Taller de simulació medi–ambiental

Destrucció de l'hàbitat

Juan Carlos Cañadas* i Jordi Sellarès†

12 de febrer de 2002

Juan Carlos Cañadas
Barcelona (1963)
Doctor en Física
Dept. de Física i Eng. Nuclear (ETSEIT)
Universitat Politècnica de Catalunya

Jordi Sellarès
Barcelona (1969)
Doctor en Física
Dept. de Física i Eng. Nuclear (EUETIT)
Universitat Politècnica de Catalunya

*juan.carlos.canadas@upc.es
†jordi.sellares@upc.es

Índex

Presentació

Quan parlem de destrucció de l'hàbitat tothom té al cap una idea molt a grans trets del fenomen, desprovista de qualsevol subtilesa. Així doncs, pensem sovint en una destrucció massiva i lineal. Es comença a destruir un ecosistema per una banda i s'acaba de destruir per la banda contraria.

Potser en ocasions ha estat així, especialment quan la destrucció ha estat ocasionada per la construcció de grans obres d'enginyeria. Podem citar el cas dels grans embassaments d'aigua, entre d'altres.

No obstant, en la major part dels casos, la destrucció d'un ecosistema és un procés lent que no té una localització definida. Els seus efectes no es deixen sentir d'immediat. De fet, un ecosistema es pot destruir en certa mesura sense que els efectes siguin evidents. Sovint, però, els efectes de la destrucció arriben de sobte, sense que res indiqui que la destrucció d'un petit percentatge de l'hàbitat tindrà una repercusió sobre el sistema que no ha tingut el conjunt dels canvis precedents.

Això sol passar en aquelles situacions en que la destrucció de l'hàbitat no segueix una sistemàtica sinó que es va duent a terme en petits pasos localitzats aleatòriament en l'espai i en el temps.

Pensem, per fixar idees, en la urbanització d'una àrea forestal. En primer lloc, potser s'establiran unes poques explotacions agrícoles, ben separades. Més endavant, s'establiran petits nuclis de xalets, també situats a l'atzar. El procés continuarà amb l'aparició dels nous nuclis i el creixement dels ja existents. L'hàbitat original es conservarà en certa mesura però cada cop en porcions més petites i nombroses.

En una situació com la que hem esmentat, cal esperar que els efectes de la *fragmentació* de l'hàbitat siguin més importants que els de la seva destrucció propiament dita. En aquesta unitat estudiarem de forma qualitativa però formal els motius d'aquest fenomen i en destacarem la seva universalitat. En altres paraules, veurem que els mateixos motius que l'expliquen, es poden trobar en una gran varietat de situacions físiques. Finalment, proposarem maneres de minimitzar l'impacte d'aquests canvis, en el cas que sigui impossible evitar-los.

Objectius

- Entendre el concepte geomètric de percolació.
- Coneixer les propietats de l'estat crític i remarcar la seva universalitat.
- Presentar un autòmat cel.lular per modelitzar la destrucció d'un hàbitat.
- Constatar que els efectes de la fragmentació no són proporcionals a la quantitat d'hàbitat destruit.
- Enunciar els diferents efectes de la fragmentació de l'hàbitat.

Esquema

1. Concepte de percolació
2. La percolació com a fenòmen crític
    (a) Concepte de transició de fase
    (b) Què són els fenómens crítics?
    (c) Temperatura, paràmetre d'ordre i longitud de correlació
3. Un model simplificat de destrucció de l'hàbitat
4. Efectes de la fragmentació de l'habitat
    (a) Efecte de vores
    (b) Estocasticitat demogràfica
    (c) Deriva genètica

1 Concepte de percolació

Considerem un tauler de caselles quadrades que poden estar en dos estats diferents. Anomemenem a un estat "ocupatï a l'altre "buidï comencem amb un tauler a on totes les caselles estiguin ocupades.

Cada casella del tauler tindrà 4 veïnes: la de dalt, la de sota, la de l'esquerra i la de la dreta.

