



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Departamento de Matemática

Introdução ao Estudo das Redes Fúngicas

João Marques

José Casimiro

Rui Nobre

Tarefa da disciplina de Grafos e Redes do
Mestrado em Matemática Aplicada para a Indústria

Docentes:

Prof. Doutor José Leonel Linhares da Rocha

Prof^ª. Doutora Sónia Raquel Ferreira Carvalho

Janeiro 2023

Resumo

Wood World Web (termo inglês que, em português, pode ser traduzido por “teia mundial madeireira”), também conhecida como rede subterrânea florestal, é o processo onde árvores de diferentes espécies trocam de carbono através de uma rede de fungos que ligam as suas raízes. Este processo demonstrou que certos tipos de fungos comuns coexistem numa simbiose subtil com as plantas, não provocando infecção, mas sim ligação/cooperação entre elas. Estes fungos enviam finos tubos de seda, chamados hifas, que se infiltram no solo e se entrelaçam num nível celular nas pontas das raízes das plantas. Raízes e fungos combinam-se de tal forma que criam o que é chamado de micorriza. Desta forma, as plantas individuais são unidas umas às outras por uma complexa e colaborativa rede subterrânea de hifas. Existem certos tipos de fungos que crescem como redes auto-organizadas, explorando novos territórios à procura de recursos e mantendo ao mesmo tempo um sistema de transporte interno eficaz, face a ataques contínuos ou danos aleatórios. Estas redes adaptam-se durante o seu desenvolvimento através do reforço selectivo das principais vias de transporte e da reciclagem do material redundante interveniente, para apoiar uma maior extensão. O objetivo deste trabalho é um estudo introdutório às redes fúngicas.

Índice

1	Introdução	v
1.1	Sobre os Fungos	v
1.2	A ligação entre fungos e plantas (Mycorrhizae)	v
1.3	A <i>Wood-Wide Web</i>	vii
2	Análise de uma Rede Micorrízica	ix
2.1	Artigo 'Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests'	ix
2.2	Dados	x
2.2.1	Micorrizas	x
2.2.2	Árvores	x
2.2.3	Análise Exploratória	xi
2.3	Caracterização da rede	xii
2.3.1	Métricas	xii
2.3.2	Matriz de Adjacências	xiii
2.3.3	Diagrama de Rede	xiv
3	Conclusões	xv
	Bibliografia	xvi

Capítulo 1

Introdução

1.1 Sobre os Fungos

O reino Fungi é um grupo de organismos eucariotas, que inclui microorganismos tais como as leveduras, os bolores, e os mais familiares cogumelos ("Fungus", 2022). O reino dos fungos abrange uma enorme diversidade e táxons, com ecologias, estratégias de ciclos de vida e morfologias variadas, mas pouco se sabe sobre a verdadeira biodiversidade do reino Fungi, que se pensa incluir 1,5 milhões de espécies, com apenas cerca de 5% destas formalmente classificadas (Hawksworth & Lücking, 2017, como citado em "Fungus", 2022); um estudo recente estimou o aparecimento destes organismos há aproximadamente 760 - 1060 milhões de anos (Lücking et al., 2009, como citado em "Fungus", 2022).

A maioria dos fungos desenvolve-se como hifas, que são estruturas filamentosas, cilíndricas, com dois a 10 µm de diâmetro e até vários centímetros de comprimento ("Fungus", 2022). Novas extremidades surgem ao longo de uma hifa já existente num processo designado “ramificação”, ou ocasionalmente por bifurcação de extremidades de uma hifa em crescimento, dando origem a duas hifas com crescimento paralelo (Harris, 2008, como citado em "Fungus", 2022). A combinação do crescimento apical com a ramificação/bifurcação conduz ao desenvolvimento de um micélio, uma rede interconectada de hifas (Alexopoulos et al., 1996, como citado em "Fungus", 2022).

Os fungos desempenham um papel essencial na decomposição da matéria orgânica e têm papéis fundamentais nas trocas e ciclos de nutrientes ("Fungus", 2022). Eles são desde há muito tempo utilizados como uma fonte direta de alimentação, como no caso dos cogumelos e trufas, como agentes levedantes no pão, e na fermentação de vários produtos alimentares, como o vinho, a cerveja, e o molho de soja. Desde a década de 1940 que os fungos são usados na produção de antibióticos e, mais recentemente, surgiram outras aplicações na indústria.

