

Capítulo 2

Una noción contextual de emergencia y un ejemplo en análisis de redes neuronales

Esteban Céspedes y Rubén Herzog

Resumen

¿Cómo pueden los estados emergentes de un sistema estar determinados por los elementos más básicos del mismo, pero, al mismo tiempo, ser funcionalmente irreducibles a ellos? Para abordar esta pregunta, que ha estado presente desde los primeros estudios en torno al concepto de emergencia, proponemos que los estados emergentes son reducibles e irreducibles a la vez, dependiendo de una noción contextual de emergencia. Además, según nuestra propuesta, debe haber un contexto donde la observación de un estado emergente involucre novedad y esté correlacionada con un cambio abrupto en la complejidad asociada al sistema en cuestión. Ejemplificando nuestra propuesta con el caso del modelamiento matemático de redes neuronales, consideramos como estado emergente el conjunto de patrones generado por una red. Este conjunto, en ciertos contextos, no puede ser reducido a los estados de sus partes más básicas (neuronas), mientras que, en otros, sí es reducible a sus partes más básicas y a las interacciones de a pares entre neuronas. Así, ejemplificamos una noción contextual de emergencia que permite dar cuenta de los aspectos novedosos, reducibles e irreducibles del sistema en observación.

Palabras Clave: propiedades emergentes, complejidad, irreducibilidad, redes neuronales.

1. Introducción

Las propiedades emergentes, en un sentido amplio, son propiedades que se observan en un sistema compuesto de elementos que interactúan entre sí. Un aspecto crucial de las mismas es que, a pesar de poder tener conocimiento acabado de dichos elementos, no podemos deducir a partir de ellos descripciones que involucren propiedades emergentes. La propuesta que presentamos aquí requiere de i) la noción de complejidad, asociada a la forma no trivial en la que interactuarían los elementos del sistema y ii) la noción de irreducibilidad asociada a las propiedades o estados emergentes. Utilizando la noción de reducción funcional, según la cual un estado puede ser reducido a otro estado siempre y cuando ambos tengan el mismo rol causal, nos enfrentamos al llamado desafío de consistencia: ¿Cómo pueden los estados emergentes E estar determinados por los elementos más básicos B pero, al mismo tiempo, ser irreducibles funcionalmente a ellos? Para abordar este desafío que ha estado presente desde los primeros estudios en torno al concepto de emergencia, proponemos que los estados emergentes son reducibles e irreducibles a la vez, dependiendo de una noción contextual de emergencia. Introducimos la noción de contexto epistémico, que establece un orden de relevancia de un conjunto de expresiones, con la cual definimos emergencia contextual siempre que i) haya un contexto en que E se pueda reducir a B , ii) haya un contexto donde E no se puede reducir a B y iii) haya un contexto donde la observación de E incluye novedad y está correlacionada con un cambio abrupto en la complejidad asociada a B , pudiendo asociar E y B a una misma clase de referencia. Esta definición nos lleva a recharacterizar los fenómenos y propiedades emergentes, precisando también la noción de novedad y los tipos de reducción asociados a distintos contextos. Finalmente, ejemplificando nuestra propuesta con el caso del modelamiento matemático de redes neuronales, consideramos como estado emergente el conjunto de patrones generado por una red. Este conjunto, en ciertos contextos, no puede ser reducido a los estados de sus partes más básicas (neuronas), mientras que, en otros, sí es posible reducirlo a sus partes más básicas y a las interacciones entre pares

de neuronas. Además, presentamos un contexto en el que, si las redes son muy grandes, es necesario considerar interacciones de orden superior, lo que sugeriría un rol causal descendente de los estados de nivel superior hacia los estados de las partes más básicas. En ese mismo contexto introducimos una noción de complejidad *sensu lato* que nos permitirá mostrar cómo el estado E de la red neuronal se vuelve irreducible cuando hay un cambio abrupto en la complejidad y cómo, sin embargo, cuando la complejidad no varía abruptamente, el sistema puede ser reducido fácilmente a los estados de sus componentes básicos.

2. Propiedades emergentes y algunos problemas

Las propiedades emergentes pueden ser entendidas como características de un sistema que surgen desde las partes constituyentes del mismo pero que a la vez son irreducibles a tales partes. Uno de los conceptos clásicos de propiedad emergente fue desarrollado por el filósofo británico Charles Dunbar Broad (1925), cuyas caracterizaciones podrían ser concentradas y planteadas de la siguiente manera.

2.1 Propiedad emergente. Una propiedad F de un sistema S es una propiedad emergente siempre y cuando (cf. Beckermann, 1992, p. 17):

(2.1.1) los constituyentes de S interactúen entre sí de una forma determinada,

(2.1.2) exista una ley, según la cual todos los sistemas que poseen la misma organización o estructura que S exhiben F y,

(2.1.3) ninguna descripción de F pueda ser deducida de un conocimiento acabado de las propiedades de los componentes de S .

La primera condición menciona (quizás implícitamente) que las propiedades emergentes aparecen en sistemas con cierto nivel

de complejidad, es decir, en sistemas cuyas partes interactúan de manera relevante¹. No estamos simplemente ante un montón de cosas inconexas (ver Figura 1).

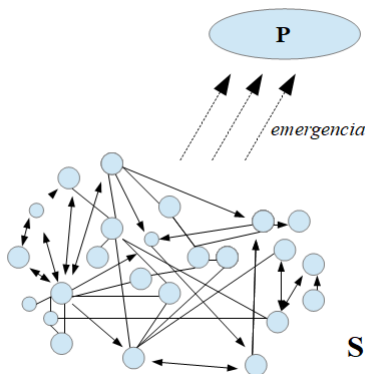


Fig. 1

Según la condición (2.1.2), existe cierta dependencia entre una propiedad emergente y las partes del sistema. Lo relevante de esta dependencia no se encuentra en las características de las partes consideradas individualmente, sino en cómo están organizadas.

Así, pensando en la tercera condición (2.1.3), decimos que no es posible deducir una descripción de la propiedad emergente en cuestión considerando únicamente las propiedades de los elementos particulares del sistema del que surge. En este sentido, ésta es una condición de irreducibilidad.

En lo que nos interesa ahora, no sólo podemos usar el término “propiedad emergente”, sino también el de “emergencia”, cuyo concepto correspondiente puede definirse (dependiendo de la definición de propiedad emergente) al menos de dos formas.

¹ Surge inmediatamente una pregunta sobre la noción de relevancia: ¿Con respecto a qué es relevante una relación de interacción? Como veremos más adelante, la noción de contexto epistémico será fundamental para responder esta pregunta. Por ejemplo, un tipo de interacción será considerada relevante, según un contexto, si es observable en ese contexto.

Podemos hablar de emergencia refiriéndonos al *proceso* en el cual aparece una propiedad emergente o bien podemos referirnos a la *relación* que existe entre las partes constituyentes de un sistema y sus propiedades emergentes. Por ejemplo, podemos decir que las propiedades de un tornado surgen como resultado de procesos que involucran moléculas de aire y de agua. En este caso, consideramos la emergencia como un proceso (o un conjunto de procesos). Alternativamente, podemos decir que las propiedades del tornado son emergentes con respecto a las propiedades de un conjunto de moléculas interactuando de formas determinadas. Aquí consideramos la emergencia como una relación.

