

# Application of complex network theory to the contents of science subjects in high school education

JUAN FERNÁNDEZ GRACIA, ANTONI SALVÀ SALVÀ

Contact: [juanf@ifisc.uib-csic.es](mailto:juanf@ifisc.uib-csic.es)



UNIT OF  
EXCELLENCE  
MARÍA  
DE MAEZTU





## BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 340

Miércoles 30 de diciembre de 2020

Sec. I. Pág. 122868

### I. DISPOSICIONES GENERALES

#### JEFATURA DEL ESTADO

**17264** Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.



#### LEGISLACIÓN CONSOLIDADA

Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.



## BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 3

Sábado 3 de enero de 2015

Sec. I. Pág. 169

### I. DISPOSICIONES GENERALES

#### MINISTERIO DE EDUCACIÓN, CULTURA Y DEPORTE

**37** Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.



## BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 3

Sábado 3 de enero de 2015

Sec. I. Pág. 27

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 4. Ondas		
Clasificación y magnitudes que las caracterizan. Ecuación de las ondas armónicas. Energía e intensidad. Ondas transversales en una cuerda. Fenómenos ondulatorios: interferencia y difracción reflexión y refracción. Efecto Doppler. Ondas longitudinales. El sonido. Energía e intensidad de las ondas sonoras. Contaminación acústica. Aplicaciones tecnológicas del sonido. Ondas electromagnéticas. Naturaleza y propiedades de las ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético. Dispersión. El color. Transmisión de la comunicación.	1. Asociar el movimiento ondulatorio con el movimiento armónico simple. 2. Identificar en experiencias cotidianas o conocidas los principales tipos de ondas y sus características. 3. Expresar la ecuación de una onda en una cuerda indicando el significado físico de sus parámetros característicos. 4. Interpretar la doble periodicidad de una onda a partir de su frecuencia y su número de onda. 5. Valorar las ondas como un medio de transporte de energía pero no de masa. 6. Utilizar el Principio de Huygens para comprender e interpretar la propagación de las ondas y los fenómenos ondulatorios. 7. Reconocer la difracción y las interferencias como fenómenos propios del movimiento ondulatorio.	1.1. Determina la velocidad de propagación de una onda y la de vibración de las partículas que la forman, interpretando ambos resultados. 2.1. Explica las diferencias entre ondas longitudinales y transversales a partir de la orientación relativa de la oscilación y de la propagación. 2.2. Reconoce ejemplos de ondas mecánicas en la vida cotidiana. 3.1. Obtiene las magnitudes características de una onda a partir de su expresión matemática. 3.2. Escribe e interpreta la expresión matemática de una onda armónica transversal dadas sus magnitudes características. 4.1. Dada la expresión matemática de una onda, justifica la doble periodicidad con respecto a la posición y el tiempo. 5.1. Relaciona la energía mecánica de una onda con su amplitud. 5.2. Calcula la intensidad de una onda a cierta distancia del foco emisor, empleando la ecuación que relaciona ambas magnitudes. 6.1. Explica la propagación de las ondas utilizando el Principio



**Govern de les Illes Balears**  
Conselleria d'Educació i Universitat  
Direcció General de Planificació,  
Ordenació i Centres

### FÍSICA (Batxillerat)

#### Finalitat de l'assignatura

La física és una part fonamental de la cultura científica necessària per a la formació integral de les persones i es relaciona amb altres ciències que tenen a veure amb el coneixement de la natura. Dins l'àmbit social, per la seva influència en la tecnologia i en la indústria, intervé de forma crucial en la millora de les condicions de vida de la

Linear chain of contents not reflecting the complex structure of knowledge

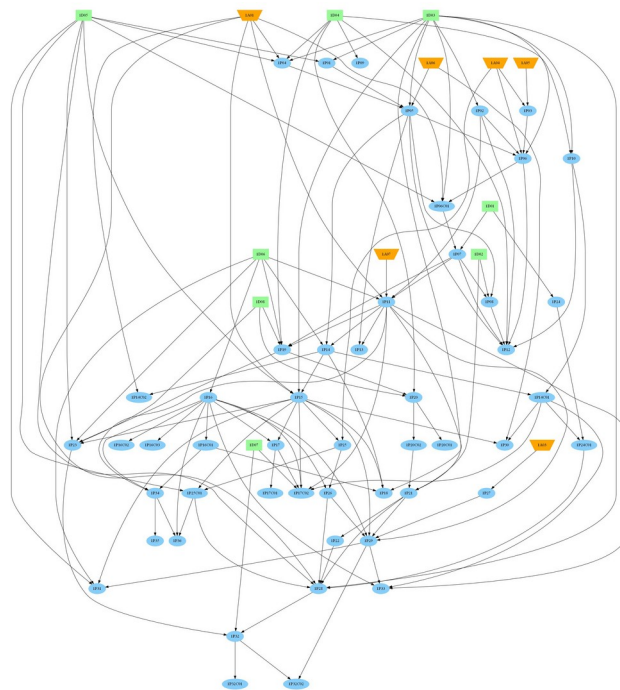




Atomization into different subjects  
(vs. integrated sciences)



