



La complejidad en Biología

“Entender los fenómenos naturales desde la óptica de los sistemas dinámicos complejos”

Entrevista con Dante Chialvo, Profesor Asociado de Fisiología en la Northwestern University de Chicago y en la Universidad de California en Los Ángeles UCLA (Los Ángeles), Investigador Principal de Física del CONICET y becario Fulbright US Scholar Award.

Entrevista de Lic. M. Soledad Roqué Ferrero

Dante Chialvo ha dedicado su carrera científica a entender los fenómenos naturales desde la óptica de los sistemas dinámicos complejos. Es médico, recibido en la Universidad Nacional de Rosario en Argentina. Desde hace dos décadas se ha radicado en Estados Unidos, donde actualmente es Profesor Asociado de Fisiología en la Northwestern University de Chicago y en la Universidad de California en Los Angeles UCLA (Los Ángeles).

Desde 2005, Chialvo es Investigador Principal de Física del CONICET en Argentina, adonde piensa volver a radicarse en un futuro cercano a fin de conformar un grupo de investigación dedicado al estudio multidisciplinario de los sistemas complejos.

Actualmente, se encuentra en Córdoba (Argentina) dictando un curso de Postgrado en la Facultad de Matemática Astronomía y Física (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba, sobre “Introducción a la Complejidad en Biología y Medicina” en el marco de una iniciativa financiada por su beca Fulbright. Un objetivo secundario de este curso es cristalizar colaboraciones futuras entre docentes y estudiantes de biología, medicina, química, física e ingeniería a fin de estimular el enfoque multidisciplinario en el campo de estas ciencias.

Sus trabajos cubren un rango amplio de temas, desde el modelado matemático de las arritmias cardiacas, el estudio de los estados de conciencia, los motores moleculares, el código neuronal, y los fenómenos colectivos de autoorganización en comunidades de individuos, insectos sociales y el cerebro, entre otros. Durante su estadía en Córdoba, dialogó con **Revista de**

Educación en Biología (REB) sobre algunos de estos temas.

REB- ¿Cómo despertó su interés por el estudio de los sistemas complejos?

En mi adolescencia científica, cuando estaba todavía en Argentina, encontré una pregunta que fue la que me hice el resto de mi carrera ¿Cómo entender el funcionamiento de la naturaleza en general? En la naturaleza hay sistemas que son simples y sistemas que son complejos. Los simples son factibles de ser entendidos matemáticamente de una forma muy elegante, resolviendo ecuaciones lineales. Generalmente son sistemas compuestos de muy pocas partes. Por ejemplo, una bicicleta tiene 4 ó 5 partes móviles, el resto son superfluas. Uno la puede describir matemáticamente, es decir “está andando, tomando una curva, etc.” de una forma muy sencilla, y aún puede hacer predicciones de estabilidad, etc. Pero cuando empieza a agregar más piezas, se entra a construir un sistema complejo que no se puede resolver con esas sencillas ecuaciones. En general, los sistemas complejos están formados por piezas no lineales. Esto quiere decir que según cambie el estado, cambia la regla, y al cambiar las reglas, cambian las ecuaciones matemáticas que describen al sistema. En consecuencia, cuando aparecen estas no linealidades, la posibilidad de hacer predicciones se reduce. Una característica de estos sistemas es lo que se denomina “propiedad emergente”, algo que si bien vemos como propiedad del todo no podemos predecirlo específicamente de las propiedades de las partes. Lo que sí podemos predecir es lo que emerge si tenemos muchas partes individualmente no lineales. Ejemplos de sistemas complejos pueden ser: sociedades de individuos,

colonias de hormigas, cerebros, sistemas inmunes, sistemas macroeconómicos, sistemas ecológicos, interacción de especies, sistemas de muchas partículas, etc.

A fines de los 70', un grupo relativamente pequeño de científicos empezó a plantear teorías muy simples para poder entender estos sistemas complejos. Al final de los 80', aparecieron unas que me atrajeron mucho, y a partir de ahí, dediqué prácticamente todo el resto de mi carrera, a estudiar esos sistemas. El énfasis es justamente hacer y estudiar modelos matemáticos que nos ayuden a explicar estas conductas que emergen y a entender qué condiciones son más o menos importantes. Por ejemplo, en el caso de las hormigas ¿Cuál es el mecanismo por el cual son capaces de realizar sendas de decenas de metros a pesar que sólo pueden "ver" (en realidad olfatear) no más de 1 ó 2 mm por delante? ¿Cómo las sociedades crean una "memoria colectiva"? ¿Qué es lo que hace que existan tendencias a vender o comprar sin ninguna razón aparente en la bolsa y que se produzcan corridas especulativas? El estudio de estos sistemas evidenció que, a pesar que sus partes constitutivas son entre sí muy diferentes, tenían conductas universales.

Una dinámica universal emergente son las avalanchas. Éstas se ven en sistemas físicos muy variados y de simple entender. Por ejemplo, cuando construimos una pila de arena u observamos la nieve en la ladera de una montaña, vemos que se van acumulando lentamente, pero de golpe se descargan en una avalancha. Esto explica cómo el sistema relaja la energía acumulada y luego queda inactivo por un tiempo más o menos largo, hasta que empieza a acumularse nuevamente. Esta dinámica de reposos interrumpidos por "avalanchas" de actividad se ve también en el cerebro, en la interacción de peces, en el mercado bursátil, en las sociedades, etc. Todos los fenómenos que llamamos emergentes son conductas comunes, universales, que ocurren en todos estos sistemas complejos. Cabe aclarar que esto únicamente ocurre cuando los sistemas son muy grandes, tienen muchas partes y éstas tienen reglas de comportamiento no lineal. Es decir que, cada una de ellas se comporta como nosotros: "tenemos paciencia, tenemos paciencia y después explotamos". Esta es una regla no li-

neal. Entonces, esa universalidad no es solamente cualitativa, sino también cuantitativa.

