

SISTEMES DINÀMICS: L'INTERÈS DELS FRACTALS I LA CRITICALITAT EN NEUROFISIOLOGIA

Xavier Bornas

Institut Universitari d'Investigació en Ciències de la Salut (IUNICS). Universitat de les Illes Balears

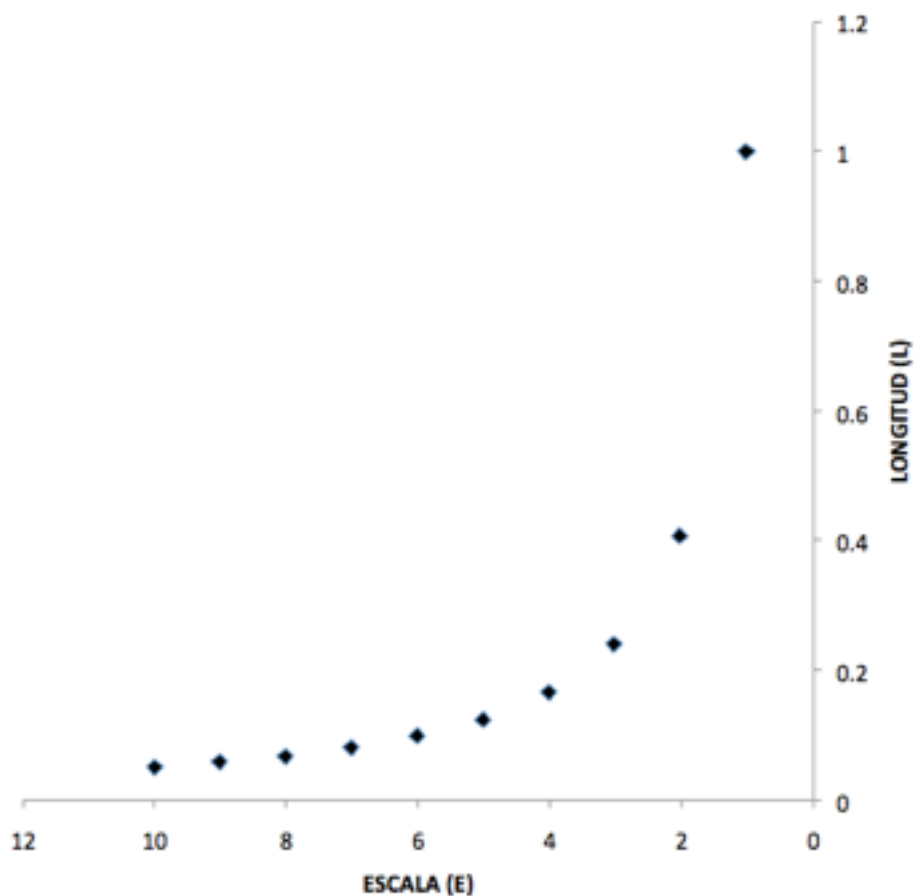
Tot i la seva relativa antiguitat, el concepte de “fractal” segueix essent molt desconegut pels estudiosos del comportament humà. La importància i el significat dels fractals, però, es va veient amb més claredat cada dia, especialment en l'àmbit de la neurofisiologia i la neurociència en general, i el seu estudi esdevindrà inevitable (si no ho és ja ara) si es vol obtenir una comprensió plena d'aquell comportament. En aquest breu capítol ens centrarem en un treball de revisió publicat l'any passat (Pittman-Polletta, Scheer, Butler, Shea, & Hu, 2013), però abans mirarem d'aclarir breument el concepte de fractal per als qui encara el desconeguin (una explicació més detallada la trobareu al llibre de Bornas, 2009; també al capítol del CDSCRITC del 2012 hi fem referència –Bornas (2012).

Fractals: el concepte

L'origen d'aquest concepte és clar: el va introduir B. Mandelbrot en un article a Science l'any 1967. El missatge central d'aquest treball era que entre la llargària de la costa britànica i l'escala amb què es medís hi havia una relació invariant, és a dir, que la longitud de la costa depenia de l'escala de mesura i que aquesta relació era igual per a qualsevol escala. Gràficament és més fàcil d'entendre: suposem que, sobre una fotocòpia d'aquella costa, medim la llargària amb un regle de 10 cm. i obtenim una longitud L_{10} . A continuació agafem un regle de 8 cm. i repetim l'operació obtenint una longitud L_8 . Tornem a medir la costa, ara amb un regle de 6 cm., que ens dona una longitud L_6 , i seguim medint la mateixa costa amb regles cada vegada més curts fins, posem per cas, un de 0.5 cm que dona una longitud $L_{0.5}$. Com que un regle molt curt és capaç de mesurar molts més racons de la costa que un regle llarg, veurem fàcilment que els valors d' L augmenten a mesura que els del regle (l'escala) disminueixen. Però el més interessant ve quan tots aquest valors es posen en una gràfica (vegeu la figura 1; les dades són fictícies). La longitud de la costa augmenta