Es necesario pensar en un problema fundamental asociado a la noción de emergencia. Aun cuando es ampliamente aceptado que tanto la irreducibilidad como la complejidad son nociones necesarias para una correcta definición del concepto de propiedad emergente, no parece haber claridad sobre cómo deberían estar relacionadas esas nociones en tal tipo de definición.

Según algunas propuestas recientes, las propiedades emergentes son propiedades que surgen en un sistema cuando su complejidad varía de forma abrupta (cf. El-Hani y Pereira, 2000). Pero, dependiendo de la idea de complejidad que adoptemos, esta condición no parece ser suficiente para entender la relación de emergencia. En principio, es posible describir un sistema considerando sólo niveles básicos y encontrar cambios abruptos en su complejidad sin mencionar las propiedades de niveles superiores que surgirían de la misma. En otras palabras, una propiedad emergente es algo que ha de ser posible observar, detectar o al menos singularizar lingüísticamente. Y en esto radica la condición de irreducibilidad.

Según una noción funcional de irreducibilidad, decimos que la eficacia causal de los estados emergentes va más allá de la eficacia causal de las partes del sistema de las cuales surgen. Esta noción puede ser definida como lo hacemos a continuación.

2.2 Reducción funcional. Un estado *A* es reducido a un estado *B* siempre y cuando el rol causal de *A* sea el mismo que el rol causal de *B* (cf. Kim, 1997).

De esta manera, la irreducibilidad de los estados emergentes puede sustentar la idea de que éstos poseen poderes causales que muestran cierta independencia de los poderes causales de las partes constituyentes del sistema². Las crisis económicas, los estados cognitivos y las extinciones ecológicas poseen efectos que no son explicables simplemente en términos de los comportamientos microeconómicos, de los procesos neuronales y de las interacciones de los miembros de un ecosistema. Un estado emergente puede tener efectos en su mismo nivel, como cuando un estado mental es causa de otro. Podemos decir que este tipo de casos son casos de *causalidad horizontal*. Un estado emergente puede también tener efectos en niveles más bajos, como cuando una crisis económica afecta el comportamiento de los consumidores. Llamamos a esto *causalidad descendente*. Además, los estados constituyentes pueden influir en niveles superiores, como cuando una decisión política desata una crisis social. Podemos clasificar estos casos como casos de *causalidad ascendente*. Una teoría apropiada sobre estados emergentes debe dar buena cuenta de estos aspectos.

El caso de la causalidad descendente es especialmente problemático en los debates sobre emergencia, como nos muestra el muy conocido argumento por exclusión (cf. Kim, 2005). Supongamos que todo evento que posee una causa, posee una causa física y que las causas físicas suficientes para explicar un evento excluyen otro tipo de causas. Además, asumamos que no hay casos genuinos de sobredeterminación causal, es decir, que si un evento E tiene una causa física suficiente C , entonces no existe otro evento diferente de c que pueda ser considerado una causa suficiente de E . Ahora bien, si es posible considerar que un estado emergente E es causa de otro estado macro E^* , entonces E debería ser capaz de determinar causalmente también los estados que fundamentan E^* desde un nivel inferior. Pero esto choca con la primera de las asunciones mencionadas: Dichos estados inferiores estarían determinados

² Por ahora, nos centramos sólo en la idea de reducción funcional, ya que creemos que no está sujeta a tantos supuestos metafísicos como otras, que consideraremos brevemente más adelante.

tanto por E como por los estados que fundamentan E . Así, manteniendo los supuestos planteados, el estado emergente E parece no tener eficacia causal descendente.

Tenemos, considerando lo brevemente expuesto hasta aquí, dos problemas principales asociados a la caracterización de los estados emergentes (cf. Kim, 2006). Primero, es preciso aclarar en qué sentido los estados emergentes son irreducibles. Segundo, pensando que podemos optar por la irreducibilidad funcional, es preciso aclarar en qué sentido poseen eficacia causal. Estas cuestiones implican lo que podemos llamar el desafío de consistencia (cf. Sartenaer, 2016).

2.3 Desafío de consistencia. Es difícil comprender cómo los estados emergentes están determinados por los elementos básicos del sistema en el que surgen y, al mismo tiempo, son irreducibles a ellos.

Creemos que éste es un desafío fundamental que ha estado presente desde los primeros estudios en torno a la noción de estado emergente y que, probablemente, expresa un intento de responder a los principales obstáculos que han impedido un desarrollo serio de esta noción. El desafío de consistencia nos mueve, junto con los problemas mencionados arriba, a proponer aquí una caracterización con la que podríamos intentar abordarlo satisfactoriamente. Según nuestra propuesta, los estados emergentes son reducibles e irreducibles a la vez. Por supuesto, esto es contradictorio en un primer momento. Debemos reformular esta caracterización gruesa con el fin de poder incluirla en una teoría coherente.

3. Emergencia contextual

Para disolver la aparente contradicción señalada en 2.3, acudiremos a la noción de contexto. Así, podremos decir que un estado emergente es reducible e irreducible a la vez, pero bajo distintos respectos. Diremos que un contexto es un conjunto de expresiones en función de las cuales podemos evaluar enunciados acerca de estados emergentes. No queremos decir que en un contexto deben

estar descritas todas las condiciones objetivas que servirían para describir un estado emergente. En principio, sólo considerar las condiciones conocidas en un determinado momento de una investigación bastará para nuestros intereses. Así, nos enfocaremos en lo que podemos llamar *contextos epistémicos*. No queremos tomar en cuenta sólo el conjunto de expresiones epistémicas asociadas a un periodo dado de una investigación. Según la noción comprendida aquí, cada contexto lleva consigo, además de sus elementos epistémicos, un ordenamiento de relevancia funcionando sobre cada uno de ellos. En este sentido, un contexto es más que un conjunto de expresiones: Es un conjunto de expresiones ordenadas por relevancia.

Debemos notar que hablamos de expresiones en un sentido general. Así, un contexto no será entendido sólo como un conjunto de enunciados descriptivos ordenados, sino como un conjunto que puede incluir también enunciados y expresiones no proposicionales referidas a normas metodológicas, intereses e incluso experiencias subjetivas³. Considerando todo esto, podemos ahora caracterizar la noción de contexto epistémico de la siguiente forma.

³ Podemos referirnos, mediante una expresión nominal, a una experiencia subjetiva sin describirla. Podemos asumir, por ejemplo, que $\varnothing$ simboliza la experiencia de una determinada persona al ver el mar por primera vez. Dada la riqueza cualitativa de las experiencias subjetivas, parece plausible pensar que ningún conjunto de descripciones podrá capturar lo que tal persona está viviendo en ese momento. Por supuesto, esto no quiere decir que no podamos describirla. Supongamos que para describir $\varnothing$ tenemos que usar expresiones como “Ella sentía que”. Podemos interpretar esta expresión como un operador, es decir, como una expresión no-proposicional. Estas movidas son también aplicables al considerar normas metodológicas o intereses (p. ej. “Es necesario redefinir este concepto” o “Necesitamos una muestra representativa”). Así, el contexto epistémico de un equipo de investigación es también un buen ejemplo. En éste serían relevantes los intereses de los investigadores o sus experiencias de vida y cómo éstas los conducen hacia su investigación, además de las normas académicas, políticas y sociales en las cuales está embebida.