REB- Ud. fue aplicando este enfoque a varios temas, como por ejemplo los sistemas neuronales ¿Podría explicar en qué consiste esta línea de investigación?

Para ubicar dónde estamos parados quienes trabajamos en estos temas es útil reconstruir el siguiente panorama. Hay cientos de miles de investigadores que estudian el sistema nervioso. Para dar una cifra orientadora, la reunión anual de la Sociedad de Neurociencia en EEUU convoca entre 30 y 40 mil investigadores, por lo cual, una cifra de 100 mil investigadores del cerebro es un número razonable. De esos cien mil, un 90% estudia aspectos específicos del cerebro, es decir que, figurativamente, se dedica a entender las propiedades de "cada ladrillo del edificio". El 10 % restante (unos diez mil) tiene como interés integrar ese conocimiento, es decir "poner cada ladrillo en su lugar y mirar el edificio completo". Siguiendo con la idea, de esos 1000 restantes, no más de 100 compartimos el interés de poner todas esas partes juntas usando las herramientas de sistemas complejos. Debe haber unos 100 investigadores que están trabajando en aplicar sistemas complejos al tema de cómo trabaja el cerebro.

El avance en el estudio de los sistemas complejos ha devenido como consecuencia de una sinergia de resultados dentro de la biología, la matemática y la física, por el advenimiento y el uso de recursos computacionales. Esto es importante, pues, los sistemas no lineales no se pueden analizar matemáticamente del mismo modo que los sistemas lineales. En estos últimos, como ya dijimos, las reglas son las mismas todo el tiempo y entonces uno puede resolverlos "en el pizarrón", por decir que uno resuelve las ecuaciones haciendo uso de las herramientas del análisis matemático. En los no lineales, en cambio, uno está limitado a hacer simulaciones numéricas en la computadora, usando modelos matemáticos que simulan todas aquellas operaciones que no se pueden resolver analíticamente. Entonces con la ayuda de una computadora, se puede escribir un programa, poner en él todas las partes fundamentales del problema que nos interesa. Al correrlo,

siguiendo con nuestra metáfora, es posible “armar la bicicleta” y observar, bajo muchas condiciones diferentes, el funcionamiento de estos sistemas.

REB- ¿Cómo operan estos modelos?

Los modelos matemáticos tienen larga tradición científica. Son ecuaciones matemáticas que especifican como será el futuro estado del sistema tomando en cuenta lo que conocemos del presente (y a veces del pasado). Para decirlo en términos sencillos, un modelo de este tipo repite los mismos pasos tantas veces como tiempo necesitemos explorar. En cada paso, el futuro estado es igual al presente más lo que digan las ecuaciones usando el presente. Ese estado futuro se lo usa, en el próximo paso, como el presente y así sucesivamente. Si quisiésemos, podemos “rebobinar” el tiempo, volver hacia atrás, cambiar alguna condición del inicio, computar nuevamente la evolución futura del sistema y comparar. Todas éstas, son operaciones que no podemos hacer tan sencillamente en experimentos... Algunos se pueden calcular manualmente, a éstos los llamamos “modelos de escritorio”, mientras que otros cuentan con el aporte de la computación que posibilita simular sistemas muy grandes. En todos los casos, se especifican matemáticamente cada una de las muchas variables del sistema X, Y, Z, etc.; se especifica si el comportamiento es lineal o no lineal; y cómo y con qué fuerza estas variables interaccionarán.

Cuando uno hace ese tipo de simulaciones, lo interesante es que aparecen resultados que desafían nuestra intuición. Los sistemas complejos nos sorprenden ya que nuestra intuición está preparada para ver cosas uniformes, relativamente homogéneas, regulares. Como científicos, influenciados por nuestra formación temprana en estadística, estamos juzgando permanentemente todo lo que se mueve alrededor como cosas que fluctúan alrededor de un valor central. Por ejemplo, si hablamos de la estatura promedio de las personas, vemos que esos valores se distribuyen (siguiendo la típica campana Gaussiana) muy apretados alrededor de un valor central, lo cual no sólo es confuso, sino que imposibilita observar cómo opera el fenómeno real. Esta presunción de uniformidad, también se extiende al lego que supone (e

interpreta) que todo lo que nos “sorprende” es excepcional, pues la “regla” es lo común. Es de esperar que, por ejemplo, las catástrofes, o las avalanchas, o las inundaciones, o las revoluciones, sean vistas como “accidentes”, y nunca como un evento natural intrínseco en una dinámica compleja. Es obvio, aunque ignorado, que la naturaleza es mucho más no-uniforme e irregular de lo que suponemos. Ejemplos abundan: si miramos el número de gajos que cada rama de un árbol produce, veremos muchas ramas con pocos gajos y pocas con muchos gajos, con valores intermedios, pero nunca una distribución homogénea. Lo mismo se aplica si miramos la geometría de los bronquios pulmonares, o la circulación coronaria. Si observamos por una ventana, vemos que hablar del tamaño promedio de las nubes, no tiene sentido, pues, nuevamente, advertimos que hay muchas nubes de sólo metros y unas muy pocas que abarcan decenas de kilómetros. El universo es no uniforme y eso ha dado lugar a intensos debates entre los cosmólogos. Donde vemos uniformidad en la naturaleza tenemos que aceptar que esto solamente es posible en sistemas donde todas sus partes son lineales y/o no interactúan entre ellas. Mientras que, en la gran mayoría, desde escalas de milímetros, al tamaño del universo, vemos que la uniformidad domina. Parece ser que la regla de lo “natural”, es que “hay muchos que no tienen nada, algunos menos que tienen más, unos pocos que tienen mucho y uno solo que tiene muchísimo...” al igual que en la distribución de los ingresos de la economía.