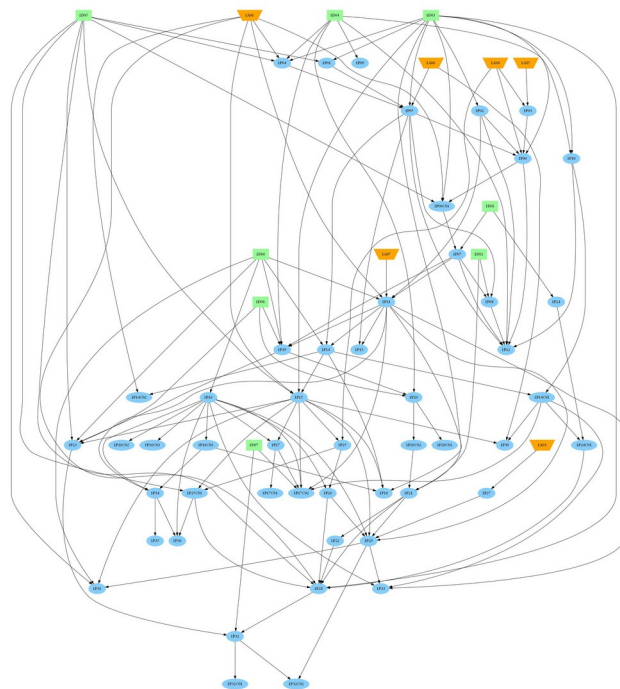
Linear chain of contents not reflecting the  
complex structure of knowledge





```

graph TD
    A(( )) --> B(( ))
    B --> C(( ))
  
```



## Can network theory help us find important contents, coherent groupings and ways of mixing subjects?



- 1)Generate the network of curricular contents (last year of highschool, only Physics and Mathematics).
- 2)Find most *important* contents (subjects in isolation and together).
- 3)Find coherent groupings of contents given the network structure (community structure).
- 4)Toward an integrated science teaching. Propose a grouping of Physics and Mathematics contents.
- 5)Conclusions.

## 1) Generate the network of curricular contents

### BLOC 1. L'ACTIVITAT CIENTÍFICA

#### Continguts

Estratègies pròpies de l'activitat científica.

Tecnologies de la informació i la comunicació.

### BLOC 2. INTERACCIÓ GRAVITATÒRIA

#### Continguts

Camp gravitatori.

Camps de força conservatius.

Intensitat

### BLOC 4. ONES

#### Continguts

Classificació i magnituds que caracteritzen les ones.

Equació de les ones harmòniques.

Energia i intensitat.

Ones transversals en una corda.

Fenòmens ondulatoris: interferència i difracció, reflexió i refracció.

Efecte Doppler.

Ones longitudinals. El so.

Energia i intensitat de les ones sonores. Contaminació acústica.

Aplicacions tecnològiques del so.

Ones electromagnètiques.

Naturalesa i propietats de les ones electromagnètiques.

L'espectre electromagnètic.

Dispersió. El color.

Transmissió de la comunicació.

### BLOC 3. INTER

#### Continguts

Camp elèctric.

Intensitat del ca

Potencial elèctric

Flux elèctric i llei

Camp magnètic

Efecte dels camp

El camp magnètic

Camp creat per

Llei d'Ampere.

Inducció electro

Flux magnètic.

