

Algorismia

Estudi Experimental de Connectivitat i Percolació de Grafs

Pau Belda, Guillem Cabré, Marc Peñalver, Prisca Oleari

Curs 2024-25, Quatrimestre de tardor

Continguts

1	Definicions	2
1.1	Percolació	2
1.2	Transició de Fase	2
1.3	Objectius de la Experimentació	2
2	Grafs Seleccionats	3
2.1	Erdős-Rényi	3
2.2	Graella Quadrada	3
2.3	Graella Triangular	4
2.4	Graf Geomètric Aleatori	5
2.5	Graf de Barabási-Albert	6
3	Algoritmes	8
3.1	Percolació per Nodes	8
3.2	Percolació per Arestes	8
3.3	Càlcul de Components Connexes	8
4	Experimentació	9
4.1	Metodologia	9
4.2	Programa Main	10
5	Conclusions	11
6	Bibliografia	12
7	Annex	13

1 Definicions

1.1 Percolació

La percolació en un graf G consisteix en eliminar o desactivar nodes o arestes, i posteriorment es mesura com això afecta una certa propietat global del graf. Quan desactivem una aresta o un node, direm que ha tingut una fallida.

En termes generals, l'objectiu és estudiar com el graf passa d'estar completament connectat a parcialment o totalment desconnectat a mesura que es treuen alguns dels seus components. Quan parlem de percolació, considerem una probabilitat p que determina si una component del graf (node o aresta) es desactiva aleatòriament. Aquest mecanisme és especialment rellevant per a l'estudi de xarxes complexes, ja que ens ajuda a comprendre com de robust o vulnerable és el sistema que volem analitzar.

- **Percolació per nodes:** Cada node té una probabilitat p de ser desactivat. Un cop fet això, s'analitza com ha canviat la connectivitat del graf.
- **Percolació per arestes:** En aquest cas, les arestes es desactiven en lloc dels nodes. Això també afecta la connectivitat, ja que les connexions directes entre nodes es perden.

Després d'aplicar el procés de percolació (sobre nodes o arestes), s'obté un graf percolat, que és la versió modificada del graf original, amb una connectivitat reduïda i, possiblement, components desconnectats. Aquest graf l'anomenarem G_p .

1.2 Transició de Fase

Una transició de fase d'un graf per a una propietat concreta Π fa referència a un resultat satisfactori d'un procés de percolació aplicat al graf. En el nostre cas aquesta propietat Π serà la connectivitat del graf.

Definim un resultat com a satisfactori si, donat que es troba una probabilitat de valor q tal que es compleix la propietat Π al graf G_q (definim aquesta probabilitat com q_Π), per als grafs $G_{q'}$ on $q' > q_\Pi$, aquests verifiquen la propietat Π , i als grafs $G_{q'}$ on $q' < q_\Pi$, no la verifiquen (ambdues afirmacions són vàlides si es compleixen amb una probabilitat prou alta).

Quan s'ha obtingut aquest resultat, diem que la propietat Π presenta una transició de fase al voltant de q_Π .

1.3 Objectius de la Experimentació

L'objectiu dels experiments que realitzarem serà analitzar com varia certa propietat Π en funció dels paràmetres n i p . Siguin aquests nombre de nodes, i probabilitat de fallida en el període de percolació del graf G . La propietat Π a analitzar serà la connectivitat dels grafs generats. A més repetirem l'experiment amb diferents grafs inicials connexos. També intentarem explicar possibles anomalies en aquestes transicions de fase.

2 Grafs Seleccionats

2.1 Erdős-Rényi

Algorisme 1 Generació de graf Erdős-Rényi $G(n, p)$

Entrada: n (dimensió de la graella), p (probabilitat d'establir aresta entre nodes)**Sortida:** Graf g

```
1: Inicialitzar el graf  $g$  amb  $n$  nodes
2: for  $i = 0$  fins a  $n - 1$  do
3:   for  $j = i + 1$  fins a  $n - 1$  do
4:     if  $\text{rand01}() < p$  then
5:       Afegir una aresta entre  $i$  i  $j$  al graf  $g$ 
6:     end if
7:   end for
8: end for
9: Retornar el graf  $g$ 
```

El generador de grafs Erdős-Rényi crea un graf aleatoriitzant la connexió entre nodes. Sigui p la probabilitat d'establir una aresta entre qualsevol parell de nodes del graf. Per a cada parell de nodes (i, j) , es genera un nombre aleatori mitjançant la funció $\text{rand01}()$, que retorna un valor entre 0 i 1. Si aquest valor és menor que p , s'estableix una aresta entre i i j . Aquest procés es repeteix per a tots els parells possibles de nodes.