Por ello, se pretende construir una teoría de la “no uniformidad”, como la llamo. Los esfuerzos teóricos en el área de sistemas complejos están dedicados a explicar la abundancia de esta no-uniformidad que vemos en la naturaleza. Explicar significa poder encontrar tipos de modelos matemáticos que, sin contener complejidad en sus partes constituyentes, generen la complejidad y la diversidad de la naturaleza. Como ya dijimos, debemos trascender lo que nos dice la “campanita de Gauss”, que hay un valor medio, y algunos valores un poquito a la izquierda y a la derecha. Eso, sirve muy bien para explicar lo que es simple y que ya está explicado, en suma, lo que es uniforme. Pero lo que no está explicado, lo más interesante y desafiante: la economía, las catástrofes, las ava-

lanchas, la extinción de las especies, el cerebro, la memoria colectiva, la política, la organización de las comunidades, son no uniformes y requieren de una teoría para la no uniformidad. Esto es lo que estamos construyendo.

REB- ¿Este abordaje tiene algún anclaje en lo que se denomina “el paradigma de la complejidad”?

El paradigma de la complejidad no existe, es un mote. De cualquier manera, la teoría de los sistemas complejos es una construcción que se puede definir como sistemas con una estructura compuesta de varias partes, cada una no lineal, que, cuando evoluciona, produce esa no uniformidad de la que venimos hablando. Cuando hacemos modelos, para reproducir esto, vemos que lo que emerge no es tanto función de los detalles de las partes como de esa estructura. Si eso es un paradigma, o no, no sé. Yo prefiero no ponerle el mote de “paradigma”. El paradigma es algo transitorio, algo que está hecho para destruirlo, y así suele avanzar la ciencia. En mi observación, la ciencia no avanza tanto por que nazca un genio, sino porque se muera otro y nos permita movernos más allá de su contribución genial. Mi amigo Per Bak, un gran físico danés ya fallecido, solía decir con el mismo espíritu, que la ciencia progresaba, no paso a paso, sino “Muerto tras Muerto”. Parece ser, que siempre hay que esperar que algo se muera para que algo avance. El tema de centrar la discusión en los paradigmas es una cuestión, que en mi opinión, crea más problemas que beneficios.

La teoría de los sistemas complejos es una teoría que tiene una construcción concreta destinada a explicar la no uniformidad, la variabilidad, la tremenda hermosura que hay en la naturaleza. Cuando digo naturaleza digo todo, la viva y la no viva; las nubes, el clima, el calentamiento del planeta, el tsunami, etc. La naturaleza en su totalidad es una cosa extremadamente no aburrida, llena de sorpresas y de catástrofes. Entonces, lo que la teoría de sistemas complejos hace, es construir un argumento teórico para decir cómo a través de ejes simples, eso se genera. Hay ejemplos numerosos que muestran, en los últimos 20 años, que para reconstruir esa diversidad, esa complejidad, no hace falta “poner en la receta” ingredientes comple-

jos. Es suficiente considerar muchas partes con leyes dinámicas simples que interactúen no linealmente con energía de afuera, lo cual produce algo que emerge de la interacción y que tiene el sabor, el color, la calidad y las cualidades de lo que vemos en la naturaleza. Hay modelos específicos para cada cosa, pero lo unificador es que todos comparten aspectos básicos. De la misma manera que las leyes de la gravedad no se describen para cada objeto que cae, tampoco hace falta construir una teoría diferente para cada sistema complejo, eso es lo específico. Todo indica que hay esperanzas de lograr una teoría genérica para estos sistemas, pues aunque la complejidad puede tener una expresión, una cara diferente, parece originarse del mismo modo básico en muchos sistemas.

REB- ¿Cuál sería la efectividad de la representación que hacen estos modelos de una realidad tan diversa que va desde el cerebro hasta las leyes del mercado?

Por ejemplo, que ayude a explicar que las catástrofes no son una cosa desafortunada. Desde la visión que ofrezco las catástrofes son una cosa inevitable embebida (y no “excepcional”) en las fluctuaciones intrínsecas de un sistema complejo. Las catástrofes se desatan por una causalidad (y no por casualidad), son una parte de la forma en que los sistemas complejos descargan energía, se relajan. Como las avalanchas de nieve, que se desencadenan, disminuyendo energías que luego se vuelven a acumular. Pero las avalanchas son inevitables, de la misma manera que los “crashes del stock market” o caídas de la bolsa, no se pueden evitar. Es ingenuo pretender tener volatilidad en el mercado y no tener caídas, del mismo modo que no se puede pretender tener pendientes de montañas muy llenas de nieve y no tener avalanchas, una cosa trae la otra.