Lleis de Faraday

**Physics:** 54 contents in 6 blocs

**Mathematics:** 36 contents in 5 blocs

**Total:** 90 contents (4005 potential links)

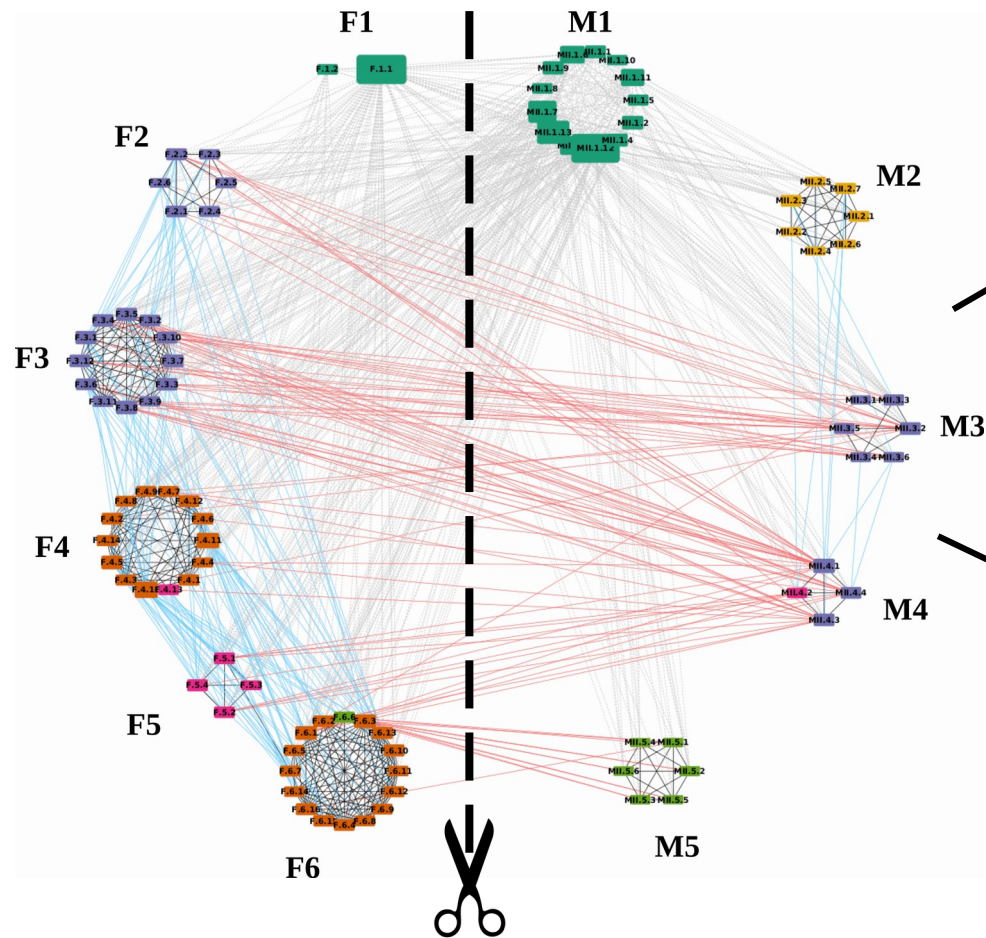
**Non-optimal solution:** Check all relations one by one.

Two contents linked if they overlap in concepts or methods.

[https://github.com/juanfernandezgracia/TFM\\_MFPR\\_Xarxes\\_continguts](https://github.com/juanfernandezgracia/TFM_MFPR_Xarxes_continguts)