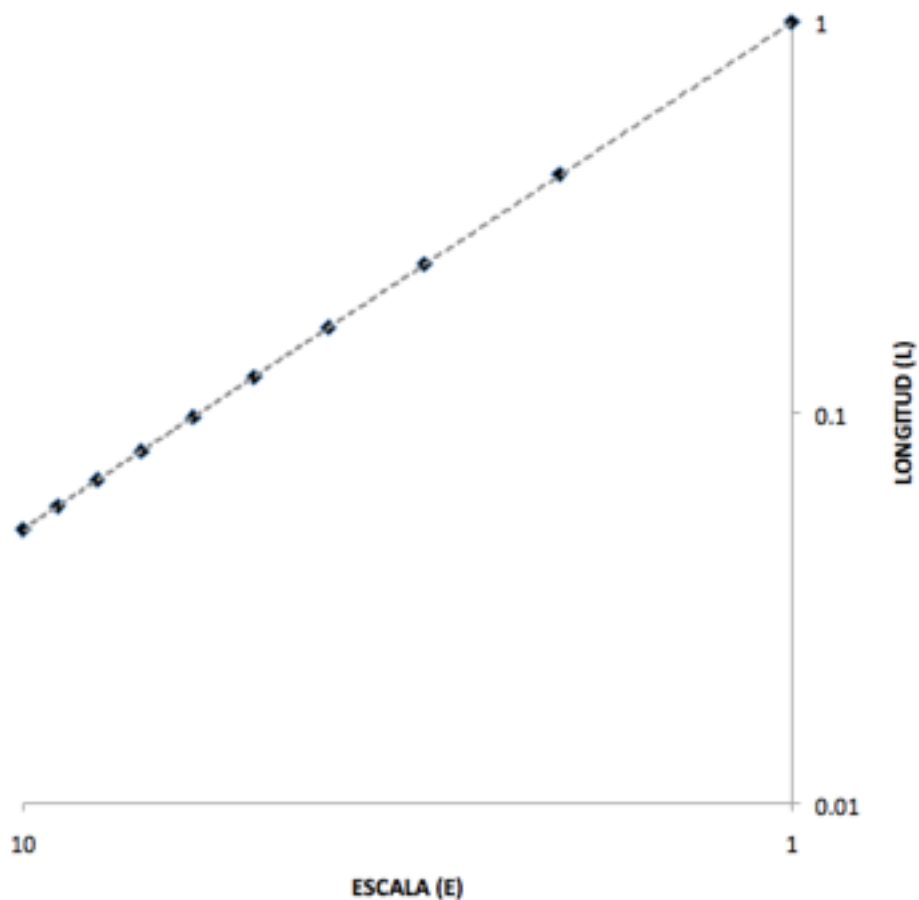
exponencialment amb la disminució de l'escala, una relació que matemàticament s'expressa així: $L=eh$ i s'anomena power-law. Si ara transformem els eixos i els fem logarítmics tindrem els valors alineats en una recta (vegeu la figura 2), ja que $\log(L)=\log(eh)=h \cdot \log(e)$ – cal recordar que l'equació d'una recta és $y=a x$ (més una constant que ara podem obviar). El pendent d'una recta és el mateix en qualsevol punt de la recta, és invariant, i en aquest sentit es parla d'invariància d'escala; sigui quina sigui l'escala de mesura podrem predir la longitud de la costa si sabem quin és el pendent d'aquella recta. Per exemple, no ens caldrà mesurar la costa amb un regle (escala) de 2 cm. si sabem que el pendent és h ; la costa en aquest cas tindrà una longitud $L=2h$. La dimensió de la costa seria precisament aquest exponent h , i com que és fraccional Mandelbrot va introduir el terme “fractal” per a referir-se a tots aquells objectes complexos la dimensió dels quals no és entera (p.ex. 1, que seria la dimensió d'una recta).

Figura 1. Longitud de la costa en funció de l'escala de mesura (unitats arbitràries).