Las catástrofes, avalanchas, caídas del tipo de la bolsa, son en los sistemas complejos una propiedad intrínseca, no se puede tener complejidad sin tener catástrofes. Las inundaciones no son un aspecto indeseable en el flujo de los ríos, son un efecto absolutamente inevitable. Tarde o temprano el sistema acumulará y descargará agua en una forma que sorprenderá nuestras expectativas regulares. Uno puede probar matemáticamente que no importa cuán alta sea la defensa para la

inundación, está la probabilidad no-cero de que existan inundaciones más altas que esa barrera. Esto se sabe desde hace medio siglo al menos cuando el hidrólogo Hurst quiso estimar la altura óptima de un dique para el río Nilo, considerando que si la altura era muy alta se iban a desperdiciar recursos y si era muy baja, habría rebalsamientos. Para ello analizó datos de la altura del Nilo de los últimos mil años y encontró, muy sorprendido, que el resultado de sus cálculos difería según usase datos de cada año, o de cada 10, o de cada 100 años. Notaba que el valor entre el nivel más alto del río y el más bajo, se incrementaba, frustrando su plan de optimizar el diseño del dique. ¿Cómo puede ser? Es tradicional pensar que cuantos más datos se tiene, la variabilidad se reduce. La respuesta es clara: esta ley es sólo cierta para los sistemas simples que varían alrededor de una media. Pero, para las cuestiones de la naturaleza, incluyendo la altura de los ríos, cuantos más datos se tienen, más grande es la variación. La observación de Hurst indicando que el rango variaba con el tiempo ya trascendió la hidrología y otras similares se hicieron en muchas disciplinas.

Esos conceptos, sirven para entender cómo la naturaleza funciona y, por tanto, para hacer predicciones para no tratar de manipularla inocentemente, y entender y sobrevivir a las catástrofes. Por ejemplo, que las extinciones no son necesariamente el resultado de un elemento externo, que un ecosistema posee tremendas fluctuaciones internas que incluyen extinciones masivas de especies que co-evolucionan. También sirve para observar que puede haber enfermedades (llamadas "dinámicas") que no son producto de una causa externa, sino el resultado de fluctuaciones, de interacciones, que llevan al sistema a un lugar en donde uno lo ve como una catástrofe. Entender esto cuesta, porque en nuestra cultura científica predomina la tendencia de sostener que, cada catástrofe tiene un culpable. De la misma manera fue difícil para Galileo y Newton, transmitir la idea de que las leyes de movimiento de un péndulo, y la de los cuerpos celestiales, eran las mismas. Imaginemos lo herético que fue analogar un péndulo al balance divino de los planetas...

Por tanto, la posibilidad de escribir ecuaciones de sistemas complejos ofrecerá una explicación para entender prácticamente el 90 % de las co-

sas de la naturaleza que hoy no podemos explicar. Este es el futuro de los estudios de los sistemas complejos.

REB- ¿Entre los objetivos de sus investigaciones se encuentran los de aplicar estos sistemas complejos para realizar alguna intervención en la realidad?

Mentiría si digo que sí. Trabajo para divertirme, las cosas que estudio las estudio porque me fascinan y atrapan mi curiosidad. Creo que eso nos pasa a todos los que nos dedicamos a la ciencia. Las aplicaciones surgen a medida que uno va trabajando y descubre donde aplicar las ideas para entender algo nuevo, pero se elige, cuando se puede, en función de lo que le fascina a uno y a los colegas con quienes discute.

En cuanto a que, si lo que hago es ciencia básica o aplicada, puedo decir que, por un lado, la teoría de sistemas complejos está motivada por entender la naturaleza y eso no es una abstracción. Uno quiere entender por qué hay terremotos cuando los hay, inundaciones, fuegos forestales, etc. que son cosas concretas. Si uno entiende, aunque más no sea una parte, ya es un avance. Si la pregunta es si lo que hacemos termina en alguna utilidad o qué tengo en mente yo. La respuesta es: "siempre hacer cosas que me diviertan pero en el sentido responsable, creativo, como a un artista le divierte pintar, ¿o no?"

REB- Concretamente, la pregunta apuntaba hacia su línea de investigación sobre los sistemas neuronales del cerebro.

Esto forma parte de lo que denomino el proyecto "Brainome". Esta palabra, en analogía con "genome" se traduciría "Cerebronoma". Así como el genoma describe el genotipo, el "fenoma" describiría el fenotipo, que es lo que se puede expresar con esos genes. En el cerebro, hacemos la analogía de que lo que uno tiene por "fuera", la conducta humana, es el fenotipo o la expresión de la actividad cerebral. El proyecto "Brainome" busca identificar las áreas cerebrales que "se prenden y apagan" para producir las conductas. Cada conducta tiene como correlato una colección de áreas que se prenden y otras que se apagan y que "expresan" una dada conducta.

Desde el punto de vista de los sistemas complejos, la pregunta sería ¿Podemos hacer un mapa de todas las conductas y de todos los 0 (áreas inactivas) y 1 (áreas activas) que tenemos en el cerebro? En principio, para ello, uno tiene que ser capaz de mapear todas las áreas que tenemos en el cerebro (no más de 100) durante unas 500 conductas. En principio, ya contamos con la tecnología que nos permite hacerlo a través de experimentos que exponen a un individuo durante diversas conductas en un aparato de resonancia magnética. Sabemos que las conductas no son objetivas al observador, son propias al individuo, aunque se pueden reducir a una lista de 500. Si yo digo: “piensa en algo triste”, es una cosa subjetiva, aunque por el scanner voy a observar que el área pre-frontal del cerebro se activa, y así sucesivamente. Luego le pregunto al individuo qué le produjo esa conducta, y le puedo poner la etiqueta “lo que hice produjo esa conducta”. Es decir que, de alguna manera, en muchos casos, la tecnología nos permite de-mitificar la subjetividad. Completar este brainome, sería “tener la firma” de qué es lo que está produciendo esa conducta, y evitar preguntas ambiguas como ¿Por qué tiene esa conducta?, ¿Qué es lo que lo llevó a pensar en esto? Podemos avanzar en el conocimiento de cómo funcionan las redes que tiene el cerebro y saber con cuáles escenarios nos vamos a enfrentar, puesto que el cerebro se auto-organiza del mismo modo que otros sistemas complejos. Cuando dos áreas corticales compiten para producir una determinada conducta, en cierta forma, se están comportando del mismo modo que poblaciones de presa y predador lo hacen en un ecosistema y manifiestan los mismos fenómenos dinámicos de frustración, equilibrio, estabilidad, etc. Estudiar el cerebro desde esta perspectiva de sistemas complejos es muy ventajoso en el sentido de que no estamos embarcándonos en una expedición para observar “qué es lo que vamos a pescar”, sino detrás de escenarios dinámicos que ya conocemos por nuestra experiencia previa en otros sistemas complejos.