3.1 Contexto epistémico (K). Un contexto epistémico es una tupla $\langle R, Q \rangle$, donde Q es un conjunto de expresiones (descriptivas, normativas o nominales) ordenado mediante un conjunto de funciones de relevancia R .

Podemos postular que las expresiones de Q para un contexto dado pueden estar referidas a otros contextos o a elementos de otros contextos. Con esto, R podrá también, para un contexto dado, determinar ordenamientos de contextos (o sea, expresiones sobre contextos).

Sea K el contexto epistémico desde el que consideramos si un estado de un sistema es emergente o no. Además, simbolicemos mediante K_1 , K_2 y K_3 tres contextos a los cuales K puede referirse. Ahora podemos definir la noción de estado emergente.

3.2 Emergencia contextual. Según K , un conjunto de estados simbolizados por E es emergente a partir de otro conjunto de estados simbolizados por B siempre que se cumplan las siguientes condiciones.

(3.2.1) Hay un contexto K_1 , según el cual E es reducido a B .

(3.2.2) Hay un contexto K_2 , según el cual E es irreducible a B .

(3.2.3) Hay un contexto K_3 , según el cual E involucra propiedades que son nuevas en contraste con B y cuya observación está correlacionada con un cambio abrupto en la complejidad asociada a B , de tal manera que es posible asociar E y B a una misma clase de referencia⁴.

⁴ Esta caracterización del concepto de estado emergente es compatible con otras nociones contextuales de emergencia, como las que ha desarrollado Bishop en colaboración con Atmanspacher (2006). Nuestra propuesta ha sido influenciada en medida importante por sus trabajos. Sin duda, sería importante considerar detalladamente las diferencias conceptuales entre estas perspectivas y la nuestra, pero es una tarea que preferimos no abordar acá.

Notemos que esto puede ser interpretado como la definición de una noción relacional de estado emergente o bien, alternativamente, como la relación de emergencia. Es decir, la definición nos permite no sólo decir bajo qué condiciones E puede ser considerado un estado emergente, sino también bajo qué condiciones podemos decir que E emerge a partir de B . Además, debemos poner énfasis en los aspectos conceptuales y lingüísticos involucrados en esta definición. En cierto punto, debe ser posible asignar a E y B un mismo referente. Nos concentraremos en esto en la sección 4.

Además del concepto de emergencia como relación, tradicionalmente hablamos usando las nociones de *fenómeno emergente* y de *propiedad emergente*. Éstas pueden ser entendidas como nociones derivativas de la definición 3.1. Podemos caracterizar así la de propiedad emergente.

3.3 Propiedad emergente. Sea E un estado emergente en K y $K3$, un contexto considerado desde K en el cual es posible observar las nuevas propiedades de E . Éstas pueden ser llamadas propiedades emergentes, según K .

Continuando, podemos entender de la siguiente manera el concepto de fenómeno emergente.

3.4 Fenómeno emergente. Tanto un fenómeno particular como un tipo de fenómeno correspondiente a la observación de una propiedad emergente puede ser llamado fenómeno emergente, según K .

Así, podemos caracterizar la noción de fenómeno emergente sobre la base de la definición de propiedad emergente, lo cual nos permite alcanzar cierta simpleza en el análisis. Por supuesto, podríamos haber definido el concepto de fenómeno emergente sin acudir a (3.3), basándonos únicamente en (3.2). O podríamos haberlo definido directamente, sin acudir ni a (3.3) ni a (3.2), pero en tal caso la formulación sería menos simple que (3.4).

Antes de aplicar estas definiciones a casos concretos, debemos decir algunas cosas más sobre las nociones de novedad y de reducción, partes fundamentales de la definición 3.2. A continuación, definiremos la primera.

3.5 Novedad. Según un contexto K , una propiedad P es nueva siempre y cuando podamos considerar dos estados S_1 y S_2 , tales que P sea observable sólo en uno de ambos estados. Si P es observable sólo en S_2 , diremos que P es una propiedad nueva con respecto al estado S_1 . Si sólo es observable en S_1 , diremos que es una propiedad nueva con respecto a S_2 .

Notemos que intentamos definir aquí la noción de novedad con respecto a estados y no con respecto a un orden temporal previamente determinado. Si nos basáramos en un orden temporal, podríamos decir que una propiedad es nueva si hay dos estados, uno previo al otro, tales que la propiedad es observada en el estado posterior, pero no en el anterior. Hay al menos dos razones de por qué preferimos no basarnos en esta caracterización. En primer lugar, nos llevaría a la difícil tarea de buscar un orden temporal fijo. Esta tarea es filosóficamente muy interesante, no queremos descartarla. Pero preferimos no abordarla en el presente trabajo⁵. En segundo lugar, caracterizar la novedad sin tener que aludir a un orden temporal fijo no nos impide aludir a él de todas formas cuando sea conveniente, con el fin de hacer la distinción entre novedad diacrónica y novedad sincrónica, una distinción especialmente relevante para el estudio de la noción de estado emergente (cf. Rueger, 2000). La primera requiere de un orden temporal determinado y puede ser definida como lo acabamos de hacer: Considerando dos estados separados temporalmente, una propiedad nueva es observada en el posterior y no en el anterior. La noción de novedad sincrónica expresa la diferencia entre un estado emergente y los estados básicos del sistema en el cual surge. Pensemos, por ejemplo, en los estados mentales. Un estado mental presenta cuali-

⁵ Este orden temporal podría ser establecido en función de los parámetros de K , el contexto epistémico general desde el cual es evaluada la atribución de emergencia, siguiendo nuestra definición.

dades que no podemos observar en los estados de las redes neuronales que lo subyacen y que son realizados en el mismo periodo de tiempo. Ahondaremos en este tipo de casos en la sección 5. Estas distinciones nos permiten, además, hablar de novedad sincrónica ascendente y de novedad sincrónica descendente, asumiendo diferentes escalas de los estados observados. Si observáramos primero un estado mental y luego los estados correspondientes a las redes que lo constituyen, estaríamos en un caso de novedad descendente. Si el orden de las observaciones fuera el opuesto, sería un caso de novedad ascendente.

Consideremos ahora brevemente algunas distinciones relevantes que podemos hacer en torno al concepto de reducción. Es posible hacer una primera distinción importante entre las nociones de *reducción ontológica* y *reducción epistémica* (cf. Van Gulick, 2001).

