

Desxifrant els patrons de les zebres

Mariona Colomer Rosell

Aquest article és una edició d'un reportatge publicat originalment a cienciaoberta.cat.

Ciència Oberta és un projecte de divulgació científica en català iniciat per 5 estudiants de la Facultat de Biologia de la UB, en el qual actualment hi participen més de 15 persones. Al web, cienciaoberta.cat, hi podràs trobar un **reportatge** nou setmanalment, a més d'altres seccions com els **contes científics** o les **experiències**. També pots seguir el projecte a les xarxes socials, tant a [Twitter](https://twitter.com/cienciaoberta) com a [Instagram](https://www.instagram.com/cienciaoberta) (@cienciaoberta), on també es crea contingut divers i atractiu diàriament!



CIÈNCIA OBERTA

DIVULGACIÓ EN CATALÀ

cienciaoberta.cat

Introducció

Per què les zebres tenen ratlles? D'on sorgeix l'estampat dels lleopards? I les taques de les closques dels mol·luscs? Els animals presenten **patrons molt diversos** i com s'originen ha interessat des de fa temps a la comunitat científica.



Fig 1. La coloració de la pell de les zebres, l'estampat dels lleopards, les ales de les papallones o les closques dels mol·luscs estan formats per patrons de Turing. Font: www.freeimages.com

De màquines a animals

Alan Turing (1912 - 1954) va ser un matemàtic anglès famós per la invenció de la “màquina de Turing”, un model idealitzat computacional que ha permès avançar en el camp de la informàtica. També va participar en la descodificació de la criptografia Enigma. A part de desxifrar codis matemàtics però, **Turing també va realitzar importants aportacions a l'àmbit de les ciències de la vida.**

Els dos últims anys de la seva vida va treballar en **el camp de la morfogènesi** que estudia el desenvolupament de la forma en els éssers vius. Turing va investigar com a partir de substàncies químiques es poden originar els patrons que observem en els éssers vius.

Les inestabilitats poden generar patrons

Turing va proposar que els patrons emergeixen gràcies a **la inestabilitat d'un sistema de substàncies químiques**. Ens ho podem imaginar com si la pell dels guepards fos un camp sec on hi ha substàncies activadores que provoquen focs, i substàncies químiques que les inhibeixen.

En aquest hipotètic camp, s'activen diferents fogueres i també es produeixen substàncies inhibidores. Aquestes, aconsegueixen aturar la producció de substàncies activadores de foc al voltant del focus de la foguera principal de manera que el camp queda ple de petits focs aïllats.

En aquest sistema, és important que els inhibidors es moguin més ràpid que les substàncies activadores perquè es puguin formar les fogueres aïllades (els nostres patrons de Turing). Si no fos així, els activadors es podrien escampar per tot el camp i no es formarien taques o ratlles individuals.

La difusió i les reaccions químiques

Per a generar els patrons doncs, hi ha dos fenòmens protagonistes: **la difusió i les reaccions químiques**.

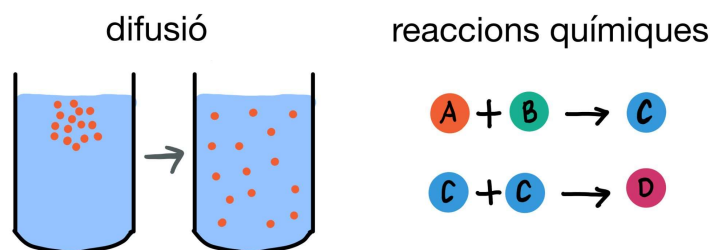


Fig 2. La difusió és un tipus de transport de partícules mentre que les reaccions químiques consisteixen en la transformació de substàncies.

Per una banda, la difusió és un tipus de transport de molècules que té lloc en un medi. Aquest tipus de transport el podem observar quan tirem una gota de pintura en un got d'aigua. El moviment individual de les partícules de pintura provoca que es moguin cap a les regions amb menor concentració de pintura, assolint una concentració homogènia en tota la barreja.

