
- Propiedades de los fractales

Material subido a la biblioteca

Texto:

- Manrique, R. “Estructuras disipativas: de la termodinámicas a la terapia familiar” (fragmento).