Por un lado, la *reducción ontológica* es una relación que vincula objetos. Al hablar de objetos en este caso, no es necesario pensar que la relación en cuestión o que tales objetos, tal y como puedan ser postulados y caracterizados, son reales con absoluta independencia de cualquier contexto epistémico. Consideremos algunos tipos de reducción ontológica. Un caso es el de *reducción por identidad*. Si en una ontología determinada, *a* es idéntico a *b*, entonces *a* puede ser reducido a *b*. Otro caso es el de la *reducción por composición*. Si *a* está completamente compuesto de *b*, entonces *a* es reducible a *b*. Podríamos considerar, por ejemplo, cómo según ciertas ontologías postuladas en química orgánica los compuestos son reducibles a sus componentes y a cierta estructura que los une. Por otro lado, la *reducción epistémica* es una relación entre representaciones (cf. Van Gulick, 2001). Un caso es el de la *deducción*. Si una proposición *A* es deducible de *B*, entonces *A* es reducible a *B*. Otro es el de la *equivalencia expresiva*. Si *A* representa el mismo conjunto de objetos (la misma extensión) que *B*, entonces *A* es reducible a *B*. Además, la reducción funcional podría ser considerada como un tipo de reducción epistémica si asumimos una noción epistémica de causalidad.

4. Causalidad descendente

George Ellis (2016) propone una noción de estado emergente que no sólo permite la causalidad descendente, sino que también es caracterizable en concordancia con las teorías físicas. En esta sección queremos presentar brevemente la perspectiva de Ellis, mostrando su plausibilidad y de qué manera es coherente con nuestro concepto de emergencia contextual. Una de las bases del argumento central de Ellis (2016) consiste en pensar cómo surgen los estados constituyentes de un sistema y cómo surgen de estos, a su vez, otros estados emergentes.

4.1 Origen de estados. Las estructuras y estados de niveles bajos que generan comportamientos complejos de niveles altos no pueden surgir de una forma puramente ascendente (*bottom-up*). La explicación de esto es que dependen de una conjunción precisa de estructuras de niveles altos.

Algo crucial de estas estructuras de niveles altos es que involucran características funcionales. Éstas pueden estar basadas en objetivos o propósitos y, en este sentido, son llamadas funciones objetivo. Los objetivos pueden ser impuestos extrínsecamente o bien pueden surgir en comportamientos adaptativos. De cualquier forma, las características funcionales permiten organizaciones determinadas de un sistema (es decir, organizan sus niveles inferiores). Un ejemplo de funciones objetivo es el de los acuerdos sociales (Ellis, 2016).

4.2 Acuerdo social. El poder legislativo de un país puede ser organizado de una determinada manera mediante acuerdos sociales. Esta organización es establecida siguiendo ciertos objetivos de una sociedad, postulados de diversas maneras (que dependen del régimen político)⁶. Si bien en un estado democrático

⁶ Por supuesto, las fuerzas sociales que interactúan en este tipo de procesos son diversas. Podríamos extender el ejemplo y mencionar movimientos comunales, la corrupción u otros poderes estatales, entre otras. Cada una de estas fuerzas establece funciones objetivo que influyen en el orden legislativo.

la sociedad puede participar mediante elecciones, el comportamiento del poder legislativo no emerge directamente de las interacciones entre todos los miembros de la sociedad. Pensemos ahora en un grupo de países organizados de esta manera y que interactúan entre sí, generando un sistema de relaciones económicas que puede mostrar un nivel alto de complejidad. El punto es éste: Las partes constituyentes de dicho sistema—entre ellas, los estados y los mercados—no surgen de manera puramente ascendente desde los estados físicos (ni desde el conjunto total de ciudadanos), sino por medio de propósitos de niveles altos, como ha sido señalado recién.

Este caso involucraría, en cierto sentido, funciones objetivo impuestas (es decir, no-adaptativas). Las normas formuladas por el poder legislativo no son otra cosa. Considerando una de las distinciones introducidas anteriormente, podemos decir que este caso muestra cómo la emergencia sincrónica depende de la emergencia diacrónica (cf. Ellis, 2016). Si bien la forma en la que está organizada una sociedad en un período dado puede ser descrita en términos de lo que hacen los ciudadanos en ese periodo, tal organización no puede haber surgido sólo mediante procesos ascendentes. Así, hay un sentido en el que esta organización social, entendida como un estado general emergente, es reducible a sus partes constituyentes (mediante reducción por composición, si queremos) y, a la vez, un sentido en el que es irreducible (pues es resultado de procesos emergentes diacrónicos).

El otro tipo de características funcionales que señala Ellis (2016) es el de las funciones adaptativas. Un buen ejemplo es el siguiente (p. 108).

4.3 Información biológica. La información genética determina, en parte, las formas en las que un organismo puede comportarse y así interactuar con su entorno⁷. Pero al parecer no es

⁷ Para evitar malentendidos, es preciso mencionar que la secuencia genética no contiene toda la información sobre toda clase de comportamiento de niveles más altos. En este sentido, quizás sería más apropiado hablar sólo de secuencia genética y no de información genética. Así, usamos

posible predecir la secuencia de nucleótidos en el ADN a partir de la física o de la microbiología. Tal información es producto de interacciones con el ambiente durante periodos históricos muy largos. El punto central aquí es el mismo que el señalado antes. Las estructuras genéticas pueden ser consideradas como partes constituyentes de un sistema del que emergen comportamientos complejos de niveles altos. Pero tales partes no se constituyen de una manera puramente ascendente, sino que dependen de interacciones con el entorno que involucran causalidad descendente.

Así, en estos casos, si pudiéramos modificar suficientemente la historia de las interacciones entre una especie y su entorno, podríamos modificar también su estructura genética. También, pensando en escalas temporales menores, podemos modificar, por supuesto, la conducta y los hábitos de un individuo realizando modificaciones en su entorno. Estos son ejemplos de influencia descendente desde estados emergentes hacia partes constituyentes del sistema en el que surgen dichos estados. Y, nuevamente, son casos en los que es posible hablar de reducción, en algún contexto epistémico relevante, y de irreducibilidad, según otro contexto epistémico.

Debemos señalar que Ellis da fundamento a estas ideas desde la física y, considerando esto, un contexto podría ser entendido como un conjunto de expresiones sobre circunstancias materiales en medio de las cuales ocurre un proceso emergente, entendido también en términos físicos. Cuando modificamos un entorno ecológico, modificamos materialmente el entorno que habitan determinados individuos; podemos cambiar, por ejemplo, condiciones climáticas, condiciones químicas o condiciones biológicas de otros organismos. Ahora bien, esto no quiere decir que debamos ver esta noción de contexto como completamente desligada de la noción epistémica de contexto introducida en la sección anterior.

el término “información biológica” admitiendo sus limitaciones. Cabe mencionar aquí el área de la epigenética, cuyo objeto es estudiar cómo variables ambientales y conductuales modulan y regulan la expresión de varios genes, sin modificar la secuencia de ADN.

De hecho, una de las caracterizaciones que ofrece Ellis (2016) de la noción de contexto es claramente epistémica (p. 261). Podemos formularla de la siguiente manera.

4.4 Contexto de variables. En una investigación sobre estados emergentes, un contexto puede ser entendido como un conjunto de variables realizadas de nivel alto (macro) que pueden influir en un conjunto de variables realizadas de nivel bajo (micro).

Una variable realizada es una variable junto a la asignación de uno de sus valores posibles. Por ejemplo, podemos considerar la variable *temperatura* y uno de sus valores posibles, 30°C. Si asignamos dicho valor a esta variable podemos tratarla como variable realizada y a su valor como la realización de la variable.