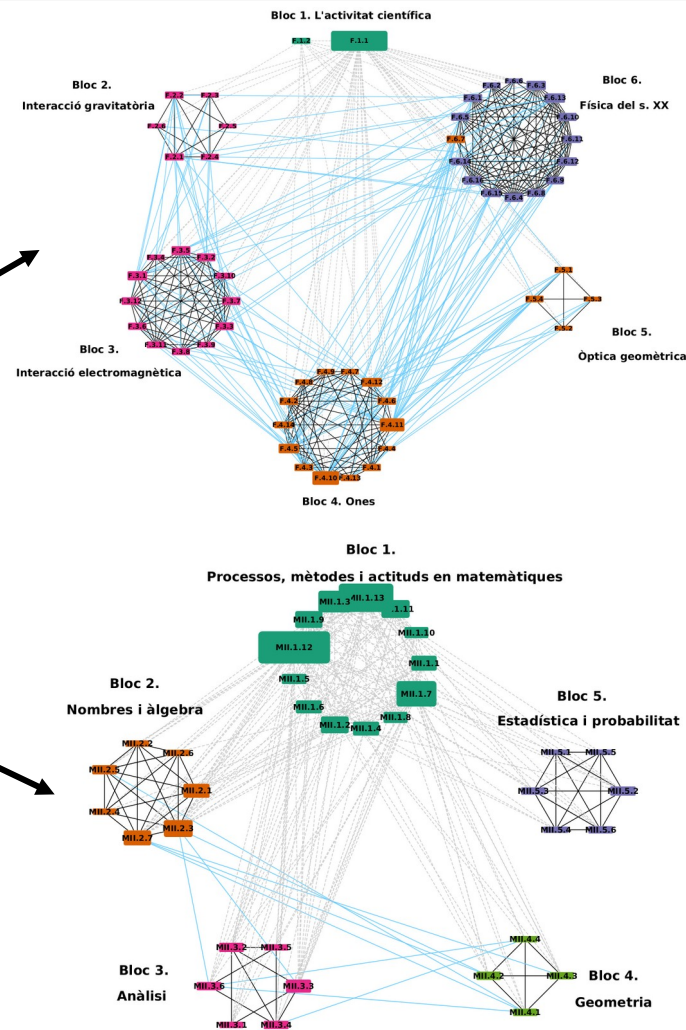


# 1) Generate the network of curricular contents



Physics

Mathematics







## 2) Find most central contents

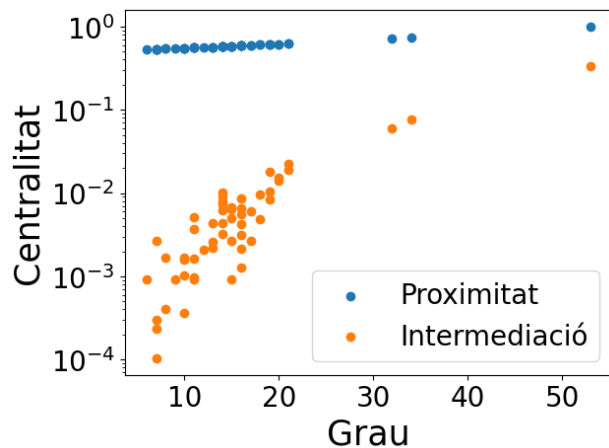
Three different centrality measures that potentially can uncover different types of *important* contents:

- **Degree:** Number of links attached to a content. Local and the most simple measure of centrality. A central content will be one that is directly connected to many other contents and thus will help understanding many others.
- **Closeness:** Inverse of the average distance from one node to all other nodes taken through shortest paths. Global measure. A central content will be one that can be connected globally to the rest of contents in the network easily.
- **Betweenness:** Proportion of shortest paths in the network that go through a node. A central content will be one that sits between different and topologically separated parts of the network in case there is some community structure and thus can serve as bridge between areas of contents.

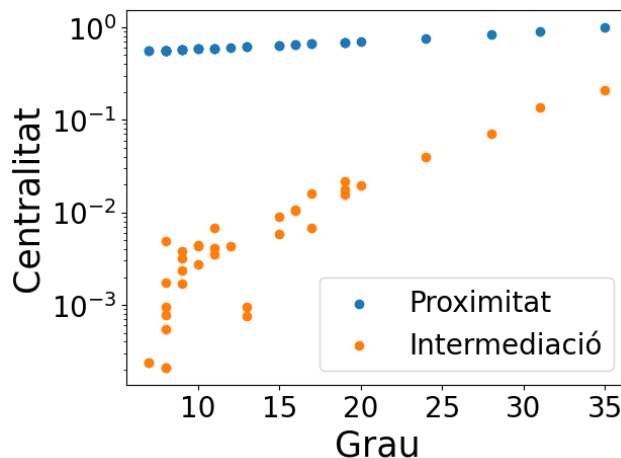


## 2) Find most central contents

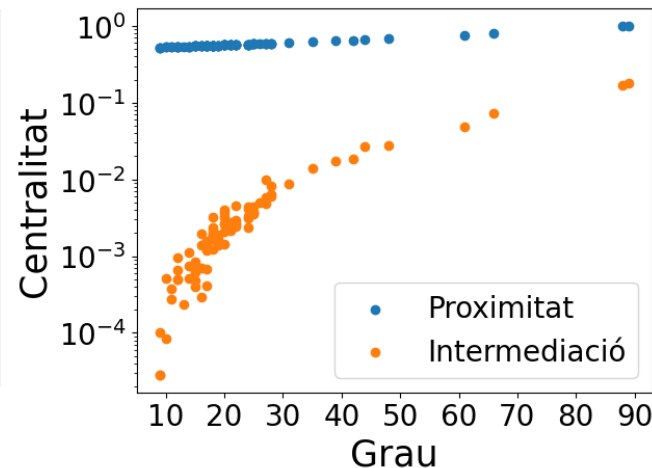
Physics



Mathematics



Physics & Mathematics



The three measures are highly correlated (produce very similar top 10 central contents):

- Not too complex structures to take into account.
- We can use degree as centrality measure and forget about the others.