1.2 A ligação entre fungos e plantas (Mycorrhizae)

Uma micorriza é uma associação simbiótica entre um fungo e uma planta (Ainsworth et al., 2001, como citado em "Mycorrhiza", 2022). As hifas do fungo associam-se às raízes das plantas e vão auxiliar na absorção de água e sais minerais do solo (principalmente fósforo e nitrogénio), ao aumentarem a superfície de absorção ou rizosfera ("Mycorrhiza", 2022). Deste modo, as plantas podem absorver mais água e adaptar-se a climas mais secos, e em troca os fungos recebem das plantas hidratos de carbono e aminoácidos essenciais ao seu desenvolvimento, estabelecendo assim uma interação ecológica onde há troca de benefícios entre ambas as espécies.

As ectomicorizas caracterizam-se pela presença do manto e da rede de Hartig (Fig. 1.1), e estão em cerca de 3% das plantas com semente, na maioria lenhosas, que dominam em quase todos os ecossistemas terrestres (Smith e Read, 1997, como citado em Universidade de Coimbra, s.d.). Estão presentes em 25 famílias de plantas vasculares, entre elas as famílias: Betulaceae (70%), Dipterocarpaceae (98%), Fagaceae (94%), Myrtaceae (90%), Pinaceae (95%), algumas Leguminosae (16%) (Newman e Reddell, 1987, como citado em Universidade de Coimbra, s.d.), alguns géneros de arbustos, *Cistus*, *Helianthemum*, *Juniperus*, entre outros, e um pequeno número de herbáceas (Smith e Read, 1997, como citado em Universidade de Coimbra, s.d.). Neste tipo de micorrizas, o fungo desenvolve-se à volta da raiz e forma um invólucro a que se dá o nome de manto. As hifas mais internas do manto penetram os espaços intercelulares na região exterior da raiz e, envolvendo as células epidérmicas e/ou corticais, formam a rede de Hartig. O micélio externo assegura a interface substrato-fungo-planta.

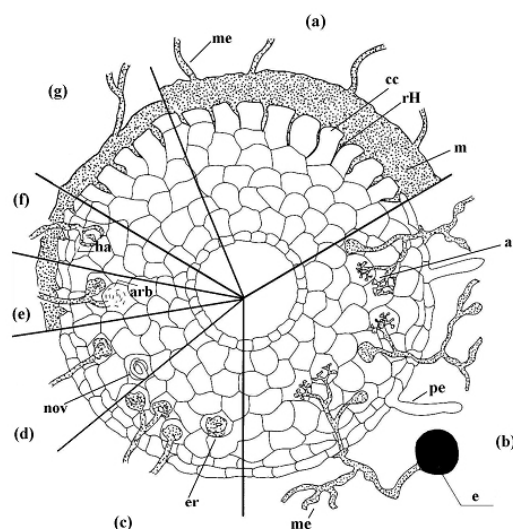


Figura 1.1: Diagrama representativo de vários tipos de micorrizas. Ectomicorizas (ECM) (a), micorrizas arbusculares (AM) (b), micorrizas ericóides (c), micorrizas orquidáceas (d), micorrizas arbutóides (e), micorrizas monotrepóides (f) e arbúsculo (ar), “arbutóides” (arb), célula cortical (cc), esporo (e), enrolamentos (er), “haustórios” (ha), manto (m), micélio extrarradicar (me), novelos (nov) e rede de Hartig (rH) (Azul, 2002, modificado a partir de Deacon 1997, como citado em Universidade de Coimbra, s.d.)