Ahora bien, la noción de contexto sobre la que formulamos nuestra propuesta (3.1) es quizás más general que ésta. Por supuesto, un contexto de variables es un contexto epistémico o puede ser considerado como parte de un contexto epistémico. Pero, en principio, todo contexto epistémico puede ser extendido y convertirse en algo aún más general, si pensamos, por ejemplo, en los criterios de relevancia sobre la base de los cuales queremos seleccionar un conjunto particular de variables macro. Claro, estos mismos criterios podrían ser tratados a su vez en una estructura de variables, las que deberían ser seleccionadas mediante otros criterios aún más generales y así sucesivamente. En algún punto, debido a razones pragmáticas, el contexto puede ser demarcado con cierta claridad, pero difícilmente con absoluta especificidad.

5. Reducción como identidad

La noción de emergencia que proponemos aquí expresa, como hemos visto, no sólo que un estado emergente es un estado que no es reducible y que surge en un sistema que alcanza cierto cambio de complejidad, sino que también es un estado reducible bajo ciertas condiciones. Queremos exponer ahora brevemente la teoría desarrollada por Herbert Feigl (1967), que muestra en qué sentido

es plausible identificar estados mentales con estados neuronales. Esto nos permitirá luego caracterizar un tipo de reducción basada en la noción de identidad que podría formar parte de una interpretación para la definición 3.2. Basándonos en el argumento de Feigl, podemos caracterizar la identidad entre esos tipos de estados de la siguiente manera.

5.1 Identidad referencial de lo mental y lo físico. Sea M una expresión correspondiente a un lenguaje de introspección (un lenguaje fenomenológico, si queremos) y N un conjunto de expresiones correspondientes a un lenguaje neurocientífico, ambas pueden ser consideradas idénticas si poseen el mismo referente (cf. Feigl, 1967).

Esta idea de identidad nos permite entender la relación de reducción así:

5.2 Reducción por identidad. Es posible reducir una expresión M a otra expresión N cuando M es referencialmente idéntica a N .

Según Feigl, cada persona tiene acceso epistémico privilegiado a las propiedades mentales subjetivas (*qualia*), tales como el dolor o los colores. Los términos “dolor” y “rojo” son parte de lo que podemos llamar lenguaje introspectivo o fenomenológico, por medio del cual podemos referirnos a estas cualidades. Además, podemos referirnos a las mismas cualidades mediante expresiones correspondientes a un lenguaje neurocientífico. Este tipo de lenguaje es intersubjetivo y es físico en este sentido muy general, es decir, en la medida en que permite construir conocimiento descriptivo. Con esto, podemos identificar expresiones referidas a lo mental con expresiones referidas a lo físico⁸. Así, ésta es una forma en la que lo mental puede ser reducido a lo físico.

⁸ Es preciso notar que la identidad de referencia no está sostenida (únicamente) sobre bases empíricas, sino sobre bases lingüísticas, epistémicas y metodológicas. Así, la correferencialidad es postulable desde la correlación empírica, pero esto no significa que la identidad de referencia sea una relación empírica.

Es preciso poner énfasis en que las diferencias entre lo mental y lo físico relevantes para Feigl son diferencias entre lenguajes o sistemas conceptuales y no diferencias ontológicas. Pensando en la terminología asociada a nuestra propuesta sobre la noción de estados emergentes, podemos decir que la diferencia entre lo mental y lo físico es una diferencia entre contextos epistémicos, una diferencia epistémica y contextual.

Considerando estas ideas, podemos caracterizar también una forma de identificar cualquier estado emergente en general con conjuntos de estados micro. Recordemos la definición de emergencia contextual que ofrecimos anteriormente (3.2). Cuando un estado es emergente, consideramos un conjunto de expresiones B que describe un sistema y sus partes; una expresión E , correspondiente a un contexto epistémico en el que es posible observar nuevas propiedades del sistema; y un contexto según el cual E y B deben tener el mismo referente. Éste es un sentido en que un estado emergente es reducible a los estados micro de los cuales surge.

6. El caso de las redes neuronales

Sobre la base de las discusiones y definiciones propuestas anteriormente, analizaremos algunos resultados conocidos sobre redes neuronales e intentaremos, de ser posible, proponer contextos epistémicos en los que se pueda hablar de reducción y otros en los que no. Para esto, introduciremos brevemente el marco teórico de las redes neuronales y ciertas formas de representarlas matemáticamente.

Las neuronas son células especializadas que conforman el sistema nervioso en todas las especies del reino animal, formando redes a través de conexiones llamadas sinapsis. Éstas son conexiones físicas en donde las neuronas pueden estimularse eléctricamente y compartir diversos tipos de moléculas⁹. Dentro de los muchos

⁹ Existe una corriente importante en neurociencias, según la cual los estados mentales de distintos tipos surgen a partir de estados neuronales.

tipos neuronales que existen, están las neuronas que emiten potenciales de acción, lo que corresponde a un aumento abrupto y transitorio (del orden de 1 milisegundo) en el voltaje intracelular. Estos potenciales de acción pueden ser registrados eléctricamente (desde el espacio juxtacelular) de forma masiva y en paralelo, consiguiendo registros de redes neuronales compuestas por cientos de neuronas, cada una disparando hasta 300 potenciales de acción por segundo. Esta tasa de descarga varía tanto entre neuronas como entre especies.

Con ese tipo de registros, podemos observar un conjunto de potenciales de acción ordenados en el espacio (conjuntos de neuronas que disparan juntas) y en el tiempo (secuencia de disparos). Aquí estableceremos el primer contexto epistémico, llamado K . En este contexto, las neuronas son consideradas variables binarias, es decir, que en un instante de tiempo disparan un potencial de acción o están en silencio y la combinación total de patrones espaciales (neuronas disparando juntas) posibles en una red neuronal de N neuronas es igual a 2^N . Este conjunto de patrones es llamado “ráster” en la comunidad neurocientífica. Este ráster puede ser caracterizado por un conjunto de patrones espaciales σ (de dimensión N , una dimensión por neurona) y sus probabilidades asociadas. El conjunto de probabilidades de todos los patrones es llamado distribución de probabilidad $P(\sigma)$ y será considerado como el estado emergente E . Sus elementos básicos, B , serán las neuronas. Entonces, el contexto de variables incluye, al menos, las neuronas (variables de más bajo nivel) y patrones conformados por ellas (variables de alto nivel). De ser posible alguna reducción, por simplicidad, será sincrónica (pero existen formalismos para reducción diacrónica también).

Si bien no nos enfocaremos aquí en las relaciones de emergencia que pudieran ser establecidas entre tales estados, indicaremos caracterizaciones de emergencia entre estados de las redes neuronales mismas. Estas caracterizaciones sentarían algunas bases para comprender los procesos emergentes —sin duda, mucho más complejos— que ocurren entre estados neurales y estados mentales.

