

Morfologia, fisiologia e classificação de fungos

Introdução

Até 1969, os fungos eram considerados vegetais, sendo hoje classificados em um reino à parte denominado Fungi. Esse reino reúne, além dos fungos, líquens e algas do gênero Prototheca. As características comuns que reúnem esses seres em um mesmo grupo são: não formação de tecido verdadeiro; parede celular fundamentalmente composta por quitina; armazenamento de glicogênio no lugar do amido; estágio diplóide pouco comum e quando ocorre é de curta duração, sendo seguido prontamente por meiose; e presença de micélio.

Em linhas gerais, os fungos são organismos eucariotos, aclorofilados, apresentando nutrição absorvativa, reprodução sexuada ou assexuada, estruturas somáticas (vegetativas filamentosas e ramificadas), com parede celular. Esse grupo de microrganismo tem relevante importância em nossas vidas, e são conhecidos desde a antiguidade, através dos processos de fermentação.

Os fungos são ubíquos e sua dispersão na natureza pode ocorrer por animais, homens, insetos, água e, principalmente, pelo vento. Já foram descritos aproximadamente 80.000 espécies de fungos, sendo a maioria benéfica ao homem (menos de 50 espécies causam 90% das infecções fúngicas em seres humanos e animais). Os fungos encontrados na natureza são essenciais aos processos de degradação e reciclagem de matéria orgânica. Alguns têm participação na produção de alimentos e bebidas alcoólicas, outros têm importância na medicina, não só causando doenças, mas na produção de medicamentos, como antibióticos (penicilinas) e imunossupressores (ciclosporina).

No ambiente, os fungos são os principais agentes de decomposição em florestas (fungos celulolíticos e ligninolíticos) e liberam nutrientes para as plantas. Podem atuar com organismos simbiotes (micorrizas, líquens, endófitos). Podem também causar danos econômicos, agindo na destruição de madeira em postes, estradas de ferro, navios e casas e de outros materiais, com tecidos, lentes e discos, provocando doenças em plantas, chegando a causar, em alguns casos, extinção de espécies em escala regional. Algumas espécies de fungos são usadas no controle biológico de pragas, parasitando nematoides.

Morfologia macroscópica

Macroscopicamente, os fungos são divididos em filamentosos (bolores ou fungos multicelulares) e em leveduriformes (leveduras, levedos ou fungos unicelulares). No estudo macroscópico, é importante a análise das características das colônias, como verso e reverso (alterado, inalterado), pigmentação (presença ou ausência, cor do pigmento, difuso, restrito à colônia), bordas (regulares, irregulares, radiadas), superfície (lisa, fissurada, rugosa), textura ou consistência, velocidade de crescimento, topografia (plana, convexa, umbilicada, pregueada, cerebriforme), aspecto (brilhante, opaco, seco, úmido), diâmetro da colônia.

Nas leveduras, as colônias se apresentam esféricas ou ovais e de consistência pastosa ou cremosa, apresentando crescimento limitado. Nos fungos filamentosos há uma maior variedade de formas de colônias, por exemplo, quanto à textura podem ser aveludadas, cremosas, butirosas ou mucóides; cotonosas, serosas, camurças, granuladas, membranosas ou coriáceas, verrucosas ou pulverulentas, e apresentarem crescimento invasor (Fig. 1).

Alguns fungos podem, ao longo de sua vida, apresentar mudanças morfológicas e passarem de uma forma para outra. Por exemplo, a espécie *Paracoccidioides brasiliensis*, que provoca micose

pulmonar em agricultores (paracoccidiodomicose), tem a sua forma sexuada multicelular, mas quando infecta o homem adquire a forma de levedura e se reproduz assexuadamente. Outro exemplo é o *Penicillium marneffeii*, causa mais freqüente das peniciloses, que na temperatura ambiente é um bolor e na temperatura corporal é uma levedura. Além da temperatura, outros fatores que regulam o dimorfismo em fungos são: a concentração de CO₂ e o pH do meio.



Figura 1: Placa contendo Agar *Sabouraud*, na qual pode ser observado o crescimento de diferentes colônias fúngicas após uma semana depois de ter sido exposta por alguns minutos ao ar atmosférico. Indicado pelas setas, colônias com características leveduriformes.

Morfologia microscópica

O corpo dos fungos multicelulares apresenta uma organização formando longos filamentos de células conectadas, chamadas de hifas, essas podem apresentar septos ou serem asseptadas ou cenocíticas (Fig. 2). O conjunto de hifas recebe o nome de micélio e pode ser dividido em micélio vegetativo, aquele que cresce para dentro do substrato e tem a função de sustentação e de absorção de nutrientes, e em micélio aéreo, que se projeta na superfície. Alguns pontos do micélio aéreo podem se diferenciar e formar o micélio reprodutivo, formando esporos ou propágulos sexuada ou assexuadamente.

As leveduras são células isoladas, que ao se reproduzirem por brotamento, produzem uma cadeia alongada de células unidas, formando pseudo-hifas (Fig. 3). Sua morfologia microscópica é semelhante nas diferentes espécies de fungos leveduriformes.