1.3 A Wood-Wide Web

Há mais de 500 milhões de anos atrás, já a natureza tinha a sua *rede social*, recentemente, cunhou-se essa rede, com o termo *Wood-Wide Web*¹, que se refere a redes de árvores ligadas entre si, no subsolo através de micorrizas, conhecida também por Mycorrhizal networks (MNs) ou mycorrhizal fungal mycelia, onde mycos significa *fungus* e rhiza significa *root*. Esta rede permite que as árvores troquem informações e nutrientes entre elas, e concretizem mecanismos de regulação do ecossistema. Num artigo publicado no *New Zealand Geographic*, é mencionado que "Só agora começamos a compreender até que ponto as plantas estão ligadas a vizinhos próximos e distantes - mesmo as de outras espécies - por filamentos fúngicos, as Hifas, que constituem a massa de filamentos chamados mycelia" (Hansford, 2017). Este conceito poderá abrir uma nova perspectiva sobre as plantas e as florestas que, tendencialmente, são vistas como sendo relativamente inertes e de uma inteligência baixa (Worrall, 2016; TEDx Talks, 2017).

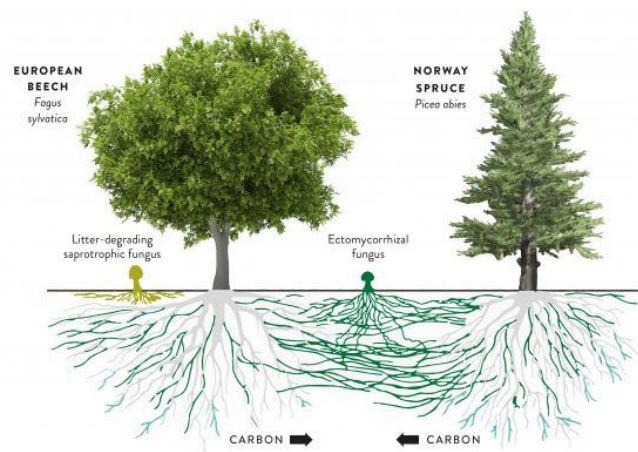


Figura 1.2: *Mycorrhizal networks (MNs)*
(Hansford, 2017)

Os fungos - mais concretamente, os seus filamentos conhecidos como Hifas - estabelecem as ligações entre as árvores. As Hifas, são responsáveis pelo transporte de nitrogénio, fósforo, água, bem como outros nutrientes existentes nos solos para as árvores. As árvores por sua vez com o recurso a esta rede, têm o papel de manter o ecossistema presente, em equilíbrio, permitindo desta forma que as plantas cumpram também elas o seu papel, como o da produção de carbono rico em açúcar.

¹video youtube - https://youtu.be/7kHZ0a_6TxY

As arquitecturas destas redes conhecidas até ao momento, só foram possíveis através do mapeamento dos fungos conhecidos por *Rhizopogon vesiculosus* e *Rhizopogon vinicolor*, bem como a análise do interior da árvore. Deste estudo foi possível identificar a existência de DNA de outras árvores no seu interior. Assim, diz-se que duas árvores estão interligadas se partilharem os mesmos genes do fungo. Os fungos mencionados contêm 13-14 genes distintos onde cada um deles pode ligar até 19 árvores, verificou-se também que os Fungos do tipo *vesiculosus* (VES) permitem maior ligações do que os do tipo *vinicolor* (VIN). Constata-se que nestas redes, as árvores de maior diâmetro e maior altura, têm um maior número de ligações, isto porque têm maior exposição solar. São denominadas como *Hub Trees*. Na Figura 1.3 podemos ver uma rede MNs.

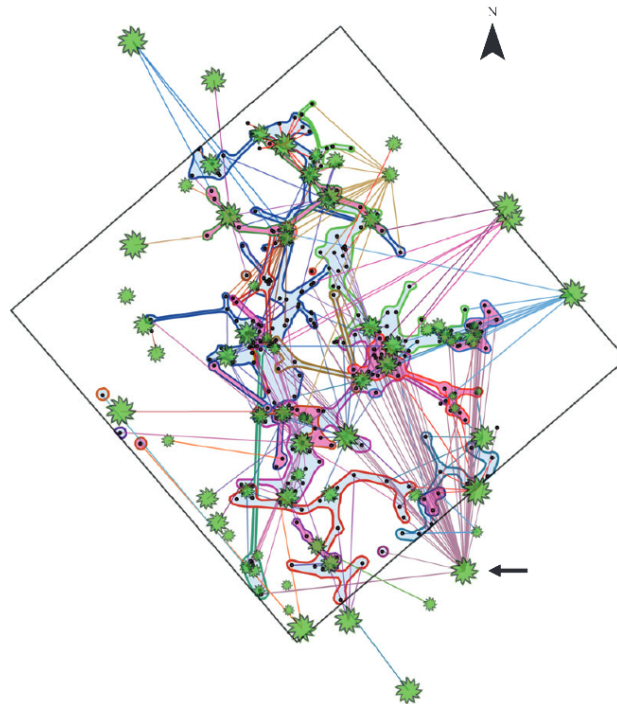


Figura 1.3: Planta 30x30m de uma rede de fungos e Árvores Douglas-Fir (Beiler et al., 2010).