En Mallorca, específicamente en la Facultad de Psicología de la Universidad de las Islas Baleares, en colaboración con el Departamento de Física, estamos llevando a cabo un proyecto apoyado por el gobierno español, en donde ya demostramos que en el cerebro existen redes

complejas que se pueden mapear, que existe esa no-uniformidad de la cual hablamos antes, en la que hay muy pocas áreas conectadas con todo y muchas que están conectadas con pocas. En el caso del cerebro, estamos detrás de establecer líneas de trabajo que nos lleven, concretamente, a tener un mapa para poder decir, por lo menos para ciertas conductas normales, quizás algunas anormales, cuáles son las áreas que participan de las redes complejas que producen cualquier conducta relevante.

REB- ¿Cómo es el contexto del experimento?

Es fijo. Ponemos un individuo dentro del scanner de resonancia magnética y le damos un mismo contexto. Si uno hace experimentos “a la física”, es decir que se pueda medir y reproducir las cosas, no hay ningún problema en hacerlo con el cerebro. La contribución de la física ha sido formalizar el modo de hacer ciencia empírica, de Galileo para nuestros tiempos se ha popularizado para todas las ciencias esa posibilidad de repetir el experimento y poder determinar qué es lo relevante, qué es lo que hay que medir y lo que hay que reproducir. En el caso del cerebro no es esencialmente diferente.

REB- Se hace referencia a que si es posible considerar la influencia del scanner al cual está sometido el individuo durante el experimento.

Una de las cosas que en ciencia hacemos es formalizar un problema y enfrentarlo con el interrogante que va a abrir más interrogantes, el que contribuirá a conocer más el problema. Enfrentado con esta pregunta, la única respuesta que daría cualquier científico, es que ese interrogante no está formalizado suficientemente. Es decir, que no es útil porque no lleva a nada, la ciencia no puede ofrecer nada. Si nos convencemos a priori de que “el experimento no es igual a la situación real porque lo hicimos en un scanner”, no hubiéramos podido formalizar los interrogantes de tal manera que, a todas las sensaciones obtenidas a través del experimento, podamos reducirlas y someterlas al scanner, a fin de decir qué área del cerebro está activa en cada uno de esos instantes. A mi juicio así va avanzado la ciencia, sólo contrastando los da-

tos con más datos y las conjeturas con los datos, nunca conjeturas con conjeturas. Si nos trasladamos a Newton, o antes, un filósofo Aristotélico diría que una manzana y una piedra cayendo no es lo "mismo" ¿Cómo decir que una manzana, que se madura, cae y se pudre, tiene las mismas leyes de movimiento que una piedra? Podría, el filósofo, insistir diciendo que eso no describe nada sobre la hermosura del color rojo de la manzana, y nada dice de la "unanimidad" de la piedra, por decir algo... Desde el punto de vista científico, sin embargo, esto es una pérdida de tiempo. La consecuencia de los esfuerzos teóricos de Newton, nos hizo avanzar a tal punto que todo lo que hacemos se deriva de esa visión del mundo, a tal punto que nos permite grabar lo que estás grabando, escribir lo que estás escribiendo, y distinguir lo que es un sistema formal de lo que no lo es. Aún siendo un gran desafío el estudio del cerebro, no he visto ningún problema en aplicar este abordaje y sostengo que la subjetividad y el contexto son cosas que se pueden tratar perfectamente. Como ejemplo, hoy se hacen experimentos en un scanner de resonancia magnética con dos individuos jugando con un *video game* a miles de kilómetros de distancia conectados a través de Internet. Se puede describir qué áreas del cerebro se activan cuando uno de los individuos pierde y pierde sistemáticamente con otro que está jugando en contra en el otro scanner. ¿Esta conducta sería igual si estuviese jugando con el otro individuo ubicado enfrente y fuera del scanner? Los datos indican que son tan iguales como lo fuese analizar los resultados de la caída de una manzana y la de una piedra...

Existe un mito en el estudio del cerebro, y en la biología en general, que dice que la complejidad del cerebro es tal, que no se pueden hacer descripciones cuantitativas o modelos matemáticos porque dentro de lo biológico-cerebral existe toda esa cualitatividad, esa subjetividad, esa complejidad que no se puede cuantificar, por lo tanto, no es posible la aplicación de modelos y descripciones matemáticos. Sin embargo, muchos investigadores están de acuerdo en decir que, si esa complejidad, esa sofisticación que vemos en la biología fuese a originarse en un sistema físico, todo el mundo avalaría la idea de medir, simular todo y hacer un tratamiento cuantitativo muy riguroso. Entonces por

un lado, tenemos la misma complejidad en la biología del cerebro que en objetos físicos, pero para estos últimos medimos, ponemos mil sensores, sacamos miles de fotos, tomamos muestras y hacemos modelos matemáticos. Mientras que, por el otro lado, tenemos un objeto biológico como el cerebro, con el mismo nivel de complejidad, pero al cual, sin embargo, se pretende tratar como si fuera una obra de arte. Muchos trabajos muestran que este mito está muerto y que el cerebro humano se puede estudiar provechosamente a través de la construcción de teorías de sistemas complejos que no van a ser fácilmente destruidas.