Els objectes fractals es caracteritzen per l'autosimilitud, són autosimilars, potser la propietat més coneguda. Vol dir senzillament que, a diferents escales, l'objecte sembla igual. En el cas de la costa britànica (i de qualsevol fractal natural) l'autosimilitud és estadística, és a dir, no exacta (com seria el cas dels fractals matemàtics) i com que ve de la invariància d'escala, la manera d'avaluar-la consisteix a examinar l'objecte a diferents escales (com el regle de l'exemple, però també podem pensar en superfícies o volums, i en aquests casos en comptes de regles podríem emprar rajoles o cubs i aplicar el mateix raonament), calcular-ne la llargària (o la superfície o el volum) i veure si la relació entre la mida de l'escala emprada i aquesta mesura es manté constant en una gràfica log-log. Si és així, el pendent de la recta que identifica aquesta constància serà la dimensió fractal o d'autosimilitud.

Figura 2. Log-log plot de la relació entre la longitud de la costa i l'escala de mesura.



L'interès dels fractals

Potser us preguntareu què té a veure tot això (costes geogràfiques, coliflors...) amb l'estudi del comportament humà. Doncs resulta que, des d'aquell llunyà 1967, s'ha anat veient que de fractals i de relacions del tipus power-law n'hi ha per tot arreu (des dels terratrèmols fins al funcionament cerebral i els processos cognitius, passant per l'estructura d'òrgans com els pulmons, la distribució dels valors dels salaris de la població o la dels habitants de les ciutats d'un país) i, el que és més important, la invariància d'escala sembla ser una característica essencial dels sistemes vius. Cal primer de tot aclarir que, a més de les estructures fractals (objectes) existeixen els fractals temporals, és a dir, sèries de dades que amaguen patrons fractals. Com en el cas dels objectes, aquestes sèries temporals són autosimilars, de manera que es poden veure patrons semblants quan les mirem a escales temporals (o resolucions) diferents. D'exemples n'hi ha molts, però els que poden quedar més a prop dels nostres interessos són els relacionats amb sistemes fisiològics (el cardiovascular o el respiratori), neurals i del comportament (l'auto-estima, l'estat d'ànim, l'ansietat...). En tots aquests sistemes s'ha trobat evidència d'autosimilitud i invariància d'escala (en anglès se sol utilitzar el terme *scaling* per a referir-s'hi) mitjançant diverses tècniques entre les quals destaca l'anàlisi de fluctuacions sense tendència (*detrended fluctuation analysis* o *DFA*) perquè es pot aplicar a sèries no estacionàries, que són majoria en l'estudi de sistemes conductuals i fisiològics. Però com dèiem, més important que la constatació d'aquestes propietats fractals és el que signifiquen, i resulta que són indicadores de la salut del sistema. Dit de forma simple: un sistema sa mostra una fractalitat que es veu alterada quan el sistema està malalt (o quan es deteriora amb l'edat).

L'origen dels fractals: la criticalitat i el marcapassos circadiari

Un dels articles més interessants publicats l'any passat sobre aquest tema és el de Pittman-Polletta et al., (2013), però podem esmentar igualment el de Palva, Zhigalov, Hirvonen, Korhonen, Linkenkaer-Hansen i Palva (2013) que examina les relacions entre la fractalitat neuronal i la conductual, i una mica més lluny, conceptualment parlant, el d'Arns, Cerquera, Gutiérrez, Hasselman i Freund

(2013) en què mostren com una mesura de complexitat de l'EEG prediu la manca de resposta a l'estimulació magnètica transcranial en pacients amb trastorn depressiu major.

Centrant-nos en el primer, un concepte clau, relacionat amb la invariància d'escala, és el de criticalitat. De fet, aquest concepte és probablement un dels que s'està imposant més ràpidament en l'estudi de la dinàmica cerebral en els darrers anys (una exhaustiva revisió la podeu trobar a Werner, 2010; i un treball teòric molt interessant és el de Chialvo, 2010), de manera que l'estat del cervell per defecte seria un estat crític, entre l'ordre i l'aleatorietat, que li donaria l'enorme flexibilitat de què és capaç, per exemple per a canviar de tasca gairebé instantàniament. Aquest estat crític es caracteritza per l'existència de scaling i de fet sembla ser el que dona lloc a la fractalitat observada en l'EEG.