Pensem ara en un camí que vagi des de la part superior del tauler fins a la part inferior. Aquest camí ha de creuar el tauler passant d'una veïna a l'altra i, per tant, podrà tenir segments verticals i horitzontals però en cap cas diagonals (veure Fig. 1).

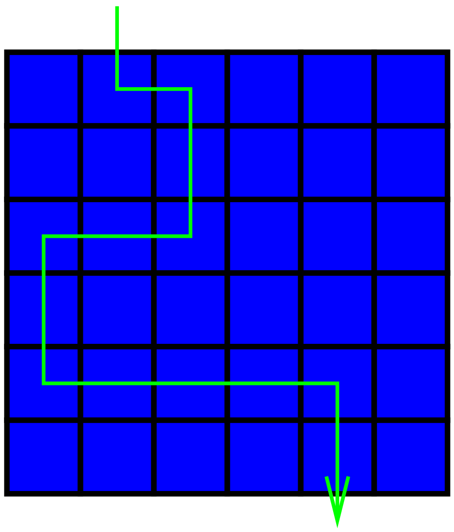

Figura 1: Exemple de camins en un tauler

És trivial veure que tots els camins que compleixen la condició anterior passen tan sols per caselles ocupades. De fet, diem que hi ha *percolació* quan hi ha almenys un camí, que travessa el tauler passant d'una casella veïna a una altra, format tan sols per caselles ocupades.

Ara, escollim una casella a l'atzar i la "buidem". Segurament hi continurà havent percolació. Buidem-ne una altra i anem repetint aquest procés en succesives vegades (veure Fig. 2).

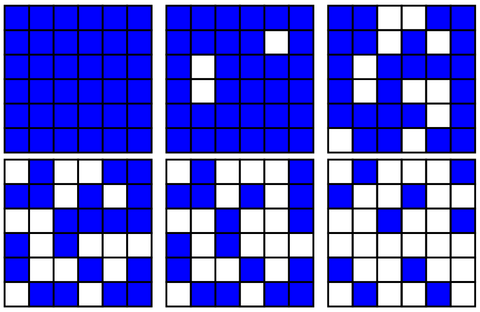

Figura 2: A mida que anem buidant caselles es fa més difícil trobar un camí que travessi el tauler

Arribarà un moment en que ja no serà possible trobar un camí de les característiques esmentades abans. Llavors, hi deixarà d'haver percolació.

El problema de la percolació està relacionat amb el problema de la mida de l'illa més gran. Entenem que dues caselles formen part de la mateixa illa si es possible establir un camí entre les dues caselles que vagi passant per caselles veïnes i, a més, totes les caselles per on passa el camí estan ocupades (veure Fig. 3)

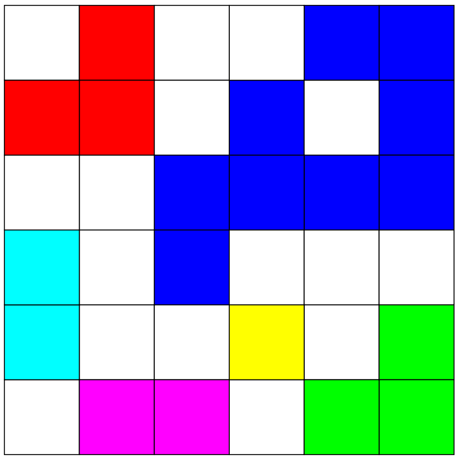

Figura 3: Les illes estan pintades amb colors diferents

Quan totes les caselles estan ocupades, l'illa més gran és, senzillament, tot el tauler. Si buidem unes poques caselles, l'illa més gran ja no estarà formada per totes les caselles del tauler, però sí per totes les caselles ocupades. Ara bé, si continuem amb el procés de buidar caselles arribarà un moment en que l'illa més gran ja no estarà formada per la totalitat de les caselles ocupades. A partir d'aquí, l'illa més gran estarà formada per cada cop menys caselles fins que al final del procés tindrà una sola casella.

Tal com ho hem presentat, la percolació és un fenomen geomètric. Tanmateix, hi ha molts fenomens a la vida real que es poden modelar mitjançant la percolació. Per posar uns pocs exemples, mencionem la ruptura d'un dielèctric (veure glossari), l'extinció natural d'un incendi, el contagi de malalties i la permeabilitat d'una roca.