REB- ¿Lo inesperado se considera también una variable en un sistema complejo?

Soy un científico con limitaciones, aunque acepto que vivimos en un mundo de causalidad que todavía es lo único que nos ayuda a definir todas estas cosas. Lo inesperado no existe, puede ser todo lo que se aleja de nuestra visión uniforme de la naturaleza. Desde la ciencia no se pueden tener pensamientos mágicos, todo tiene que tener una causa. No se puede hacer consultoría sentimental. Por ejemplo, cuando hay avalanchas uno enseguida lo atribuye a un culpable, y la avalancha es una situación intrínseca al sistema. Atribuir cosas extraordinarias a un efecto externo, cuando no conocemos todo sobre el sistema es una forma común de pensar y es lo que conocemos como pensamiento mágico. Desde esa forma de operar, la magia es inesperada, lo inesperado puede ser una catástrofe, y lo que no entendemos de la conducta se lo adjudicamos al libre albedrío.

La otra postura común en estos temas, es adoptar la postura del historiador que después que pasó encuentra un responsable, entonces dice: "la Primera Guerra Mundial ocurrió porque alguien agarró una pistola, apuntó y le pego un tiro a un archiduque". No, sabemos que aunque no sucediera esto, algo extraordinario pasaba lo mismo después de 5 años por algún otro motivo. Es lo mismo que decir, tomando el ejemplo de la avalancha, que toda la nieve acumulada se desmorona por la acción de un pájaro volando que se posa en sobre un granito de nieve. Desde los sistemas complejos sostenemos que la avalancha tiene un proceso de inestabilidad y hay momentos en que la energía se acumula y

tiene que disiparse, aunque luego se vuelva a acumular.

REB- ¿Es posible entablar alguna relación entre la teoría de los sistemas complejos y la teoría del caos?

Empezó allí, la teoría del caos contribuyó a enfatizar; primero que para poder entender cosas complicadas, caóticas, no hacía falta modelos muy complicados, sino, muy sencillos; segundo, que éstos son no lineales puesto que es posible que de golpe cambien las reglas, produciendo el caos. Ahora bien, el caos fue una falsa esperanza, en el sentido que nos enseñó mucho pero no aportó a la explicación de la complejidad de la naturaleza. El caos pone énfasis en la no linealidad, pero no en la cantidad de elementos interactuando, postulando que unos pocos elementos pudiesen producir esa complejidad, un solo granito de arena, un solo pajarito, un solo agente de bolsa, etc. La teoría de sistemas complejos, pone énfasis en la cantidad de elementos así como en la no linealidad. El sistema complejo tiene muchos elementos y son no lineales, y el caos es producido por unos pocos elementos (con dos es suficiente) no lineales.

REB- ¿Esto expresa la propiedad dinámica de un sistema?

La dinámica se dice que es no lineal cuando la regla que la gobierna cambia con el valor de la variable, es decir, si en una conversación tú aceptas lo que yo digo sin inmutarte, pero más tarde no lo aceptas y explotas. Tú has cambiado las reglas, y éstas dependen del momento en que yo te diga algo o del contexto, entonces esa regla es no lineal y la dinámica que se produce también es no lineal. Obviamente todos estos sistemas de los cuales estamos hablando son dinámicos, los sistemas complejos son dinámicos porque evolucionan en el tiempo.

Cuando los sistemas que estudiamos tienen muy pocas piezas y son lineales, se pueden demostrar formalmente las cosas, es decir escribir teoremas y mostrar matemáticamente lo que es cierto y lo que no es cierto. Pero si se empieza a aumentar la no linealidad se encuentra con el caos, que también es determinístico, todo está determinado pero al haber no linealidad, las cosas van cambiando más rápidamente

que la predicción. Cuando uno tiene muchas, muchas piezas pero lineales, alcanzamos lo que se llaman procesos aleatorios, sistemas uniformes o complicados, pero no complejos. Hay diferentes definiciones de lo que es un sistema complejo versus uno complicado. Los sistemas complicados generalmente son producto del diseño, una computadora, un auto, etc. y están compuestos por piezas lineales, mientras que los complejos, como el cerebro, son no lineales y están manufacturados procesos de auto-organización. Generalmente éstos no tienen un propósito, no hay una definición teleológica “de que el cerebro quiera hacer tal cosa”, lo que nos permite es sobrevivir como individuos. Mientras que un auto tiene un propósito, su finalidad está definida y se dirige hacia ella. Para que sean complejos, no uniformes (tienen muchas formas), los sistemas deben tener muchas piezas y, a su vez, ser no lineales. Y allí tenemos pilas de arena, cerebros, hormigueros, muchos péndulos, etc.

REB- ¿Cómo se explica a través del concepto de red, la dinámica de las redes neuronales y los estados de conciencia?

Veamos a las redes complejas como el esqueleto de un sistema complejo. Si tenemos un sistema complejo, existe un esqueleto por donde pasa realmente la actividad. Por ejemplo, uno puede tomar un sistema complejo como la ciudad como Bs. As. Para entender todos los funcionamientos dinámicos; los embotellamientos de tráfico, los piqueteros, etc., digamos toda la dinámica compleja de una ciudad en un día típico, uno podría mirar y relevar todo, medir los colectivos, los taxis, la humedad, la temperatura, los peatones, etc. Pero si uno es un pasajero, lo único que le interesa es conocer las redes de subterráneos y los trenes, el mapa. Las redes están compuestas de nodos conectados por lazos y lo que importa es cómo los nodos se conectan conformando un mapa. Entonces cuando se hacen modelos y simulaciones de teorías para entender un sistema complejo, a veces nos quedamos con el esqueleto. Miramos que pasa en esos nodos - “en esa red de huesos”- porque nos interesa describirlos desde ese punto de vista. En el cerebro, por ejemplo, no prestamos atención necesariamente a todos sus detalles, sólo a aquellas áreas que están activadas y a cómo se conectan entre sí, a los 0 y 1. Esa sería

la visión de mirar el sistema complejo como una red compleja.