La instrucció $j = i + 1$ en el bucle interior assegura que només es considerin les arestes entre nodes diferents i evita la duplicació d'arestes. Això és important perquè en un graf no dirigit, l'aresta entre i i j és la mateixa que l'aresta entre j i i . D'aquesta manera, es redueix el nombre de connexions a calcular i s'assegura que cada aresta es consideri només una vegada.

2.2 Graella Quadrada

Algorisme 2 Generació de Graf de Graella Quadrada $G(m \times m)$

Entrada: m (dimensió de la graella)**Sortida:** Graf g

```
1: Inicialitzar  $n = m \times m$  (nombre de nodes del graf)
2: Crear un graf buit  $g$  amb  $n$  nodes
3: for  $i = 0$  fins a  $m - 1$  do
4:   for  $j = 0$  fins a  $m - 1$  do
5:      $\text{nodeActual} = i \times m + j$ 
6:     if  $i < m - 1$  then
7:        $\text{nodeFilaInferior} = (i + 1) \times m + j$ 
8:       Afegir una aresta entre  $\text{nodeActual}$  i  $\text{nodeFilaInferior}$ 
9:     end if
10:    if  $j < m - 1$  then
11:       $\text{nodeColumnaDreta} = i \times m + (j + 1)$ 
12:      Afegir una aresta entre  $\text{nodeActual}$  i  $\text{nodeColumnaDreta}$ 
13:    end if
14:   end for
15: end for
16: Retornar el graf  $g$ 
```

El generador de grafs de graella quadrada crea un graf amb una estructura regular en què cada node és adjacent als nodes de la fila superior, inferior, esquerra i dreta, si aquests existeixen. Això s'aconsegueix comprovant per cada node si existeixen nodes a la fila inferior i a la columna dreta, i si és així, s'afegeixen

les arestes corresponents.

2.3 Graella Triangular

Algorisme 3 Generació de Graf de Graella Triangular $G(rows)$

Entrada: $rows$ (nombre de files)

Sortida: Graf g

```
1: Inicialitzar  $n = \frac{rows \times (rows+1)}{2}$  (nombre de nodes del graf)
2: Crear un graf buit  $g$  amb  $n$  nodes
3:  $nodeActual = 0$ 
4: for  $i = 0$  fins a  $rows - 1$  do
5:     for  $j = 0$  fins a  $i$  do
6:         if  $j < i$  then
7:              $nodeDreta = nodeActual + 1$ 
8:             Afegir una aresta entre  $nodeActual$  i  $nodeDreta$ 
9:         end if
10:    if  $i < rows - 1$  then
11:         $nodeInferiorEsquerra = nodeActual + i + 1$ 
12:        Afegir una aresta entre  $nodeActual$  i  $nodeInferiorEsquerra$ 
13:         $nodeInferiorDret = nodeActual + i + 2$ 
14:        Afegir una aresta entre  $nodeActual$  i  $nodeInferiorDret$ 
15:    end if
16:     $nodeActual = nodeActual + 1$ 
17: end for
18: end for
19: Retornar el graf  $g$ 
```

El generador de grafs de graella triangular crea un graf amb n nodes, on $n = 1 + 2 + 3 + \dots + rows = \frac{rows \times (rows+1)}{2}$. Aquests nodes tenen una estructura en què cada node està connectat als veïns de la dreta i l'esquerra, així com als nodes superiors i inferiors, tant a l'esquerra com a la dreta, sempre que aquests existeixin. Això s'aconsegueix comprovant per a cada node si hi ha nodes a la fila inferior i a la columna dreta, i si és així, s'afegeixen les arestes corresponents.

2.4 Graf Geomètric Aleatori

Algorisme 4 Generació de Graf Geomètric Aleatori $G(n, r)$

Entrada: n (nombre de nodes), r (radi de connexió)

Sortida: Graf g

```
1: Crear un graf buit  $g$  amb  $n$  nodes
2: Inicialitzar un vector de coordenades  $coords$  de longitud  $n$ 
3: for  $i = 0$  fins a  $n - 1$  do
4:    $coords[i].x = \text{rand01}()$ 
5:    $coords[i].y = \text{rand01}()$ 
6: end for
7: for  $i = 0$  fins a  $n - 1$  do
8:   for  $j = i + 1$  fins a  $n - 1$  do
9:      $dist_x = coords[i].x - coords[j].x$ 
10:     $dist_y = coords[i].y - coords[j].y$ 
11:    if  $\sqrt{dist_x^2 + dist_y^2} < r$  then
12:      Afegir una aresta entre  $i$  i  $j$  al graf  $g$ 
13:    end if
14:  end for
15: end for
16: Retornar el graf  $g$ 
```

El generador de grafs geomètrics aleatoris crea un graf amb n nodes, on cada node es col·loca aleatòriament en un espai bidimensional unitari. Dos nodes estan connectats per una aresta si la distància entre ells és menor que un radi r especificat. Això es determina calculant la distància euclidiana entre tots els parells de nodes i afegint arestes quan la distància és inferior a r .