De fet, aquest darrer cas va ser el que va esperonar l'estudi de la percolació, pensant sobre tot en les aplicacions a l'extracció de petroli.

Curiositat: La preparació de cafè també és un procés de percolació. Si ho dubteu, proveu de fer-vos el cafè amb una quantitat de cafè clarament inferior a la que hi cap a la cafetera

2 La percolació com a fenòmen crític

2.1 Transicions de fase de primer i segon ordre

Ara que hem vist intuitivament en què consisteix la percolació, cal fer una petita disgressió cap a altres temes, per poder ser capaços d'entendre-la des d'un punt de vista formal.

Parlem en primer lloc de les transicions de fase. Tothom identifica fenomens quotidians, com l'ebullició de l'aigua o la fusió del gel, com a transicions de fase. El més característic de les *transicions de fase* és que tenen lloc quan a una substància es produeix un canvi de les propietats relacionades amb *l'ordre a nivell microscopic*. Per exemple, és molt diferent l'ordenació de les mol.lecules d'aigua quan formen un cristall de gel que quan formen aigua en estat líquid. Un altre tret destacable és que tan sols té sentit parlar de transicions de fase en sistemes formats per moltíssimes mol.lecules.

Per fixar idees, centrem-nos en el cas de l'aigua. Per a una pressió i una temperatura donades tan sols hi ha una fase en la que es pugui trobar. Podem fer un *diagrama de fases* que reculli informació experimental i ens indiqui quina és aquesta fase, en funció de la temperatura i de la pressió (veure Fig. 4).

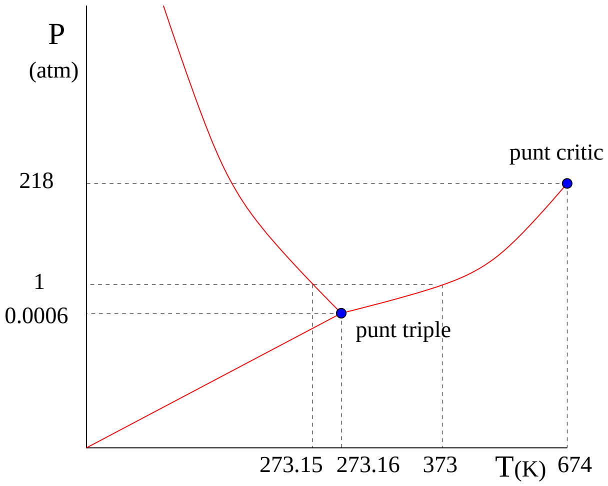

Figura 4: Diagrama de fases de l'aigua

Les línies que separen les fases s'anomenen *línies de coexistència*. Ens indiquen per a quins valors de temperatura i pressió podem tenir en equilibri dues fases simultaniament.

El *punt crític*, per la seva banda, és el final de la línia de coexistència líquid–vapor. Per a temperatures o pressions superiors a la del punt crític no hi ha una diferència clara entre la fase líquida i la fase gasosa.

Si volem dur el sistema des d'un punt situat en una fase fins a un altre punt situat en una fase diferent, probablement haurem de creuar una línia de coexistència. En aquest moment tindrà lloc una *transició de fase de primer ordre*. Aquest tipus de transició es caracteritza per que mentre succeeix, la capacitat calorífica (veure glossari) és fa infinita. Fixem-nos, sense anar més lluny, en l'ebullició de l'aigua. Comença a bullir quan arriba als 100 C i fins que no s'ha convertit completament en vapor no és possible augmentar la seva temperatura. Tota l'energia suministrada s'inverteix en alterar l'ordre de les mol.lecules.

Mentre dura la transició de primer ordre, l'aigua es troba a la línia de coexistència i per tant hi haurà una barreja de dues fases.