L'article de Pittman-Polletta et al. (2013) comença amb una didàctica introducció al tema dels fractals en els sistemes fisiològics. Contraposa les fluctuacions fractals observables en aquests sistemes amb la teoria homeostàtica clàssica segons la qual serien aleatòries i es produirien al voltant d'un valor establert, ja que precisament l'estructura fractal demostra que no són aleatòries i que hi ha múltiples valors, a escales temporals diferents, en comptes d'haver-n'hi només un. Aquesta multiestabilitat suggereix que els sistemes fisiològics fan servir mecanismes de control basats en la criticalitat (West (2006) o Werner (2010) parlen de control al·lomètric) per tal d'evitar tant respostes massa erràtiques com massa rígides als estímuls ambientals.

Cal subratllar que les fluctuacions fractals en els sistemes fisiològics són intrínseques, és a dir, no són degudes a influències externes. Tot i que fractalitat i complexitat no són sinònims, en general una reducció de la fractalitat va associada a una pèrdua de complexitat, i aquestes pèrdues s'observen en sistemes alterats per alguna malaltia o envellits. Utilitzant l'anàlisi DFA, per especificar una mica més, la fractalitat "normal" o saludable vindria representada per un exponent d'escala al voltant d'1 (en el sistema cardíac, les sèries temporals d'interval entre batecs, a escales temporals superiors als 10 batecs, solen tenir exponents de 0.7-0.8), i es pot alterar en dos sentits: apropant-se a 0.5 (excés d'aleatorietat) o superant l'1 (senyal molt correlacionat però sense estructura fractal).

El més important és que aquests canvis en la fractalitat reflecteixen que el sistema ha perdut flexibilitat i adaptabilitat, que ja no pot operar a diferents escales temporals i per tant s'ha tornat més rígid. D'alguna manera podríem dir que no està (o no està tan sovint) en l'estat de criticalitat basal d'on emergeixen els patrons autoorganitzats que el permeten adaptar-se a les demandes entrants. A més, com afirmen Pittmann-Polletta et al. (2013, p.882), el fet que aquests canvis poden precedir els canvis en mesures promig (com la mitjana) indica que els canvis dinàmics són més importants en la definició dels trastorns que aquestes mesures promig.

Finalment els autors emfasitzen el paper del marcapassos circadiari (localitzat en el nucli supraquiasmàtic) en l'origen de les fluctuacions fractals dels diferents sistemes fisiològics (pp. 886 i ss.) i discuteixen breument la utilitat clínica de les troballes que han anat esmentant al llarg de la revisió. Una utilitat que, segons ells, va més enllà de la diagnosi i la prognosi. El coneixement de les propietats fractals i dels mecanismes implicats en la seva gènesi i manteniment podran perfilar en el futur objectius terapèutics per a les intervencions conductuals, farmacològiques i quirúrgiques.

En definitiva, el coneixement de conceptes com el de fractalitat, scaling, criticalitat o multiestabilitat esdevé clau per a una comprensió més plena dels processos neurofisiològics que conformen el substrat del comportament humà en condicions normals i patològiques, I és raonable esperar que d'aquesta comprensió se'n puguin derivar formes d'intervenció més avançades.

Referències

- Arns, M., Cerquera, A., Gutiérrez, R.M., Hasselman, F., & Freund, J.A. (2013). Non-linear EEG analyses predict non-response to rTMS treatment in major depressive disorder. *Clinical Neurophysiology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2013.11.022>
- Bornas, X. (2009). *Psicopatologia i caos*. Madrid: Bubok (<http://www.bubok.es/libros/16327/Psicopatologia-i-Caos>).

- Bornas, X. (2012). *Sistemes dinàmics*. Barcelona, SCRiTC, Actualitzacions SCRiTC 2012 (www.scritc.cat).
- Chialvo, D. (2010). Emergent complex neural dynamics. *Nature Physics*, 6, 744-750.
- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156, 636-638.
- Palva, J.M., Zhigalov, A., Hirvonen, J., Korhonen, O., Linkenkaer-Hansen, K., & Palva, S. (2013). Neuronal long-range temporal correlations and avalanche dynamics are correlated with behavioral scaling laws. *PNAS*, 110, 3585–3590.
- Pittman-Polletta, B.R., Scheer, F.A.J.L., Butler, M.P., Shea, S.A., & Hu, K. (2013). The role of the circadian system in fractal neurophysiological control. *Biological Reviews*, 88, 873-Ar894.
- Werner, G. (2010). Fractals in the nervous system: conceptual implications for theoretical neuroscience. *Frontiers in Physiology*, 1, 1-28.
- West, B.J. (2006). *Where Medicine went wrong. Rediscovering the path to complexity*. Singapore: World Scientific.