2.5 Graf de Barabási-Albert

Algorisme 5 Generació de Graf de Barabási-Albert $G(n, m_0, m)$

Entrada: n (nombre de nodes), m_0 (nombre de nodes inicials), m (grau de connexió per nou node)

Sortida: Graf g

```
1: Crear un graf buit  $g$  amb  $n$  nodes
2: Inicialitzar un vector connection_degree de longitud  $n$ 
3: for  $i = 0$  fins a  $m_0 - 1$  do
4:   for  $j = i + 1$  fins a  $m_0 - 1$  do
5:     Afegir una aresta entre  $i$  i  $j$  al graf  $g$ 
6:   end for
7:   connection_degree[ $i$ ] =  $m_0 - 1$ 
8: end for
9: for  $i = m_0$  fins a  $n - 1$  do
10:  Inicialitzar un vector buit candidates
11:  while la longitud de candidates és menor que  $m$  do
12:    selectedNode = preferentialAttachment(connection_degree)
13:    if selectedNode no està en candidates then
14:      Afegir selectedNode a candidates
15:    end if
16:  end while
17:  for cada  $j$  en candidates do
18:    Afegir una aresta entre  $i$  i  $j$  al graf  $g$ 
19:    connection_degree[ $j$ ] += 1
20:  end for
21:  connection_degree[ $i$ ] =  $m$ 
22: end for
23: Retornar el graf  $g$ 
```

El generador de grafs de Barabási-Albert crea un graf que segueix el model de creixement de xarxes, on s'afegeixen nodes nous que es connecten a nodes existents en funció del seu grau de connexió. Comença amb un conjunt inicial de m_0 nodes completament connectats, i cada nou node que s'afegeix selecciona m nodes existents per connectar-se, amb una probabilitat proporcional al seu grau de connexió.

Aquesta selecció es realitza mitjançant la funció **preferentialAttachment**, que s'encarrega de seleccionar un node existent basant-se en el seu grau de connexió. La funció funciona de la següent manera:

Algorisme 6 Preferential Attachment

Entrada: *connection_degree* (vector de graus de connexió)

Sortida: *chosen* (node seleccionat)

```
1: Inicialitzar degree_sum = 0, temp_sum = 0
2: for cada  $i$  en connection_degree do
3:   degree_sum +=  $i$ 
4: end for
5: random_num = rand() mod degree_sum
6: for  $i = 0$  fins a length(connection_degree) - 1 do
7:   temp_sum += connection_degree[ $i$ ]
8:   if random_num ≤ temp_sum then
9:     chosen ←  $i$ 
10:
11:   end if
12: end for
13: Retornar chosen
```

Aquesta funció calcula la suma total dels graus de connexió de tots els nodes existents i selecciona

aleatòriament un node, on la probabilitat de seleccionar cada node és proporcional al seu grau de connexió. Així, els nodes amb més connexions tenen una major probabilitat de ser seleccionats, promovent el creixement de xarxes amb característiques d'escala.

3 Algoritmes

3.1 Percolació per Nodes

3.2 Percolació per Arestes

3.3 Càlcul de Components Connexes

4 Experimentació

Per dur a terme l'experimentació del projecte, hem utilitzat diferents eines. Hem programat dos programes en C++, un llenguatge que ens ofereix molta eficàcia temporal i espacial. Aquests programes són el `main` i el `runner`. També hem dissenyat un fitxer de classe `graph` amb tots els atributs i funcions necessàries per operar amb els grafs. Aquesta classe representa els grafs com a llistes d'adjacència.

Per compilar aquests programes, hem fet ús del programari lliure `make`, que automatitza i paral·litza el compilatge i l'enllaç.

A més, hem dissenyat scripts per a l'interpret `R`, que és un programari de tractament de dades que ens analitzarà i generarà gràfics dels resultats dels estudis, que estaran en format `.csv`.

Més informació del procés d'experimentació es pot trobar en el GitHub del projecte, premeu [aquí](#) per accedir-hi. Allà, a part del codi, també podreu consultar més informació sobre la generació de grafs, les dependències del programa per compilar-lo i executar-lo, com inserir els paràmetres pels programes i més.

4.1 Metodologia

El programa `main`, mitjançant la classe `graph`, ens ha permès analitzar les propietats del canvi de fase a partir dels paràmetres inicials. Aquests paràmetres són els següents:

- **RandomSeed**: La llavor per al generador aleatori.
- **NúmeroMínimNodes**: El nombre mínim de nodes del graf.
- **NúmeroMàximNodes**: El nombre màxim de nodes del graf.
- **NúmeroNodesStep**: Increment dels nodes en cada iteració.
- **IteracionsPerObtenirResultat**: El nombre de vegades que es provarà la configuració per probabilitat p de percolació i per nombre de vèrtex n .
- **ModePercolació**: Tipus de percolació per nodes o per arestes.
- **PathResultat**: Fitxer on es guardaran els resultats.
- **AlgorismeGeneradorGraf**: Algoritme utilitzat per generar el graf (per exemple, Erdős-Rényi, Square-Grid, etc.).
- **ParàmetresAlgorisme**: Paràmetres addicionals per al generador de graf (opcional segons l'algorisme).