Si observem el diagrama de fases, és possible passar de la fase líquida a la gasosa sense passar per la línia de coexistència, fent un tomb que passi "per sobre" del punt crític. Encara que sembli mentida, això és possible i el resultat és que haurem convertit l'aigua líquida en vapor d'una manera gradual, sense cap canvi brusc i, per tant, sense cap transició de fase.

Finalment, és possible anar de la fase líquida a la fase gasosa "trepitjant" el punt crític. A sobre del punt crític tindrà lloc el que s'anomena una *transició de fase de segon ordre*. Des del punt de vista termodinàmic, la capacitat calorífica no es fa infinita durant aquest tipus de transició. Tan sols canvia de valor abruptament, però sense divergir en cap moment.

Abans de passar al proper apartat, pots fer l'activitat 1.

Curiositat: El gel és tan sols una de 8 fases sólides en què pot existir l'aigua, encara que les altres tan sols es poden presentar en condicions artificials de pressió i temperatura.

2.2 Fenòmens crítics

Una transició de fase de segon ordre és un cas particular de *fenomen crític*. No és difícil veure que en el punt crític l'aigua es troba en un estat amb unes propietats molt particulars.

Quan som al punt crític, una petita variació de la pressió o de la temperatura pot fer que el sistema passi a l'estat líquid, a l'estat gasós, a una barreja dels dos o a un estat on ambdues coses són el mateix.

Suposem que tenim aigua en un punt de la línia de coexistència. Si observem el sistema des de lluny, observarem regions en estat líquid i regions en estat gasós. Potser observarem que aquestes regions tenen mides molt diferents però si ens mirem el sistema de més a prop veurem que cadascuna d'aquestes zones té una mida finita i es troba en un estat ben definit (veure Fig. 5).

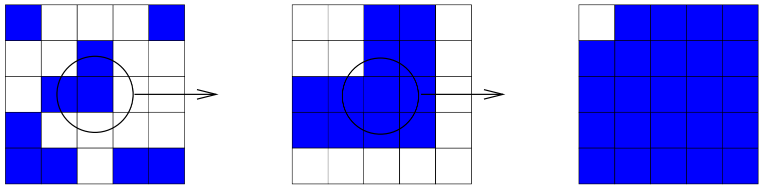

Figura 5: Sistema a la línia de coexistència, vist a vàries escales

A primer cop de vista, no observarem cap diferència al punt crític. De nou tindrem una distribució de regions líquides i gasoses de diverses mides. No obstant, si ho mirem de més a prop no podrem trobar una regió que estigui clarament en fase líquida o en fase gasosa. A mida que ens acostem, se'ns apareixeran nous detalls que faran que mai es vegi una zona que estigui en una fase ben definida (veure Fig. 6)

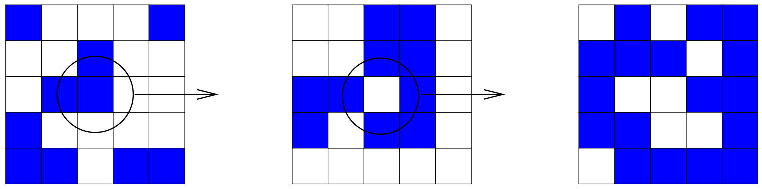

Figura 6: Sistema al punt crític, vist a vàries escales

Resumint, la diferència entre el punt crític i la línia de coexistència és que al punt crític el sistema té el mateix aspecte a qualsevol escala. En altres paraules té una *estructura fractal*.

Comentem molt breument tres quantitats, que ens faran servei més endavant. Són la *temperatura crítica*, el *paràmetre d'ordre* i la *longitud de correlació*.

La temperatura crítica és la temperatura a la que té lloc la transició de fase de segon ordre. El paràmetre d'ordre és una quantitat que val 1 a la fase més ordenada i 0 a la fase més desordenada. Normalment, és el promig d'una quantitat microscòpica. Finalment, la longitud de correlació és la distància a la qual arriba la influència d'una mol.lecula. En principi les forces entre mol.lecules són de curt abast però les caracteristiques del punt crític fan que, com a les figures fetes amb fitxes de dominó, la influència d'una mol.lecula arribi a qualsevol punt del sistema. Així doncs, la longitud de correlació es fa infinita o, com a mínim, del mateix ordre de magnitud que la mida del propi sistema.