## 2) Find most central contents

### Physics

Identificador	Matèria	Bloc	Contingut	Grau	Proximitat	Intermediació
F.1.1	Física	Bloc 1. L'activitat científica	Estratègies pròpies de l'activitat científica	53	1.0	0.338
F.4.10	Física	Bloc 4. Ones	Ones electromagnètiques	34	0.736	0.077
F.4.11	Física	Bloc 4. Ones	Naturalesa i propietats de les ones electromagnètiques	32	0.716	0.06
F.6.13	Física	Bloc 6. Física del segle XX	Les quatre interaccions fonamentals de la naturalesa: gravitatòria, electromagnètica, nuclear forta i nuclear feble	21	0.624	0.019
F.4.5	Física	Bloc 4. Ones	Fenòmens ondulatoris: interferència i difracció, reflexió i refracció	21	0.624	0.023
F.3.1	Física	Bloc 3. Interacció electromagnètica	Camp elèctric	20	0.616	0.015
F.6.3	Física	Bloc 6. Física del segle XX	Física quàntica	20	0.616	0.014
F.4.12	Física	Bloc 4. Ones	L'espectre electromagnètic	19	0.609	0.018
F.3.5	Física	Bloc 3. Interacció electromagnètica	Camp magnètic	19	0.609	0.01
F.6.4	Física	Bloc 6. Física del segle XX	Insuficiència de la física clàssica	19	0.609	0.008

Taula 1: Els 10 continguts més centrals de l'assignatura de física de 2n de batxillerat segons el seu grau.

Most central contents:

- Block 1 (cross-disciplinary, cross-content?)
- Block 4: electromagnetic waves contents (bridge many different blocks)
- Block 6 : Physics of the XXth century (needs many previous contents)

## 2) Find most central contents

### Mathematics

Identificador	Matèria	Bloc	Contingut	Grau	Prox.	Int.
MII.1.3	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Solucions i/o resultats obtinguts: coherència de les solucions amb la situació, revisió sistemàtica del procés, altres formes de resolució, problemes semblants, generalitzacions i particularitzacions interessants	24	0.761	0.04
MII.1.11	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Pràctica dels processos de matematització i modelització, en contextos de la realitat i en contextos matemàtics	20	0.7	0.019
MII.2.3	Matemàtiques II	Bloc 2. Nombres i àlgebra	Aplicació de les operacions amb matrius i de les seves propietats en la resolució de problemes extrets de contextos reals	19	0.686	0.022
MII.1.2	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Estratègies i procediments posats en pràctica: relació amb altres problemes coneguts, modificació de variables, suposar el problema resolt	19	0.686	0.018
MII.1.9	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Realització d'investigacions matemàtiques a partir de contextos de la realitat o contextos del món de les matemàtiques	19	0.686	0.015
MII.2.7	Matemàtiques II	Bloc 2. Nombres i àlgebra	Representació matricial d'un sistema: discussió i resolució de sistemes d'equacions lineals. Mètode de Gauss. Regla de Cramer. Aplicació a la resolució de problemes	17	0.66	0.016
MII.1.1	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Planificació del procés de resolució de problemes	17	0.66	0.007

Taula 3: Continuació de la taula 2. Els 10 continguts més centrals de l'assignatura de matemàtiques de 2n de batxillerat segons el seu grau.

Most central contents:

- Block 1 (cross-disciplinary)
- Block 2: contents related to matrices (connect different areas of mathematics)



## 2) Find most central contents

Physics and  
Mathematics

Identificador	Matèria	Bloc	Contingut	Grau	Prox.	Int.
MI.1.3	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Solucions i/o resultats obtinguts: coherència de les solucions amb la situació, revisió sistemàtica del procés, altres formes de resolució, problemes semblants, generalitzacions i particularitzacions interessants	48	0.685	0.028
MI.1.6	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Raonament deductiu i inductiu	44	0.664	0.027
MI.1.11	Matemàtiques II	Bloc 1. Processos, mètodes i actituds en matemàtiques	Pràctica dels processos de matematització i modelització, en contextos de la realitat i en contextos matemàtics	42	0.654	0.019
F.4.10	Física	Bloc 4. Ones	Ones electromagnètiques	39	0.64	0.017
F.4.11	Física	Bloc 4. Ones	Naturalesa i propietats de les ones electromagnètiques	35	0.622	0.014
MI.4.1	Matemàtiques II	Bloc 4. Geometria	Vectors en l'espai tridimensional. Producte escalar, vectorial i mixt. Significat geomètric	31	0.605	0.009

Taula 5: Continuació de la taula 4. Els 10 continguts més centrals de la xarxa de física i matemàtiques de 2n de batxillerat segons el seu grau.