El sistema activador-inhibidor

Per altra banda, tenim el terme de la reacció química. Un dels sistemes que pot originar patrons de Turing és el que es coneix com a **activador-inhibidor**. Tal i com el mateix nom indica, es tracta d'un sistema de dos components on un és una substància química activadora i l'altra inhibidora.

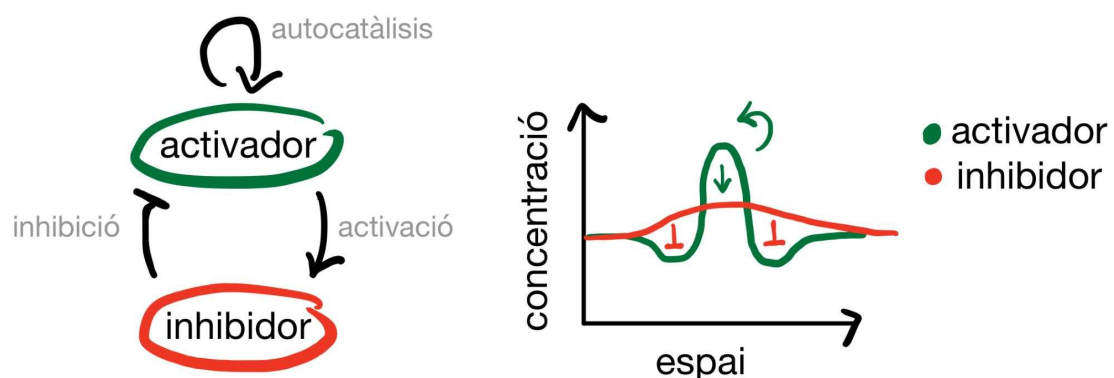


Fig 3. Diagrama del mecanisme activador-inhibidor que genera patrons de Turing.

Tal i com es mostra en el diagrama, l'activador és una substància que s'activa a ella mateixa i promou la producció de la substància inhibidora. Per altra banda, l'inhibidor inhibeix la producció d'activador. Això forma el perfil de "muntanyetes" que es mostra a la Figura 3.

I què passa a la pell dels animals?

A la pell dels animals hi trobem pigments, que són substàncies químiques acolorides. Durant el creixement de l'animal, a la pell s'hi troben diferents tipus de pigment. En el cas dels peixos zebra, uns organismes model molt utilitzats en investigació, es tracta de **pigments melanòfors** (marró-negre), **xantòfors** (groc) i **iridòfors** (iridescent). Els pigments interaccionen entre si formant patrons de Turing amb els respectius colors.

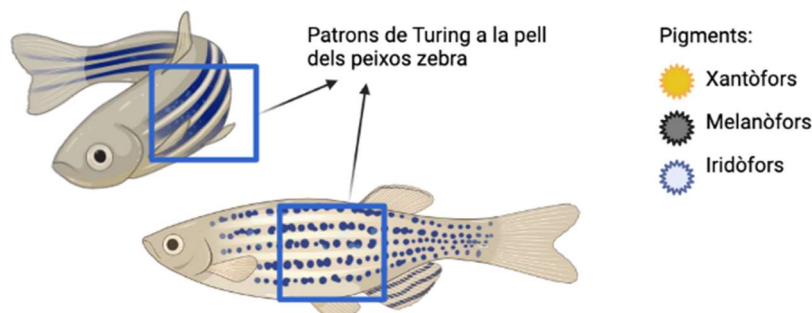


Fig 4. La interacció entre els diferents pigments resulta en la formació de patrons de Turing.
Creat amb BioRender.

Simulació del model

A partir d'una graella amb valors aleatoris d'una substància activadora i una substància inhibidora, podem veure com el sistema evoluciona amb el temps cap a la formació d'un patró que ens pot recordar a la pigmentació de la pell dels animals.