2.3 Aplicació a la percolació

La percolació és en realitat un concepte geomètric i no un fenomen físic. Aixi i tot, els conceptes que s'utilitzen per a l'estudi dels fenomens crítics es poden aplicar sense cap problema.

Tornem al tauler ple de caselles i mirem com podem aplicar aquestes idees. En primer lloc ens cal un concepte que sigui equivalent al de temperatura. Podem interpretar que els taulers de la Fig. 2 són a "temperatures" diferents. Recordem que la diferència entre aquests taulers tan sols és el nombre de caselles ocupades, després d'un procés consistent en anar buidant caselles de manera aleatòria. Agafarem, doncs, com a temperatura (en rigor, com a inversa de la temperatura) *la fracció de caselles ocupades*.

$$\beta = \frac{n_o}{n} = \frac{n_o}{n_o + n_b}$$

Definirem la fase ordenada com aquella a on els camins per creuar el sistema passant per caselles ocupades són molt abundants. La fase desordenada serà, en canvi, aquella a no hi haurà aquest tipus de connexió entre els extrems del sistema.

Abans hem vist que això també es pot expressar mitjançant la mida de l'illa més gran. A la fase ordenada totes les caselles ocupades formaran part de l'illa més gran. En canvi, a la fase desordenada fins i tot l'illa més gran estarà formada per una sola casella. Ens cal un nombre que sigui igual a 1 en el primer cas i igual a 0 en el segon. Anomenem n_{max} a la mida de l'illa més gran. El paràmetre d'ordre serà

$$\theta = \frac{n_{max}}{n_o}$$

Pel que fa a la longitud de correlació, podem considerar que n_{max} és una quantitat més o menys equivalent.

Cal tenir una idea ben clara: si apliquem aquestes definicions a un tauler de 20×20, no obtindrem una transició de fase. Si tinguessim una transició de fase de veritat aniriem treien caselles de manera aleatòria i en un cert moment el valor de la variable θ passaria de sobte de 1 a 0. Recordem que les transicions de fase necessiten de la participació d'infinites partícules (en aquest cas, caselles).

El que obtindrem és un comportament semblant al d'una transició de fase. El parametre d'ordre θ valdrà gairebé 1 per a un bon interval de la variable β, tindrà una baixada acusada i finalment assolirà un valor de gairebé 0 pels valors més petits de β.

Això sí, com més caselles fem servir, més semblant serà el comportament del sistema al d'una transició de fase.

Pots posar en pràctica aquests conceptes tot fent l'activitat 2.

3 Model d'autòmat cel.lular per a la destrucció de l'hàbitat

Ha arribat el moment d'aplicar tot el que hem vist sobre la percolació a la destrucció de l'hàbitat. Per fer-ho, construirem un autòmat cel.lular que ens permeti estudiar com evoluciona el nombre de membres d'una espècie a un hàbitat parcialment destruit.

Recordem que un autòmat cel.lular és un conjunt de caselles, que poden estar en varis estats. Les caselles van evolucionant per torns. S'ha de complir que l'estat de cada casella depengui tan sols de l'estat d'altres caselles veïnes a l'instant anterior i/o de la seva pròpia història. En cas contrari, no es tracta d'un veritable autòmat cel.lular.

L'autòmat que farem servir consistirà en un tauler quadrat de caselles. Cada casella representarà un tros de territori. La principal novetat d'aquest autòmat és que una part de les caselles estaran "inutilitzades". Aquestes caselles representen l'hàbitat destruit i en cap cas podran allotjar vida. Aquestes caselles seran en un estat que anomenarem *inhabitable.*

Ara entra en joc el concepte de percolació. Intentarem simular la destrucció de l'hàbitat amb el mateix procès que hem emprat abans per fer canviar la "temperatura" del sistema. Anirem marcant caselles com a inhabitables de manera aleatòria. El nombre de caselles de caselles que farem inhabitables dependrà del grau de destrucció de l'hàbitat que es vulgui simular.