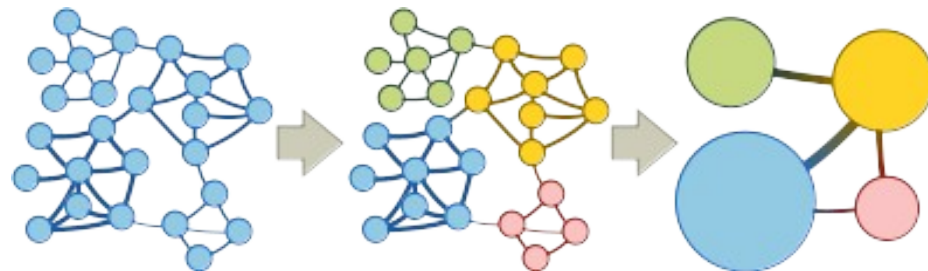
Most central contents:

- Block 1 from both subjects (cross-disciplinary)
- Block 4 from physics (electromagnetic waves). Still link many different areas of the network.
- Block 4 from mathematics (vectors). Very important for contents from physics. **Reveal their true importance when the global network is taken into account!!**

### 3) Find coherent groupings of contents

We will use the community structure of the network to propose groupings of contents that are coherent.

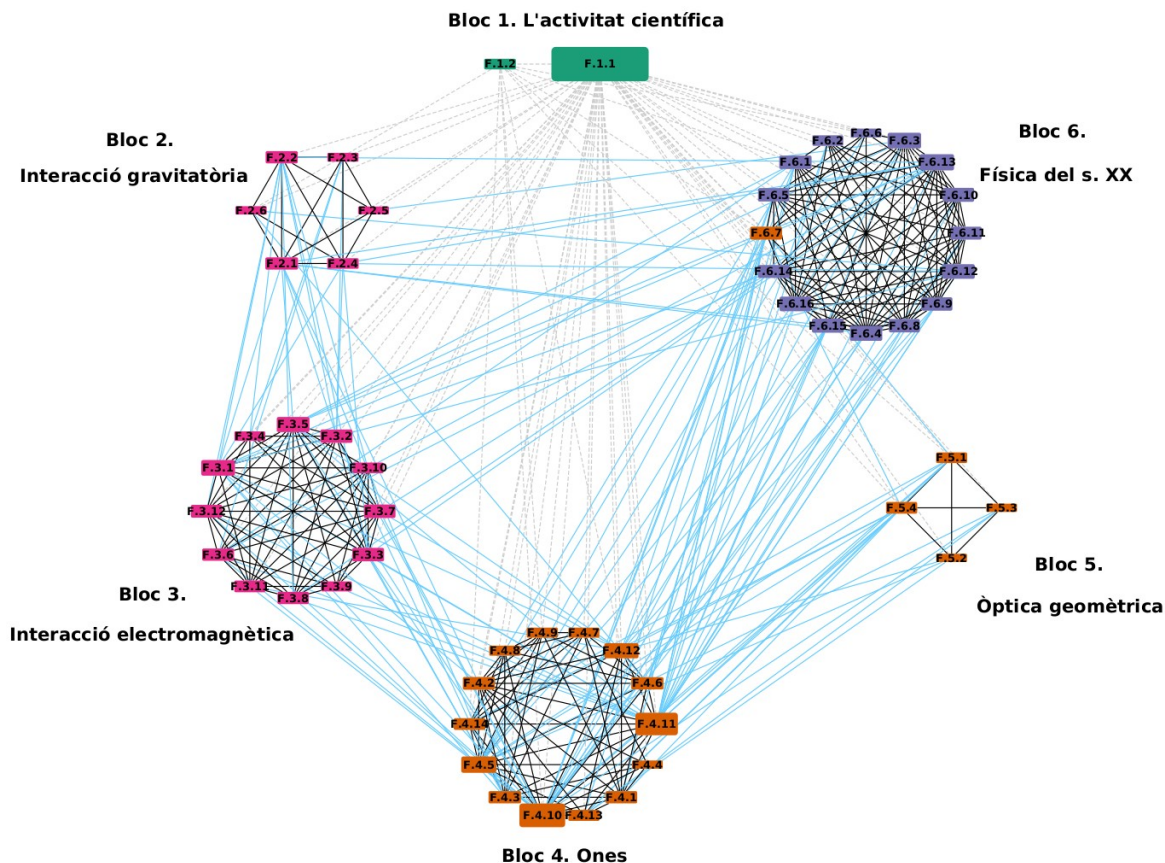
We will use Infomap to uncover the community structure, but other methods could be used.



We will **exclude from the analysis the contents from the 1st block of each subject**. We consider that these contents are cross-disciplinary and should be treated in class with any other content. Their high degree will obscure the community structure.