Por otra parte, se ha visto que hay muchas cosas que se pueden aprender de cómo se auto-organizan las redes complejas, un ejemplo puede ser Internet. En este sentido, se han hecho aproximaciones muy interesantes con el mundo biológico, por ejemplo, ayudan a entender las redes metabólicas con su interacción de proteínas y ciclos metabólicos dentro de una célula, entender cómo los subproductos y las enzimas cooperan entre ellas. Existe mucho interés en biología en torno al concepto de redes complejas. Dentro de una célula, el sistema complejo es el mundo en miniatura con todas esas miles de reacciones constantemente interrelacionadas entre sí. Las mismas se están auto-organizando, compitiendo, y auto-catalizando entre ellas. Ese es un sub-mundo que, por más pequeño que sea, también es un sistema complejo, según lo que definimos antes.

Retomando el caso del cerebro y específicamente el del estudio de la conciencia, tenemos que el cerebro se estudia atendiendo al número de conexiones que se observan cuando se ingresa a un individuo al scanner y se determinan cuáles son las conexiones dinámicas que generan imágenes a través de las cuales se computa qué área está interactuando con cual otra, y se construye un mapa. Con este tipo de técnicas estudiamos cuáles se activan en determinados estados de conciencia y cuáles se van desactivando a medida que uno va perdiendo la conciencia. Se quiere entender efectivamente qué es el estado conciente, qué es la conciencia. Aunque existen muchas definiciones, lo que nos interesa es una definición auto-consciente de lo que medimos. La conciencia es la capacidad de integración del sistema talamo-cortical, que se expresa como un estado de integración de respuesta coordinada, un funcionamiento integrado del yo. La inconsciencia, en contrapartida, es la pérdida de esa capacidad como cuando estamos bajo anestesia general y se apaga la actividad eléctrica cerebral. En este estado, no existimos, no sentimos el dolor, no tenemos memoria de haber pasado por él, lo único que recordamos es entrar y salir. Lo que llamamos subconsciencia, es solamente una declaración de nuestra ignorancia para poder decir qué áreas están en activadas o inactivadas (en ceros

o en unos) cuando no hay ningún reporte en primera persona. Pero podemos hacer un reporte en tercera persona si, con técnicas de resonancia magnética y “leyendo” el cerebro, podemos decir: “él está en ese estado”, y por lo tanto, ese es un estado que el individuo considera subconsciente. De modo que, el desafío en esta área es poder medir cómo se pierde la conciencia, qué hace falta para mantener la conciencia, etc.

Este es un tema muy interesante. Precisamente vengo de un taller en Vancouver, donde éramos una docena de filósofos y otra de científicos del área biológica y unos pocos de sistemas complejos que nos hacíamos la misma pregunta: ¿Qué es conciencia? Próximamente estaré en París en la continuación de este taller donde el debate se ampliará de acuerdo a los interrogantes: ¿Cómo cuantificar la conciencia? ¿Podemos o estamos capacitados con la tecnología, y con los conocimientos de cómo funciona el cerebro, para formalizar el problema de lo qué es la conciencia? Yo y otra gente decimos que sí. Haciendo uso de la historia de física -que es la madre de todas las ciencias, por lo menos de las ciencias empíricas- podemos decir que, en este tema, estamos más o menos como la termodinámica antes de haber definido lo que es calor. Sabemos que antes de definir lo que hoy conocemos como temperatura, el calor era una cosa muy ambigua. Frotarse las manos producía la misma sensación de calor que tener fiebre o muy similar a la sensación quemante del hielo. Imaginemos las discusiones en la era “pre-termómetro” y tendremos un panorama cercano a lo que las discusiones de estos talleres parecen. Hoy, conciencia, inconsciencia, subconsciencia “son más o menos como calor”, porque no tenemos un parámetro para medir cuán consciente algo es. En este sentido, existen propuestas -unas más interesantes que otras- que postulan que un buen eje para medir la conciencia puede ser el análogo de la temperatura en un diagrama de fase de la materia, la cual pasa de gas a líquido o a sólido dependiendo de la temperatura y la presión. Giulio Tononi ha postulado recientemente un parámetro que permite definir y medir la conciencia experimentalmente en humanos, pero quizás necesitemos complementarlo con otros, tal que, como en el ejemplo de la materia, nos permita caracterizar las distintas fases con claridad.