El resultat es que el tauler ara té dos tipus de caselles, les inhabitables i les habitables. Les caselles habitables representen la part del territori que encara és capaç de mantenir vida. Si observem la seva configuració, estarà format per illes més o menys grans depenent del grau de destrucció de l'hàbitat.

Aquesta configuració geomètrica de les caselles que poden sustentar vida és la clau del model.

Per la seva banda, les caselles habitables podran estar en dos estats diferents, segons hi hagi vida o no. Anomenarem aquests estats *habitat* i *habitable no habitat*, respectivament. Es pot passar de qualsevol d'aquests dos estats a l'altre. La vida en una casella habitada es pot extingir per causes naturals i llavors passa a habitable no habitada. Al contrari, una casella habitable però no habitada podrà ser colonitzada si té una casella habitada com a veïna.

En resum, en el nostre autòmat hi haurà tres tipus de caselles: inhabitables, habitables no habitades i habitades. En concret farem servir aquestes regles:

1. Una casella inhabitable sempre serà inhabitable.
2. Una casella habitable que tingui, com a mínim, una veina habitada té una probabilitat del 20% d'esdevenir habitada al torn següent.
3. Una casella habitada té una probabilitat del 20% de convertir-se en habitable en el torn següent.

La simulació es desenvolupara segons el passos que es poden veure a la Fig. 3. En primer lloc, dividirem les caselles en inhabitables i habitables, escollint aleatòriament un nombre donat d'inhabitables. Després escollirem un altre nombre donat de caselles habitables i les marcarem com a

habitades. A partir d'aquest moment, aplicarem les regles de l'autòmat per fer evolucionar el sistema.

El sentit comú ens diu que el nombre de caselles habitades inicialment ha de jugar un cert paper i també que la destrucció d'un cert percentatge de l'hàbitat comportarà, a llarg termini, una reducció proporcional de l'espècie que l'habita.

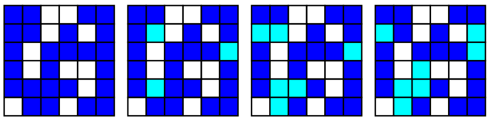

Figura 7: Regles de l'autòmat cel.lular

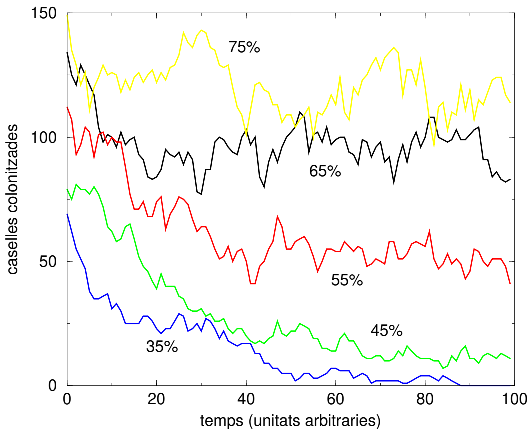

Figura 8: Evolució en funció de la destrucció de l'hàbitat

Els resultats de l'autòmat cel.lular, que es poden observar a la Fig. 8, indiquen tot el contrari: la reducció és més forta que si fos proporcional i per sota d'un cert umbral l'espècie s'extingeix encara que la destrucció de l'hàbitat no sigui total.

A més, el resultat final no depèn del nombre inicial de caselles habitades. Al final, el destí de l'espècie depèn tan sols de la geometria de l'espai que pot colonitzar.

Per entendre el perquè d'aquests resultats cal recordar el concepte de percolació i el de transició de fase, no sense certes precaucions. Podem anar buidant caselles d'un tauler sense que hi deixi d'haver percolació o, vist des d'un altre punt de vista, sense que l'hàbitat es fragmenti significativament. Ara bé, a partir d'un cert moment, que coincideix amb la β crítica de la percolació, una petita destrucció de l'hàbitat comportarà una fragmentació molt gran.