### 3) Find coherent groupings of contents

#### Physics



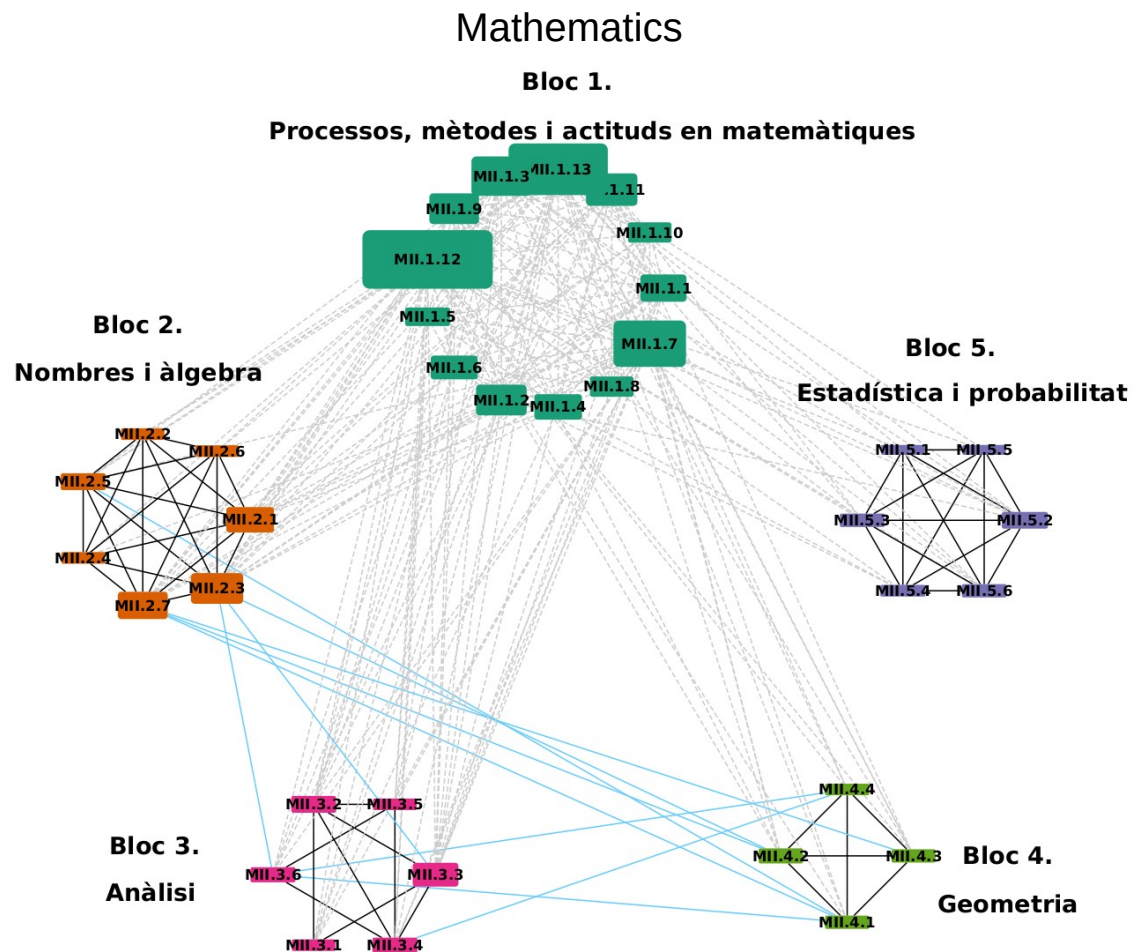
3 groups:

- Blocks 2 & 3: gravitational and electromagnetic interactions.
- Blocks 4 & 5 & a content from block 6 (application of quantum physics, the laser): Waves and geometric optics (+laser)
- Rest of block 6: Physics of the XXth century.

### 3) Find coherent groupings of contents

4 grups that reflect the block structure of the curriculum.