Para considerar $P(\sigma)$ como un estado emergente de la red neuronal, debemos, al menos, establecer una noción de incertidumbre y novedad entre los estados del sistema. Así, podremos reconocer la novedad entre estados microscópicos (las neuronas) y estados macroscópicos ($P(\sigma)$). En el contexto de la teoría de la información y estadística, la entropía estadística cuantifica el nivel de incertidumbre sobre la observación de una variable aleatoria dada. Así, si observamos varias realizaciones de una misma variable aleatoria discreta¹⁰ x , obtendremos una distribución de probabilidad (los valores posibles de x y sus probabilidades asociadas). La información que podemos extraer sobre x , mirando sólo su estadística (es decir, su distribución de probabilidad), es cuantificada por la función de entropía $S(x)$:

$$S(x) = -\sum p(x)\log(p(x)) \quad (1)$$

Aquí, $p(x)$ es la probabilidad de cierto valor de x y $\log$ es la función logaritmo. La sumatoria recorre toda la distribución de probabilidad. Esta función es máxima cuando tenemos la mayor incertidumbre sobre x y será cero cuando tengamos total certeza sobre su valor. Entonces, en K , representamos con $P(\sigma_i)$ la distribución de probabilidad de la neurona i y, de existir algo nuevo en el estado emergente $P(\sigma)$ respecto a sus componentes básicos, encontraríamos la siguiente relación:

$$S(\sigma) < \sum_i^N S(\sigma_i) \quad (2)$$

Es decir, al observar la estadística del estado emergente $P(\sigma)$ aprendemos más de la red que si observamos sólo la estadística de sus partes básicas: Hay novedad en el estado emergente respecto a observar a las partes por sí solas. Si reemplazamos la desigualdad mostrada en (2) por una igualdad, diremos que sólo mirando la

¹⁰ Asumimos, por simplicidad, que la variable es discreta, pero el concepto también es aplicable a variables continuas.

estadística de las partes ya sabemos la estadística del todo; en este caso, el estado $P(\sigma)$ no es novedoso respecto a observar sus partes básicas y $P(\sigma)$ puede ser reducido a sus partes.

Entonces, de observar novedad en $P(\sigma)$ respecto a sus partes básicas, nos gustaría ser capaces de identificar ciertos roles causales de las variables sobre la base de los cuales sea posible generar la distribución $P(\sigma)$ observada. Este intento puede ser abordado desde los modelos de máxima entropía, en los cuales uno busca generar una distribución $P(\sigma)$ lo más entrópica posible, estadísticamente, pero restringida a reproducir ciertos valores observados empíricamente en el ráster. Estos modelos toman la siguiente forma:

$$P(\sigma) = \frac{\exp(\beta H(\sigma))}{Z} \quad (3)$$

La función $\exp$ es la función exponencial, β es la llamada temperatura inversa¹¹ y Z es la llamada *función de partición* o *constante normalizadora*, que asegura que la suma de todas las probabilidades sea igual a 1. $H(\sigma)$ es la llamada *función de energía* y expresa las restricciones del modelo, es decir, nuestros supuestos sobre los roles causales de las variables que generan $P(\sigma)$. La expresamos como:

$$H(\sigma) = \sum_i^L h_i m_i \quad (4)$$

donde h_i son parámetros libres que ajustaremos para reproducir el valor empírico del promedio de la variable m_i . L corresponde al número de parámetros o variables del modelo. En suma, tenemos un parámetro por variable y la elección de las variables quedan a criterio del investigador. Por ejemplo, uno podría construir una función de energía que sólo reprodujera las tasas de disparo (número de potenciales de acción por unidad de tiempo) de las neuronas observadas, quedando de la siguiente forma:

$$H(\sigma) = \sum_i^N h_i \sigma_i \quad (5)$$

¹¹ Se suele tomar que $\beta=1$. Más adelante veremos su rol.

En este caso, σ_i corresponde al estado de la neurona i en el patrón σ . Recordemos que, en el contexto K , la neurona puede estar activa o inactiva solamente.

6.1 Contexto de irreducibilidad

Supongamos ahora un contexto K_1 , según el cual el rol causal de las neuronas es puramente ascendente, de tal manera que podemos generar $P(\sigma)$ sólo considerando las actividades de las neuronas independientes. Este supuesto podría sostenerse sobre un criterio de eficiencia y economía, pensando que cada neurona hace algo diferente (son independientes), de tal manera que se optimizan los recursos metabólicos del organismo. En ese contexto, una función de energía como la mostrada en (5) sería la elección. Como muchos resultados muestran (Gardella, Marre, y Mora, 2019), un modelo como éste falla dramáticamente al reproducir $P(\sigma)$ para distintos tipos de redes neuronales, lo que sugiere, al menos, que las neuronas no son independientes en su actividad y que $P(\sigma)$ no puede ser construida de forma puramente ascendente. Así, en el contexto K_1 , el estado emergente E no puede ser reducido sólo a la actividad de los elementos básicos B .

6.2 Contexto de reducción

Por otro lado, asumamos que en un contexto K_2 los investigadores piensan que, dado que una red neuronal es también un tejido biológico y parte de un animal, las neuronas no pueden ser totalmente independientes, considerando sus condiciones comunes. Es decir, podría haber causalidad descendente desde las propiedades del animal (por ejemplo, ritmos metabólicos, historia de desarrollo y evolución) hacia las propiedades de las neuronas. En este contexto, los supuestos de los investigadores incluyen tanto descripciones sobre la actividad de cada neurona individual como también sobre las interacciones de pares de neuronas. La función de energía queda expresada de la siguiente forma:

$$H(\sigma) = \sum_i^N h_i \sigma_i + \sum_{i < j}^N J_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (6)$$

donde h_i es el mismo de la ecuación (5); J_{ij} es un parámetro libre que se ajusta para reproducir el promedio del disparo en conjunto entre la neurona i y la neurona j ; y $\sigma_i \sigma_j$ corresponde a que la neurona i y la neurona j estén activas juntas en el patrón σ . En este caso, las interacciones son simétricas, es decir, $\sigma_i \sigma_j = \sigma_j \sigma_i$, y por esto la sumatoria está expresada asumiendo que $i < j$. Así no se repite ninguna interacción. En la literatura de mecánica estadística esta función de energía es una generalización del modelo de Ising¹². Para redes en las que $N = 40$ neuronas, por ejemplo, estos modelos son capaces de reproducir $P(\sigma)$ con mayor precisión (respecto al modelo (5), observada en varios tipos de redes neuronales. En este contexto, podríamos decir que $P(\sigma)$ es reducida por composición a las neuronas y a sus interacciones¹³. Aquí incluimos un nuevo conjunto de variables de segundo orden: las interacciones de a pares.

6.3 Contexto de correlación

Ahora, en un contexto K_3 , donde es posible registrar más neuronas en paralelo, asumiendo, por ejemplo, que $N = 100$, un modelo como (6) comienza a fallar. En específico, conociendo $P(\sigma)$, es fácil derivar $P(k)$, la probabilidad de k neuronas disparando juntas en el mismo patrón. $P(k)$ reflejaría un rol causal descendente, donde interacciones de alto orden influyen sobre elementos de bajo orden. Es decir, la actividad de las neuronas ahora está causada, en parte, por su tendencia a disparar en conjunto. Al comparar el

¹² El modelo de Ising representa el comportamiento colectivo de un material ferromagnético, donde el estado de cada partícula ferromagnética (llamado espín) depende tanto de fluctuaciones térmicas como del estado de sus vecinos más cercanos espacialmente. En el caso de las neuronas, se consideran todas las interacciones, no sólo las interacciones entre las vecinas más cercanas.