Capítulo 2

Análise de uma Rede Micorrízica

2.1 Artigo 'Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests'

Para dar um exemplo ilustrativo do estado da arte, no contexto da análise de redes micorrízicas, os alunos descrevem uma simulação que realizaram com base no trabalho de Beiler et al. (2015), em *Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests*, publicado no *Journal of Ecology*. O estudo descreve a rede micorrízica (RM) formada entre duas espécies de fungos ectomicorrízicos, *rhizopogon vesiculosus*, r. *vinicolor* e árvores/abetos douglas-fir, comparando estruturas de RM entre parcelas de floresta com xéricos *versus* méxicos em diferentes regimes de mistura de solo. Foram escolhidas e analisadas seis parcelas independentes de 10 x 10 m, cada uma separada por pelo menos 150 m. Para comprar os atributo das RM entre os diferentes regimes de mistura de solo, foram escolhidas três parcelas com posição de inclinação superior e as restantes em posição de inclinação inferior com comunidades de plantas indicativas dos respetivos regimes de humidade do solo. O número médio de troncos de árvores (caule m^2), área basal da árvore ($m^2 ha^{-1}$) e a distribuição de frequência das classes de grupos de árvores (cinco classes) foram comparados entre parcelas, com regimes de humidade do solo xéricos *versus* méxicos para obter os indicadores base das potenciais influências nas medidas da rede. Foram utilizadas 200 pessoas/hora na recolha de micorrizas entre maio e junho de 2008, em cada uma das seis parcelas.

2.2 Dados

2.2.1 Micorrizas

A informação sobre as amostras de micorrizas foi retirada de um dataset com 76 entradas e 6 variáveis.

1	Plot	Site	SmpleID	GenetID	TreeID	UTM_X	UTM_Y
2	Plot 1	xeric	VES-001	VES-1-01	P1-T020	674396.556	5636242.455
3	Plot 1	xeric	VES-002	VES-1-01	P1-T004	674395.724	5636242.306
4	Plot 1	xeric	VES-003	VES-1-01	P1-T061	674395.235	5636239.312
5	Plot 1	xeric	VES-004	VES-1-01	P1-T019	674394.775	5636239.082
6	Plot 1	xeric	VES-005	VES-1-01	P1-T019	674394.554	5636242.309

Figura 2.1: Dados amostrais (primeiras 5 entradas)

- Plot - Identificação do local em que foram recolhidas as amostras
- Site - Tipo de solo (xeric ou mesic)
- SampleID - Identificador da amostra
- GenetID - Identificador da colónia clonal
- TreeID - Identificador da árvore
- UTM_X - Abcissa do ponto de amostragem (UTM)
- UTM_Y - Ordenada do ponto de amostragem (UTM)

2.2.2 Árvores

A informação sobre as árvores provém de um segundo dataset, também com 76 entradas, e 5 variáveis.

1	TreeID	Tree_X	Tree_Y	Trunk_Diameter	Cohort
2	P1-T020	674394.5	5636242.3	60	2
3	P1-T004	674399	5636244	60	2
4	P1-T061	674394.5	5636232.6	100	2
5	P1-T019	674395.2	5636242.3	60	2
6	P1-T025	674388.3	5636245	150	3

Figura 2.2: Dados das árvores (primeiras 5 entradas)

- TreeID - Identificador da árvore
- Tree_X - Abcissa da localização da árvore (UTM)
- Tree_Y - Ordenada da localização da árvore (UTM)
- Trunk_Diameter - Medição do diâmetro da árvore, valor normalizado.
- Cohort - Identificador da classe etária da árvore.

2.2.3 Análise Exploratória

De acordo com a tabela 2.1, verifica-se que existem 26 árvores individuais (nós) ligadas por 6 colónias de fungos, onde 4 deles são da família Vesiculosus e 2 da família Vinicolor.