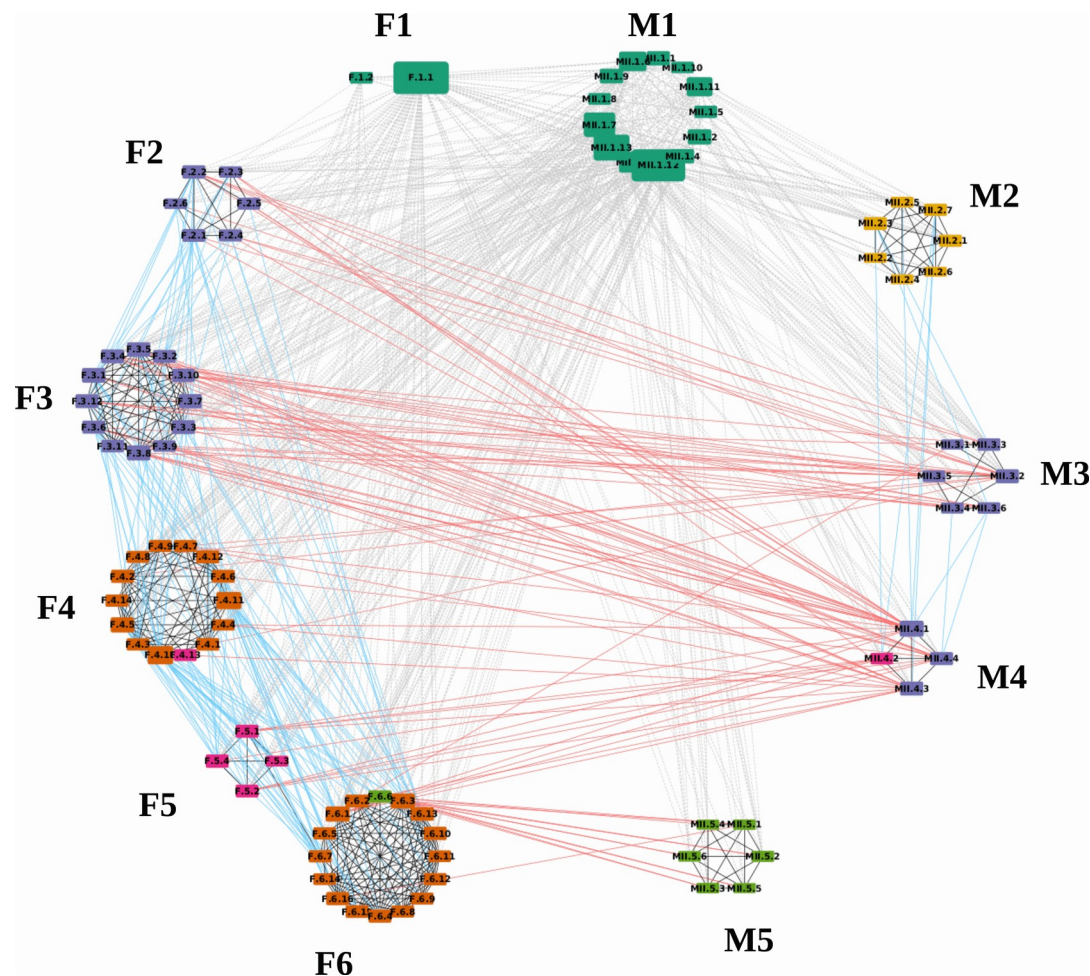
If we ignore block 1, block 5 (statistics and probability) remains isolated from the network.







## 4) Toward an integrated science teaching.



5 grups (ignoring blocks 1 from each subject)

- Blocks 2 & 3 from physics (gravitational and electromagnetic interactions) and blocks 3 & 4 from mathematics (analysis and geometry), except for the content “Equations for the line and plane in space” from the 4th block of mathematics.
- Blocks 4 & 6 from physics (waves and physics of the XXth cent.), except for “Probabilistic interpretation of quantum physics” from block 6 and “Dispersion. Color” from block 4.
- Block 5 from physics (geometrical optics) and “Equations for the line and plane in space” from block 4 from mathematics and “Dispersion. Color” from block 4 from physics.
- Block 5 from mathematics (statistics and probability) and the content “Probabilistic interpretation of quantum physics” from block 6 from physics.
- Block 2 from mathematics (numbers and algebra).



- We have generated the network. → We have committed errors and there is a lot of personal bias. The process should be automated (NLP?). Nevertheless the results seem coherent. This method can serve as a tool to investigate mental maps of different groups of people (students, teachers, etc)
- Most central contents can be categorized in 2 groups: 1) cross-disciplinary contents (blocks 1) & 2) contents linking different areas of knowledge (electromagnetic waves, matrices). When taking into account the joint network, vectors appear as a central content, which didn't before. → Importance of the global picture.
- Community structure in the isolated networks follows mostly the block structure of the curricula.
- Community structure for the joint network serves as a guide to the integrated teaching of physics and mathematics. It is remarkable how the block “Statistics and probability” from mathematics, which was isolated from the rest of contents, now gains some context by teaching it together with the content “Probabilistic interpretation of quantum physics” from the 6th block of physics.
- This proposal exemplifies the potential of network theory for curricular design.



**THANK YOU**  
for your attention