¹³ Dada la naturaleza cuantitativa del estudio, la reducción se define en torno a un umbral de precisión.

modelo con los datos, se observa que un modelo como (6) subestima, en especial, la probabilidad (observada en el ráster) de muchas neuronas disparando juntas, es decir, $P(k)$ cuando k se acerca a N . Esto ha sido considerado como un fallo del modelo al reproducir las interacciones de alto orden (interacciones entre más de dos neuronas).

Por lo mismo, los investigadores pueden considerar una nueva forma de la función de energía, que contiene explícitamente un término asociado a $P(k)$:

$$H(\sigma) = \sum_i^N h_i \sigma_i + \sum_{i < j}^N J_{ij} \sigma_i \sigma_j + V(k) \quad (7)$$

donde los dos primeros términos de la ecuación corresponden con los de (4) y $V(k)$ es una función que se ajusta para reproducir $P(k)$. De esta forma, el modelo incluye i) la actividad de cada neurona, que les permitirá incluir la diversidad individual, ii) las interacciones entre pares de ellas, que les permitirá inferir la topología funcional de la red y iii) $P(k)$, que les permitirá incluir interacciones de orden mayor. Utilizando (5), los investigadores son capaces de reproducir $P(\sigma)$ y $P(k)$ con mayor precisión que usando (4), para casos de redes más grandes ($N > 100$). Así, en K_3 es posible reducir (según cierto umbral de precisión) el estado emergente E (aquí representado por $P(\sigma)$ a las partes básicas del sistema, a sus interacciones de a pares y a la tendencia de la red de tener k neuronas activas.

Volviendo a la ecuación (3), ahondaremos un poco en el rol de β , que simboliza lo que llamamos temperatura inversa ($\beta = 1/(T \text{ kB})$, donde T es la temperatura del sistema y kB la constante de Boltzmann). Durante el proceso de ajustar los parámetros para reproducir los valores observados en el ráster, β es considerado igual a 1, ya que no se tiene una noción clara de cuál sería la temperatura en este sistema. Sin embargo, una vez que hemos obtenido los parámetros del proceso de ajuste, podremos realizar simulaciones computacionales donde es posible generar muchas $P(\sigma)\beta$ mediante el uso de los parámetros inferidos, pero multiplicados por diferentes

valores de β . Así, simulamos la actividad de redes neuronales que contienen la misma estructura interna (sus parámetros), pero donde todos los parámetros son escalados por este factor β .

Así, recordando la condición (3.2.3) de la definición (3.2), que exige la correlación entre la aparición del estado E y un cambio abrupto en la complejidad del sistema, introduciremos la noción de variabilidad de $P(\sigma)$. Llamaremos $Var \log(P(\sigma))$ a la variabilidad de los valores de $\log(P(\sigma))$, la cual será nuestra aproximación *sensu lato* a la complejidad del sistema. Esta relación se puede establecer sobre la base de que si $Var \log(P(\sigma))$ es muy pequeña, quiere decir que todos los patrones tienden a tener la misma probabilidad, indicando muy poca complejidad del sistema y que el sistema está en máxima entropía. Por otro lado, si $Var \log(P(\sigma))$ es muy grande, quiere decir que el sistema explora un amplio rango de valores de $P(\sigma)$, exhibiendo patrones con muy alta probabilidad como otros con muy baja. Finalmente, si el sistema visita con alta probabilidad muy pocos patrones, y visita al resto de los patrones con muy poca probabilidad (pero similar entre ellos), $Var \log(P(\sigma))$ sigue siendo pequeña, ya que la mayoría de los patrones tienen la misma probabilidad (aunque baja). Entonces, $Var \log(P(\sigma))$ es baja cuando el sistema visita con la misma probabilidad todos los estados, como también cuando visita muy pocos estados preferentemente, mientras que se hace alta cuando $P(\sigma)$ toma un amplio rango de valores, es decir, $P(\sigma)$ presenta una estructura estadística no trivial. En suma, considerando la laxa relación entre la función $Var \log(P(\sigma))$ y la idea de complejidad, podemos variar β para modificar $P(\sigma)$ y así poder explorar cómo varía la complejidad respecto a un parámetro de control (ver Figura 2). Esto nos permitiría acercarnos a la noción de cambio abrupto en la complejidad del sistema.

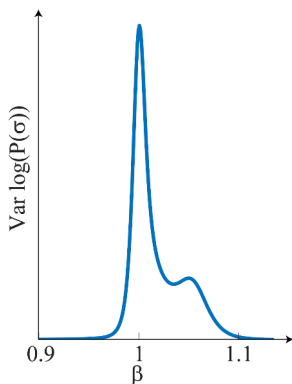


Fig. 2

Por ejemplo, para redes de 100 neuronas, se observa un máximo de complejidad cuando β es cercano a 1 (el valor con el cual se obtuvieron los parámetros desde los datos), mientras que la complejidad decae a medida que nos alejamos de $\beta=1$ (ya sea subiendo o bajando dicho valor).

Por un lado, tener valores muy altos de β (es decir, una temperatura simulada muy baja) hace que todos los patrones con una o más neuronas activas tengan muy baja probabilidad (y requieran de mucha energía), haciendo que el sistema tienda a explorar sólo el patrón en el que todas las neuronas están inactivas: el silencio. El resto de los patrones presentan una probabilidad semejante entre ellos, pero muy baja respecto al silencio. En este estado el sistema tiene la mínima entropía (sólo visita un patrón). Podríamos pensar que está “congelado”. Aquí, $P(\sigma)$ podría ser reducida por identidad al silencio, ya que todas las neuronas están inactivas.

Por otro lado, si bajamos mucho β (aumentando así la temperatura), todos los patrones comienzan a ser explorados por el sistema con la misma probabilidad, dejando de importar las interacciones entre neuronas y la diversidad neuronal. Aquí el sistema muestra la máxima entropía y podríamos considerar al sistema como “hirviendo”, donde no muestra preferencias por un patrón u otro y no somos capaces de identificar estructuras en $P(\sigma)$. En este caso, $P(\sigma)$

es reducible por deducción a la distribución uniforme (todos los patrones tienen la misma probabilidad), donde la probabilidad de cada patrón es $1/(2N)$, por lo que $P(\sigma)$ puede ser deducida a partir de N , el número de neuronas.

Finalmente, como fue anticipado, el sistema muestra su mayor complejidad cuando β es cercana a 1, indicando que si utilizamos una reducción como la realizada para un valor de β muy alto o muy bajo (identidad y deducción, respectivamente)¹⁴, concluiríamos que cuando $\beta=1$, $P(\sigma)$ no puede ser reducido ni al silencio ni deducido a partir del número de neuronas. Respecto a los otros dos estados, cuando $\beta=1$, hay novedad y requerimos incluir otros roles causales para generar $P(\sigma)$. En específico, una función de energía como la mostrada en (7) parece ser suficientemente amplia respecto a los roles causales que incluye, tal que, en un cierto estado, nos permite reducir $P(\sigma)$ a un solo elemento (el silencio), mientras que, en otro estado, es posible deducirla desde el número de elementos del sistema. Incluso, podemos generar $P(\sigma)$ en el estado de máxima complejidad, pero requerimos de la inclusión de variables de órdenes mayores, tal como $P(k)$.