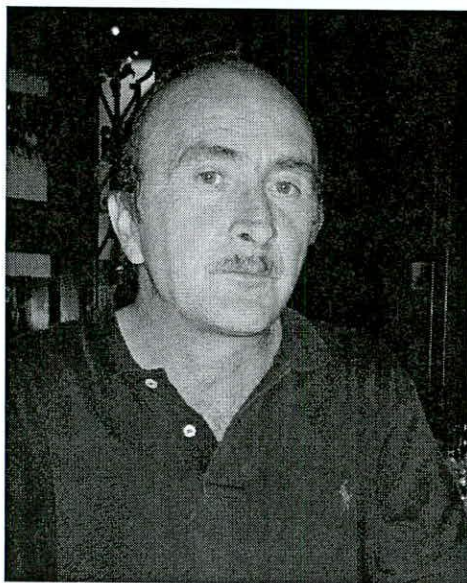
Con estos parámetros es posible definir fases; fase de desconexión como los estados desconectados; la esquizofrenia, las enfermedades mentales, etc.; unos estados más similares a un sólido como la epilepsia, o bien estados ante los cuales el cerebro reacciona en masa; los estados de flujo de información más líquidos, y un estado crítico. Los seres humanos salimos y entramos permanentemente de uno y otras fases, tenemos estados creativos, estados de aburrimiento, etc. Y desde la perspectiva de los sistemas complejos, esto va a poder medirse. Haciendo la analogía con las fases de la materia, podríamos medir los parámetros equivalentes a la temperatura y la presión, asignarle valores y decir cuándo un individuo está en determinado estado (consciente, inconsciente, etc.). Algunos opinan que esto podría ser muy útil en medicina para mejorar la evaluación de la fase anestésica que hoy sólo puede guiarse por la cantidad de anestesia que se le suministró al paciente. Y las estadísticas dicen que en una en mil circunstancias, éste se pudo haber quedado despierto, no estuvo inconsciente. No se pudo mover, no le dolió, pero recuerda escenas durante la operación. Es necesario remarcar que estos intentos de definir y medir la conciencia no son de ciencia ficción, son horizontes que vamos a alcanzar, y a partir de los cuales vamos delineando estrategias y enfoques desde diferentes disciplinas incluyendo el estudio de los sistemas complejos.

En este sentido, hay cosas aún más fascinantes que discutimos en el citado taller de conciencia devenido en Vancouver donde también participaba un escritor de ciencia-ficción interesado en conocer qué podíamos aportar en la materia. Entonces, le recordé que no hacía falta pensar en ciencia-ficción. Sólo tenemos que atisbar el desafío más importante que la ciencia tiene para la humanidad en los próximos diez mil años. Uno de ellos, podría considerar que la humanidad deberá irse del planeta puesto que éste se

enfriará. Entonces la pregunta sería ¿Qué hacemos para que la especie humana se preserve? Primero tratar de no matarnos entre nosotros antes de poder encontrar la forma de irnos, luego encontrar la tecnología que nos lo permita, y finalmente, decidir cómo hacer para sobrevivir al viaje. Aquí aparece, si se quiere, el escenario de la ciencia-ficción ¿Vamos a poder estar años en viaje consumiendo energía en el estado consciente? ¿No sería mejor pasar al estado inconsciente? ¿Olvidar la horrible experiencia de estar en el mismo lugar, en la misma nave, con la misma gente? ¿Podremos reproducirnos durante el viaje, sabemos si la fecundación, el desarrollo del embrión, etc. van a funcionar fuera de la gravedad? ¿Sabemos si el cerebro se va a organizar de igual manera viajando por galaxias que tienen diferentes radiaciones, fuerzas gravitacionales, etc., etc.? Todas estas tremendas incógnitas necesitan resolución. Sin embargo, aún si resolvemos cómo viajar, enviar a alguien con el cerebro que tiene sería fundamental porque si no ¿Cómo mantener en el tiempo la cultura del conocimiento? Quizás sería mejor que el viaje lo intenten unos cuantos genios, un arca de Noé pero sólo de humanos, pero tal vez convendría que estas personas viajaran inconscientes y, como en la película Matrix, poder disponerse al empezar del viaje a ciertos estados inconscientes. Algo así como: “ahora, me pasó al estado consciente 74 y después al estado inconsciente 53”. Y un buen día tu te levantas y dices: “me voy a auto-inconscientizar hasta el año 4040 pero me quiero despertar con el estado cerebral 73”. Como ciencia ficción, es interesante y a este escritor la historia le interesó.

REB- Aunque “el monstruo” que está siempre por detrás, es la manipulación...

No es un monstruo, es lo que tenemos.



Dante R. Chialvo recibió su diploma en 1982 de la Universidad Nacional de Rosario en Argentina. Desde 1982 a 1984 fue becario graduado en el Instituto Superior de Investigaciones Biológicas de Tucumán (Argentina) y docente del departamento de Fisiología de la Universidad de Tucumán. En 1985 fue nombrado Profesor Regular Adjunto del Departamento de Fisiología de la Universidad de Rosario. Desde 1987 hasta 1992 fue Profesor asociado en la State University of New York (Syracuse) en el Departamento de Farmacología y luego en el Programa de Neurociencia Computacional. Estuvo asociado al Santa Fe Institute for the Sciences of Complexity, en Santa Fe, New México entre 1992 y 1995.

Ha sido Catedrático invitado en numerosas universidades incluyendo University of Wuerzburg (Alemania), University of Copenhagen (Dinamarca), Varsovia (Polonia), The Rockefeller University (EEUU), University of the Balearic Islands, Universidad de Barcelona, Universidad Complutense (España), Universidad de Rosario (Argentina), Universidad Favaloro (Argentina), entre otras.

Ha publicado más de 50 trabajos científicos dedicados a entender fenómenos naturales desde la óptica de los sistemas dinámicos complejos. Sus trabajos cubren un rango amplio de temas, desde el modelado matemático de las arritmias cardíacas, el estudio de motores moleculares, el código neuronal, y los fenómenos colectivos de autoorganización en comunidades de individuos, insectos sociales y el cerebro, entre otros.

Actualmente es Profesor Asociado de Fisiología en la Northwestern University de Chicago y en la Universidad de California en Los Ángeles UCLA (Los Angeles). Es además, desde 2005, Investigador Principal de Física del CONICET en Argentina. En 2005 le ha sido otorgado un Fulbright US Scholar Award y en ese contexto está dictando un curso de Postgrado en la Facultad de Matemática Astronomía y Física (FAMAF) de la Universidad de Córdoba, sobre Introducción a la Complejidad en Biología y Medicina.