Deduim, per tant, que la destrucció d'un cert percentatge de superfície pot tenir efectes molt diferents depenent del grau de destrucció previ de l'hàbitat. En qualsevol cas, la fragmentació juga un paper determinant en l'impacte de la destrucció de l'hàbitat

4 Efectes de la fragmentació de l'hàbitat

La fragmentació afecta a les espècies que habiten un ecosistema de diverses formes, però de fet només n'hi ha una que es tingui en compte a la simulació de l'apartat anterior. Es tracta de *l'efecte de vores*, que és merament geomètric.

Per entendre'l cal seguir la Fig. 9. En ambdues configuracions la probabilitat de que una casella habitada es converteixi en deshabitada és la mateixa. En el cas amb hàbitat no destruit això es veu compensat pel fet que hi ha 8 caselles per colonitzar mentre que en el cas amb hàbitat destruit n'hi ha exactament la meitat.

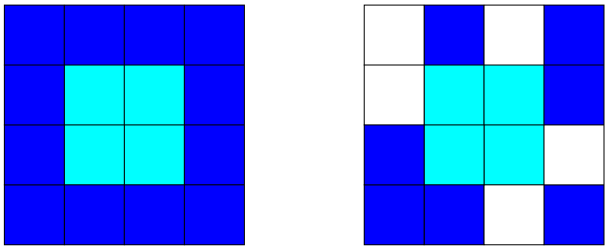

Figura 9: Efecte de vores

Aquest efecte es dóna en certa mesura en la realitat, però n'hi d'altres tan importants com aquest o més.

Ja hem vist en què consisteix *l'estocasticitat demogràfica*. Basicament, es deguda a la dispersió en el nombre de descendents dels membres d'una espècie. El resultat és una aleatorietat en el nombre de membres que és molt més important per a poblacions petites. Aquestes fluctuacions (veure glossari) aleatòries del nombre de membres d'una espècie poden portar a la seva extinció. La fragmentació potencia els efectes de l'estocasticitat demogràfica en reduir la mida de les poblacions.

Un altre efecte important és el de la *deriva genètica* que es produeix quan un nombre relativament petit de membres d'una espècie queden aïllats. Si un dels membres de l'espècie té, per casualitat, un tret hereditari (veure glossari) que sigui rar en poblacions grans, automàticament passa a ser més freqüent en aquest àmbit més reduit. Per aquest motiu, malalties hereditàries molt poc freqüents poden arribar a convertir-se en habituals en poblacions aïllades. El resultat és un afebliment de la població que pot dur, en casos extrems, a la seva desaparició.

Curiositat: La sordera és molt habitual a l'aïllat poble de Taras (Costa Rica). Els registres parroquials demostren que els causants són una parella de fa quatre segles.

La solució en els tres casos és la mateixa: trencar la fragmentació. La forma menys costosa de fer-ho és mitjançant la construcció de *corredors biològics*. Es tracta de zones amb una superfície relativament petita que connecten zones que altrament estarien aïllades. Els corredors han d'estar protegits per tal que permetin el pas d'essers vius entre diferents arees. A la Fig. 10 s'hi pot veure un exemple.

Figura 10: Exemple de protecció amb corredors biològics

Resum

S'ha vist el tema de la destrucció de l'hàbitat des d'un punt de vista diferent a l'habitual. Per comptes de preocupar-nos dels efectes obvis deguts a la disminució de la mida, hem mirat de quantificar els efectes causats per la fragmentació.

Per poder-ho fer, ha estat útil el concepte de percolació, que en principi és un concepte merament geomètric. A més, ha fet falta introduir el comportament crític, que és una de les característiques més notables de la percolació. Tot això ens ha permès fer una analògia amb les transicions de fase. El grau de destrucció té un paper semblant al de la temperatura de manera que, a partir d'un cert grau de destrucció, les propietats de l'hàbitat canvien radicalment, com a mímim pel que fa a la fragmentació.

Hem introduit un autòmat cel.lular per estudiar aquest comportament. Una anàlisi dels resultats ens confirma que malgrat la senzillessa de les seves regles es capaç de tenir en compte la fragmentació. Ara be, aquesta mena de models tan sols poden tenir en compte els efectes geomètric com ara l'efecte de vores. A la realitat, caldria afegir-hi altres efectes negatius produits per la fragmentació, com l'estocasticitat demogràfica o la deriva genètica.