Así, hemos mostrado que en un contexto general K , donde el sistema S es llamado ráster, es posible definir la distribución de probabilidad $P(\sigma)$ como un estado emergente, teniendo como condición, al menos, que observar el estado macroscópico $P(\sigma)$ reduce la incertidumbre, es decir entrega novedad, respecto a observar sus estados microscópicos (las neuronas). Esto fue mostrado en el contexto K_1 , donde no es posible generar $P(\sigma)$ sólo a partir de la actividad de las neuronas. Por otro lado, en un contexto como K_2 , para redes en las que $N < 50$, es posible reducir, por composición, el sistema a sus partes más básicas y a sus interacciones, pero no así cuando se consideran redes más grandes. Finalmente, según un contexto como K_3 , donde consideramos

¹⁴ En el caso del sistema congelado, se reduce la propiedad emergente a todas las neuronas inactivas, mientras que, en el caso del sistema de alta temperatura, la propiedad emergente se deduce del tamaño de la red neuronal.

redes más grandes ($N > 100$), explorar las variaciones de la complejidad del sistema nos permite producir estados emergentes que son fácilmente reducibles a un solo elemento (por ejemplo, al silencio o al número de neuronas), como también otros estados emergentes donde necesitamos diversos roles causales para reproducir $P(\sigma)$. Estos roles causales son i) *ascendentes*, en el sentido que la actividad de cada neurona contribuye a generar $P(\sigma)$ y ii) *descendentes*, en el sentido que las interacciones de alto orden dan forma a la actividad de cada neurona. Como nota final, mencionamos que una ecuación como (7) no reduce el sistema a sus partes básicas, sino que además requiere de la inclusión de variables de órdenes más altos, como la interacción entre pares de neuronas y la tendencia de más de dos neuronas a disparar juntas.

7. Conclusión

Hemos considerado aquí algunos problemas clásicos relacionados con la caracterización de la noción de emergencia, basándonos principalmente en el denominado desafío de inconsistencia. Básicamente, éste es el desafío de aclarar en qué sentido los estados emergentes de un sistema dependen, por una parte, de los estados constituyentes del mismo y son, por otra parte, irreducibles a los mismos. Para abordarlo, ofrecemos una propuesta basada en la idea de contexto epistémico. Según nuestra caracterización, debe haber un contexto epistémico según el cual un estado emergente es reducible, pero también debe haber contextos epistémicos que nos permitan determinar tanto su irreducibilidad como los cambios de complejidad asociados a su aparición. Esta propuesta nos permite también dar cuenta de propiedades asociadas tradicionalmente a la noción de estado emergente, como la causalidad descendente y la novedad, entre otras. Por supuesto, la caracterización que ofrecemos es aplicable a fenómenos de diversos ámbitos, como las ciencias sociales y la biología. Con el fin de centrar la discusión en cuestiones asociadas a la filosofía de la mente, hemos aplicado, en la última sección, este concepto contextual de emergencia a cuestiones correspondientes al análisis matemático de redes neuro-

nales. Hemos mostrado cómo es posible satisfacer las condiciones de la definición que proponemos para estados de redes neuronales, en particular, para distribuciones de probabilidad obtenidas de las mismas. Es más que plausible, por supuesto, pensar que las relaciones de emergencia que podamos determinar sobre la base del análisis de redes neuronales sirven para establecer relaciones de emergencia entre estados mentales y estados neuronales. No nos hemos detenido en los detalles de esta tesis, pero creemos que lo expuesto aquí establece un suelo teórico riguroso para desarrollarla.

Agradecimientos

E.C. Agradece a Peter Baumann, George Ellis y a Miguel Fuentes por discusiones y aclaraciones sobre algunos de los puntos centrales del presente trabajo. También quisiera agradecer el apoyo de CONICYT (FONDECYT N° 3160180, N° 1181414 y N° 11180624).

R.H. Agradece a Rodrigo Cofré por las discusiones sobre modelos de máxima entropía y criticalidad. También quisiera agradecer a Fernando Rosas por discusiones sobre complejidad y fenómenos emergentes en el contexto de la estadística y la computación. Finalmente, agradece a la Beca de Doctorado Nacional de CONICYT.

Referencias

- Beckermann, A. (1992). Introduction: Reductive and Nonreductive Physicalism. En A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds.), *Emergence or reduction? Essays on the prospects of nonreductive physicalism*, vol. 17. Berlin: Walter de Gruyter.
- Bishop, R., Atmanspacher, H. (2006). Contextual Emergence in the Description of Properties. *Foundations of Physics*, 36(12): 1753-1777.

- Broad, C. D. (1925). *The mind and its place in nature*. Cambridge: Routledge.
- El-Hani, C. N., Pereira, A. M. (2000). Higher-level descriptions: why should we preserve them. En E. Andersen, C. Emmeche, N.O. Finnemann y P. Christiansen (eds.), *Downward Causation*. Aarhus: University of Aarhus Press.
- Ellis, G. (2016). *How can Physics Underlie the Mind?* New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Feigl, H. (1967). *The mental and the physical: The essay and a postscript*. Minnesota: University of Minnesota Press.
- Gardella, C., Marre, O., Mora, T. (2018). Modeling the correlated activity of neural populations: A review. *Neural Computation*, 31(2): 233-269.
- Kim J. (1997). The Mind-Body Problem: Taking Stock after Forty Years. En J. Tomberlin (ed.), *Mind, Causation, and World*, pp. 185-207. Oxford: Blackwell.
- Kim, J. (2005). *Physicalism, or Something Near Enough*. Princeton: Princeton University Press.
- Kim, J. (2006). Emergence: Core ideas and issues. *Synthese*, 151(3): 547-559.
- Rueger, A. (2000). Physical emergence, diachronic and synchronic. *Synthese*, 124(3): 297-322.
- Sartenaer, O. (2016). Sixteen Years Later: Making Sense of Emergence (Again). *Journal for General Philosophy of Science*, 47(1): 79-103.
- Van Gulick, R. (2001). Reduction, emergence and other recent options on the mind/body problem: A philosophic overview. *Journal of Consciousness Studies*, 8(9-10): 1-34.

Sobre los autores

Esteban Céspedes recibió el grado de licenciado en Filosofía de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y el de doctor en Filosofía de la Universidad Goethe de Fráncfort del Meno. Actualmente trabaja, como investigador asociado a la Universidad de Valparaíso, enfocado en cuestiones relacionadas con las nociones de contexto, emergencia, representación y de sistema abierto. Contacto: estebancespedes@aol.com

Rubén Herzog Amunátegui, biólogo de formación, cursa su segundo año del Doctorado en Biofísica y Biología Computacional en la Universidad de Valparaíso. Sus intereses de investigación principales son las redes neuronales, el efecto de las drogas psicodélicas en el cerebro humano y la relación cerebro-consciencia. Contacto: rubenherzog@ug.uchile.cl