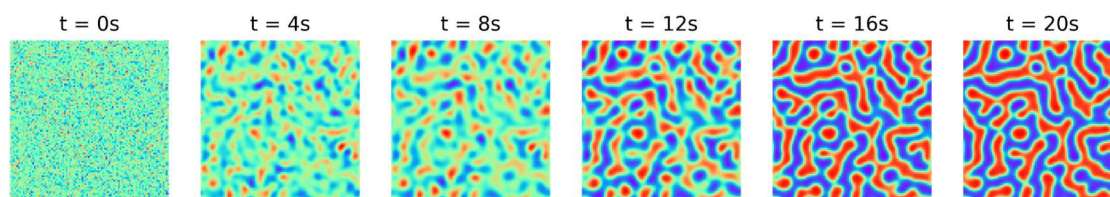


Fig 5. Evolució temporal del model de FitzHugh-Nagumo que dóna lloc a un patró de Turing.

Un sistema que pot conduir a la formació de patrons és el **model de Gray-Scott** que va ser desenvolupat el 1980. Es tracta del model químic més simple que condueix a oscil·lacions, i sota algunes condicions particulars, poden formar patrons de Turing.

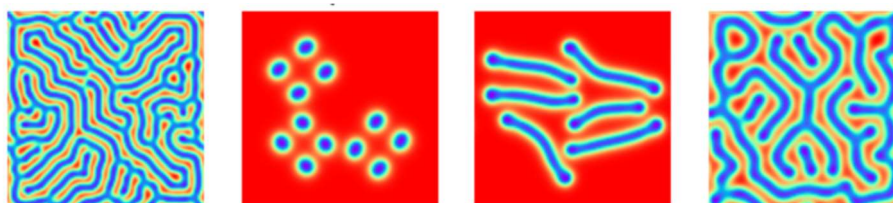


Fig 6. Patrons de Turing creats a partir del model de Gray-Scott.

Depenent de les velocitats de les reaccions químiques implicades en el model i les constants de difusió, els patrons formats poden ser tant diversos com taques, laberints o franges tal i com es veu en les simulacions realitzades. Els patrons obtinguts són molt diversos i depenen dels paràmetres de les equacions diferencials que descriuen l'evolució temporal de les concentracions de les substàncies químiques així com de les condicions inicials del sistema.

Ja per acabar...

Els patrons de Turing són un mecanisme que permet explicar com a partir de **sistemes amb dos components químics es poden originar patrons** tan diversos com les taques o les ratlles que observem en el món animal. A més, no només són importants per la pigmentació de la seva pell sinó que també tenen **rellevància en el desenvolupament de parts de l'organisme** com la formació dels dígit de les extremitats.

A banda dels patrons de Turing, hi ha altres mecanismes que permeten la generació de patrons complexos en els organismes com les **ones viatgeres** o la **quimiotaxi**.

Finalment, els patrons de Turing són una mostra de com **les lleis de la física** ens poden ajudar a entendre com s'organitzen els éssers vius i la formació d'estructures complexes en la natura.

Bibliografia:

Turing, A. M. (1990). The chemical basis of morphogenesis. *Bulletin of mathematical biology*, 52(1), 153-197.

Murray, J. D. (2001). *Mathematical biology II: spatial models and biomedical applications* (Vol. 3). Springer-Verlag.

Nakamasu, A., Takahashi, G., Kanbe, A., & Kondo, S. (2009). Interactions between zebrafish pigment cells responsible for the generation of Turing patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8429-8434.

Leppänen, T. (2004). *Computational studies of pattern formation in Turing systems*. Helsinki University of Technology.

Raspopovic, J., Marcon, L., Russo, L., & Sharpe, J. (2014). Digit patterning is controlled by a Bmp-Sox9-Wnt Turing network modulated by morphogen gradients. *Science*, 345(6196), 566-570.