A partir d'aquests paràmetres, el programa `main` escriurà un fitxer `PATH.csv` que posteriorment serà analitzat mitjançant el software de tractament de dades `R`.

Per altra banda, tenim el programa `runner`, que rebrà com a input un fitxer de text. Aquest fitxer tindrà un llistat de paràmetres per diferents experiments del programa `main`. Un exemple d'això seria:

RGN	MIN	MAX	STEP	ITs	PERC-MODE	RESULT-PATH	GEN-ALGORITM	PARAMETERS-GEN
21312	10	100	10	1000	NODE_PERC	./data/test1.csv	Erdos-Renyi	0.1
35353	50	500	50	1000	EDGE_PERC	./data/test2.csv	Random-Geometric	0.3
72479	100	1000	100	100	EDGE_PERC	./data/test3.csv	Square-Grid	

El programa `runner`, per cada fila del fitxer que rep, inicialitzarà una instància del programa `main`, aconseguint d'aquesta manera automatitzar molt més els tests, podent córrer diferents programes `main` simultàniament.

4.2 Programa Main

Per entendre els resultats també s'ha d'entendre les decisions que s'han pres per la recollida de dades. Analitzarem el programa `main` mitjançant un pseudocodi per no entrar en conceptes avançats de C++. A continuació vegeu una mostra del pseudocodi:

Algorisme 7 Descripció de l'experiment

```
1: Seleccionar opcions de configuració
2: Inicialitzar el generador de nombres aleatoris
3: Obrir l'arxiu CSV i escriure la capçalera
4: for  $n$  in range(MIN_NB_NODES, MAX_NB_NODES + 1, NB_NODES_STEP) do
5:   for  $p$  des de 0 fins a 1 amb pas 0.01 do
6:     Inicialitzar el comptador de grafs connexos
7:     for  $i = 0$  fins a TRIES_PER_P do
8:       repeat
9:         Generar el graf seleccionat( $p, n, params$ )
10:      until el graf és connex
11:      Aplicar percolació (per nodes o arestes) al graf
12:      if el graf percolat és connex then
13:        Incrementar el comptador de grafs connexos
14:      end if
15:    end for
16:    Escriure entrada resultant al CSV
17:  end for
18: end for
```

Ara, analitzarem el codi. Per començar, el programa preguntarà per totes les opcions necessàries. D'aquesta manera, ens podem permetre tenir un sol programa que pugui fer tot el que necessitem i que sigui altament modular. S'utilitzarà la llavor per generar nombres aleatoris, i així l'experiment podrà ser repetit amb els mateixos resultats. Després, crearà el fitxer `PATH.csv`, al qual s'hi inseriran entrades que posteriorment s'analitzaran.

Ara analitzarem l'algorisme encarregat de generar els resultats. Vegeu com primerament iterarem sobre n tantes vegades com s'hagi indicat en la entrada. Alhora, també iterarem per cada n sobre una probabilitat de fallida de percolació. Aquest bucle tindrà 100 iteracions, $p \in \{0.00, 0.01, \dots, 1.00\}$. A més d'aquests dos bucles, iterarem una altra vegada sobre p i n tantes vegades com l'usuari hagi indicat en l'apartat *IteracionsPerObtenirResultat*. Així, es farà una mitjana amb més o menys mostres.

S'iniciarà un comptador a 0 que representarà el nombre de grafs percolats connexos. S'utilitzarà el generador de grafs seleccionat a les opcions per generar el graf que posteriorment serà percolat. Vegeu que aquí generarem grafs fins a aconseguir un graf connex. Aquesta decisió la vam prendre per tenir una representació més acurada de la transició de fase. Més endavant, es tornarà a considerar aquesta decisió, ja que hi ha grafs, com ara el *Random Geometric Graph*, que requereixen un paràmetre r , el qual, amb valors petits de r , acostuma a generar grafs no connexos.

Per acabar, percolarem el graf $G(V, E)$ de la manera que s'hagi especificat a l'input, ja sigui per nodes o per arestes, obtenint G_p . A G_p se li aplicarà un algorisme que determinarà si el graf és connex. Si ho és, s'incrementarà el comptador. Quan les *IteracionsPerObtenirResultat* s'hagin completat, s'escriurà l'entrada resultant al fitxer `PATH.csv`.

5 Conclusions

6 Bibliografia

- Wikipedia. *Model d'Erdős-Rényi*.

7 Annex