Plot	TIPO_DE_SOLO	NUMERO_DE_ARVORES	TIPOS_DE_FUNGOS	FUNGO_VESICOLOSUS	FUNGO_VINICOLOR
Plot1	xeric	26	6	4	2

Tabela 2.1: Contagem de árvores e fungos.

Pela tabela 2.2, percebemos que o Tipo de Fungo que mais árvores liga é o “VES-1-01” com 23 árvores ligadas.

Plot	TIPOS_DE_FUNGO	NUMERO_DE_ARVORES
Plot1	VES-1-01	22
Plot1	VES-1-02	1
Plot1	VES-1-03	2
Plot1	VES-1-04	1
Plot1	VIN-1-01	5
Plot1	VIN-1-02	1

Tabela 2.2: Contagem de ligações por colónia fúngica.

Pela tabela 2.3 , verifica-se que existem 6 árvores que são ligadas por dois tipos de fungos diferentes.

Plot	ARVORE	QUANTIDADE DE FUNGOS	FUNGO 1	FUNGO 2
Plot 1	P1-T048	2	VES-1-02	VES-1-03
Plot 1	P1-T019	2	VES-1-01	VES-1-04
Plot 1	P1-T041	2	VES-1-01	VES-1-03
Plot 1	P1-T023	2	VES-1-01	VIN-1-01
Plot 1	P1-T026	2	VES-1-01	VIN-1-01
Plot 1	P1-T001	2	VES-1-01	VIN-1-01
Plot 1	P1-T036	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T033	1	VIN-1-01	
Plot 1	P1-T079	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T020	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T081	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T021	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T037	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T061	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T025	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T049	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T057	1	VIN-1-01	
Plot 1	P1-T042	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T062	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T005	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T080	1	VIN-1-02	
Plot 1	P1-T035	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T004	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T008	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T022	1	VES-1-01	
Plot 1	P1-T038	1	VES-1-01	

Tabela 2.3: Contagem de colónias fúngicas por árvore.

Com toda esta informação, já estamos em condições de construir a Matriz de Adjacência

dos Nós para ser possível construir a rede e calcular todas as medidas de centralidade para a poder estudar com mais detalhe.

2.3 Caracterização da rede

Uma rede micorrízica pode ser modelada por um grafo não orientado, havendo a correspondência entre os vértices e as árvores, e as arestas e as micorrizas (Beiler et al., 2010). Na análise deste tipo de redes é interessante considerar o diâmetro trunca das árvores, assim como a classe etária a que pertecem.

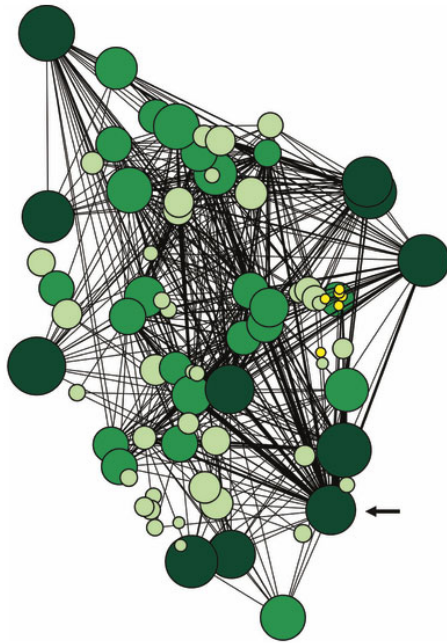


Figura 2.3: Modelo de uma rede micorrízica. Os discos representam as árvores (nós), dimensionados de acordo com o diâmetro trunca da árvore, e coloridos com quatro diferentes tonalidades de verde de forma a identificar a classe etária. As linhas representam, simultaneamente, as ligações entre as árvores e as distâncias euclidianas entre si (Beiler et al., 2010).

2.3.1 Métricas

A rede em análise contém 26 nós e 235 ligações, com $\langle k \rangle \cong 18.08$, $\bar{d} \cong 1.22$ e $cc \cong 0.987$.