En qualsevol cas, la conclussió més important és que els efectes de la fragmentació poden arribar a ser més importants que els derivats de la disminució de l'espai disponible. Segons el model estudiat, que no té en compte tots els efectes negatius possibles, una espècie es pot extingir malgrat que encara li quedi una certa fracció d'hàbitat disponible. Per aquest motiu, és imprescindible establir corredors biològics per disminuir l'impacte de la destrucció de l'hàbitat.

Glossari

capacitat calorífica És una quantitat que ens indica la quantitat de calor necessària per augmentar la temperatura d'un material.

dielèctric Material pel qual no hi pot circular el corrent elèctric.

fluctuacions Variacions al voltant d'un valor mig, degudes normalment a causes aleatòries.

tret hereditari Característica que es deguda al genoma i no al medi ambient. Es transmet als descendents.

Referències addicionals

- **Ricard V. Solé i Susanna C. Manrubia:** *Orden y caos en sistemas complejos.* Edicions UPC, Barcelona (1996).

  Llibre sobre caos amb molts apartats referents a les equacions de la Biologia Matemàtica.

Activitats

1. Busca en un llibre de Termodinàmica o de Física General un exemple de transició de fase de primer ordre i un altre de transició de fase de segon ordre.

2. Pel tauler de la Fig. 11 troba

   (a) La fracció de caselles ocupades

   (b) La mida de l'illa més gran

   (c) El paràmetre d'ordre

   (d) Un histograma de les mides de les illes

   Considera condicions de contorn toroidals (la primera casella d'una fila es veïna de la darrera i el mateix passa a una columna).

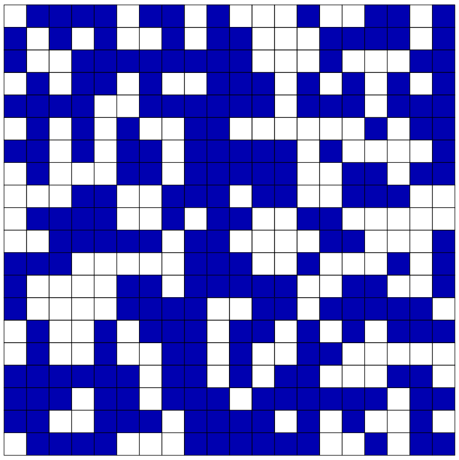

Figura 11: Exemple de percolació

3. Realitza les activitats descrites al guió de pràctiques corresponent a aquesta unitat.

Exercicis d'autocomprovació

1. Quin d'aquests fenòmens no té res a veure amb la percolació
   (a) La propagació d'un rumor
   (b) Una epidèmia
   (c) La caiguda d'un llamp
   (d) Tots els anteriors hi tenen a veure
2. A una transició de fase de primer ordre, la magnitud que es fa infinita és
   (a) El volum
   (b) La temperatura
   (c) La capacitat calorífica
   (d) La pressió
3. Una característica dels fenòmens crítics és que ...
   (a) tenen a veure amb els fractals.
   (b) tan sols es poden observar al laboratori.
   (c) no han estat molt estudiats pels científics.
   (d) Cap de les anteriors.
4. Les regles de l'autòmat cel.lular que s'ha presentat no permeten que ...
   (a) una casella habitable no habitada es converteixi en habitada.
   (b) una casella habitada es converteix en habitable no habitada.
   (c) augmenti el nombre de caselles habitades.
   (d) una casella inhabitable es converteixi en inhabitable.
5. Quina de les següents afirmacions sobre la deriva genètica es falsa
   (a) És el principal mecanisme que ha dut a la diferenciació dels essers humans
   (b) És el motiu pel qual algunes malalties hereditàries siguin endèmiques en comunitats aïllada.
   (c) Sempre produeix l'afebliment d'una comunitat aïllada.
   (d) Totes són certes

Solucions dels exercicis d'autocomprovació

1. (d) 2. (c) 3. (a) 4. (d) 5. (c)