2.3.1.1 Árvores com maior centralidade

- Centralidade de Grau: P1-T026
- Centralidade de Excentricidade: P1-T035
- Centralidade de Proximidade: P1-T026
- Centralidade de Intermediação: P1-T026
- Centralidade de Vector Próprio: P1-T026

2.3.1.2 Distribuição dos graus

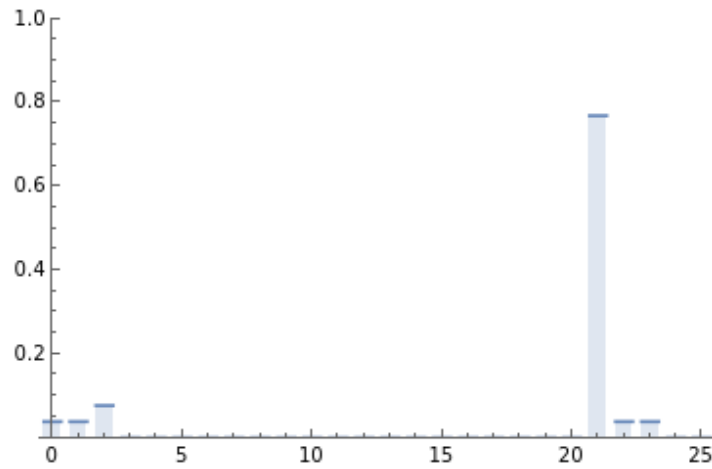


Figura 2.4: Distribuição dos graus da rede micorrízica.

2.3.2 Matriz de Adjacências

Na teoria de grafos e na ciência da computação, uma matriz de adjacências é uma matriz quadrada utilizada para representar um grafo finito ("Adjacency matrix", 2022). Os elementos da matriz indicam se os pares de vértices são adjacentes ou não no grafo.

Definição (Carvalho, s.d.). *Seja $\mathcal{G} = (V, E)$ um grafo finito não orientado, com $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. Chamamos matriz de adjacências, relativamente à ordenação (v_1, v_2, \dots, v_n) , à matriz $A = [a_{ij}]$ do tipo $n \times n$, tal que: $a_{ij} = \text{multiplicidade de } \{v_i, v_j\}$.*

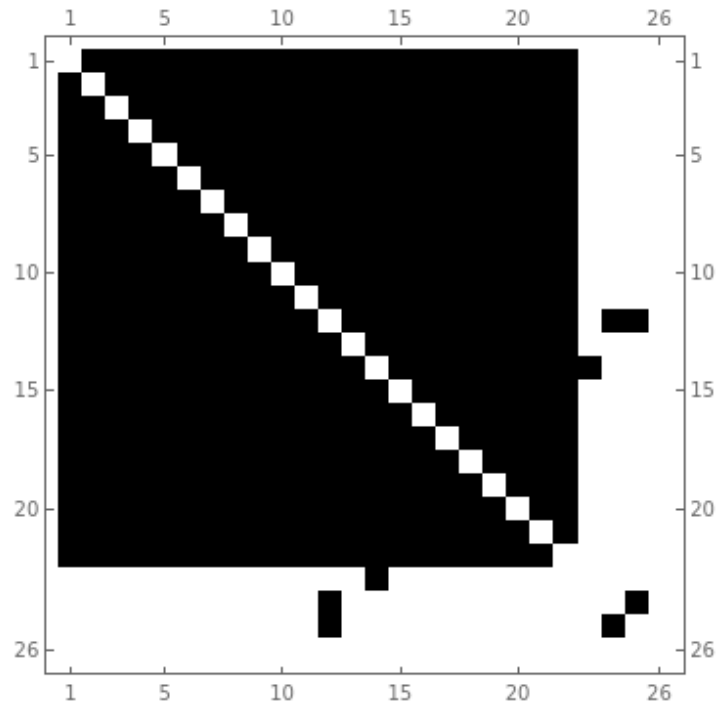


Figura 2.5: Visualização da matriz de adjacências, obtida a partir dos dados da rede em análise.

2.3.3 Diagrama de Rede

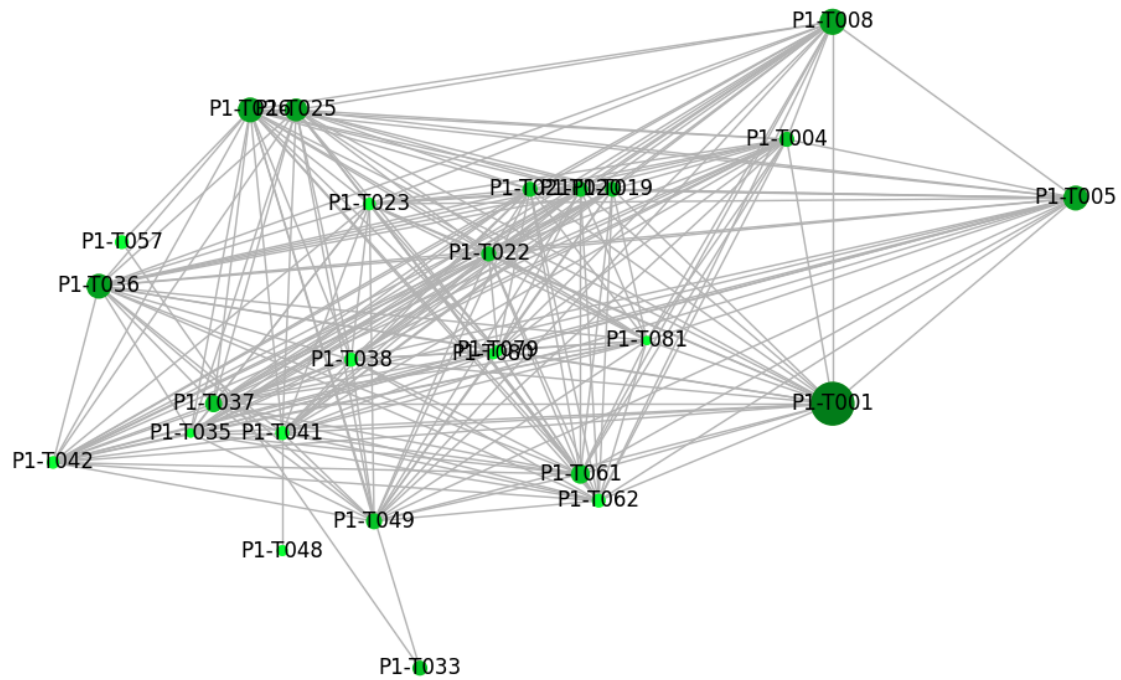


Figura 2.6: Rede fúngica com 26 nós e 235 ligações.

Capítulo 3

Conclusões

Com este trabalho, foi possível verificar o potencial da ciência de redes enquanto *framework* de análise no contexto das redes fúngicas. O diagrama de rede permite visualizar de forma intuitiva vários aspectos das interações florestais.

Bibliografia

- Adjacency matrix. (2022, dezembro 24). Em *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Adjacency_matrix&oldid=1119322733
- Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., & Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: *Rhizopogon* spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*, 185(2), 543–553. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03069.x>
- Beiler, K. J., Simard, S. W., & Durall, D. M. (2015). Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests (M. van der Heijden, Ed.). *Journal of Ecology*, 103(3), 616–628. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12387>
- Carvalho, S. (s.d.). Teoria de grafos [Slides das Aulas]. Moodle. <https://2223moodle.isel.pt/course/view.php?id=5841>
- Fungus. (2022, dezembro 21). Em *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fungus&oldid=1128706548>
- Hansford, D. (2017). The Wood Wide Web. *New Zealand Geographic*, (148). <https://www.nzgeo.com/stories/the-wood-wide-web/>
- Micorriza. (2022, dezembro 22). Em *Wikipedia*. <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Micorriza&oldid=60212041>
- Mycorrhiza. (2022, dezembro 22). Em *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mycorrhiza&oldid=1128476566>
- TEDx Talks. (2017). Nature's internet: how trees talk to each other in a healthy forest | Suzanne Simard | TEDxSeattle. <https://www.youtube.com/watch?v=breDQqrkikM>
- Universidade de Coimbra. (s.d.). Tipos de Micorrizas. Obtido 22 dezembro 2022, de https://www.uc.pt/grasses/Divers_fungica/tipos_de_micorrizas
- Worrall, S. (2016). There Is Such a Thing as Plant Intelligence. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/160221-plant-science-botany-evolution-mabey-ngbooktalk>