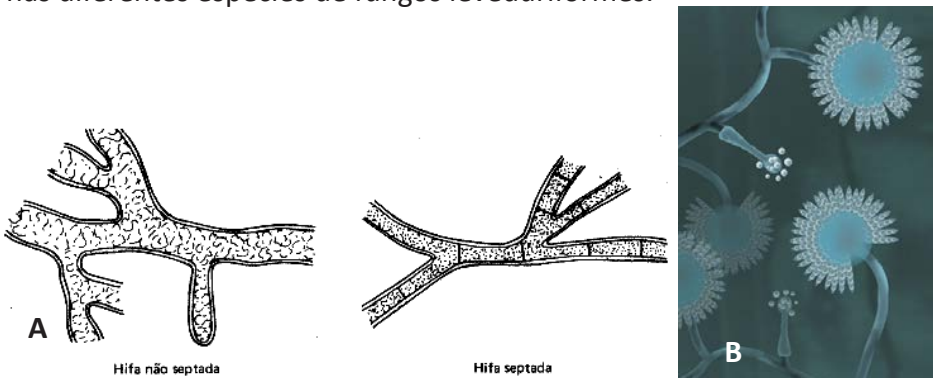
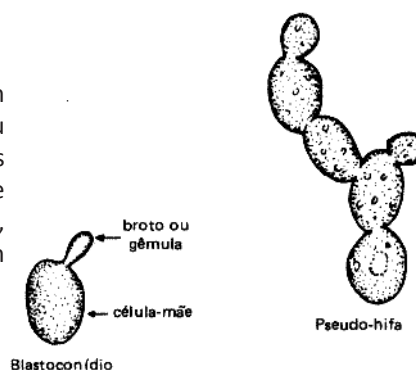


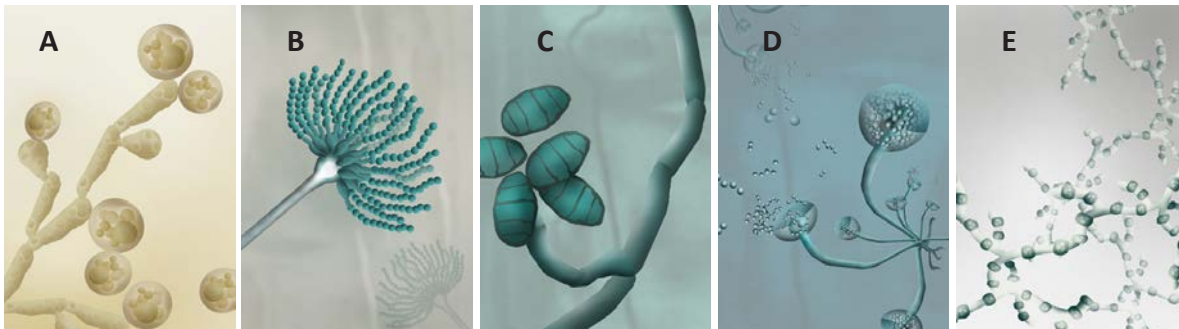
Figura 2: (a) Representação esquemática de hifas não septadas (cenocíticas), apresentando um citoplasma multinucleado, lembrando um sincício; e de hifas septadas, apresentando compartimentos celulares. (b) Representação de hifas não-septadas em fungos filamentosos do gênero *Syncephalastrum*.

Figura 3: Estruturas encontradas em leveduras. Os blastoconídios (broto ou gêmula) são estruturas reprodutivas típicas de fungos leveduriformes, que se originam a partir da célula-mãe, por brotamento. Eles permanecem ligados, formando pseudo-hifas.



1. Tipo de esporos

Os fungos apresentam diferentes tipos de propágulos, sendo classificados como assexuados ou sexuados, internos ou externos. Os blastoconídios (Figs. 3 e 4a) são típicos de fungos leveduriformes. Nos fungos filamentosos, os conídios (Figs. 4b e 4c) são os esporos mais comuns, eles são assexuados e formados no exterior das hifas reprodutivas, tendo relevante papel na dispersão. Outro exemplo de propágulos assexuais são os esporangiósporos (Fig. 4d), que se formam internamente na hifa. Os esporos sexuados são os basidiósporos, que são externos, e os ascósporos, que são internos. Arthroconídios (Fig. 4e) e clamidoconídios são comuns em fungos filamentosos e leveduriformes.



Ilustrações: Mário Silva

Figura 4: Representação esquemática dos alguns tipos de esporos produzidos por fungos. (a) Blastoconídios, característico de leveduras, produzidos por brotamento em *Candida albicans*. (b) Conídios de *Aspergillus* sp. agrupados em torno de uma vesícula. (c) Conídios de *Curvularia* sp. organizados em cadeias na extremidade dos conidióforos. (d) Esporangiósporos de *Rhizopus* sp. dentro de esporângios. (e) Arthroconídios formados por fragmentação de hifas em elementos retangulares, presentes tanto em fungos filamentosos, com em leveduras, um exemplo é *Coccidioides immitis*, que pode adquirir as duas formas.

Hifas especializadas, ou reprodutivas, dão origem aos propágulos assexuados. Os conídios são formados a partir do conidióforo, enquanto os esporangiósporo são formados em uma estrutura chamada esporângio (Fig. 4d), sustentada pelo esporangióforo.

Os propágulos sexuados se originam pela fusão de estruturas diferenciadas. Os ascóporos são formados dentro de estruturas chamadas ascos, que podem ser simples ou estarem distribuídos em lóculos (ascostroma) no micélio, ou contidos em corpos de frutificação (ascocarpos). Estas últimas estruturas de frutificação podem ter três diferentes formas: cleistotécio (estrutura fechada e globosa), peritécio (estrutura piriforme, com uma abertura chamada ostíolo) ou apotécio (estrutura aberta em forma de cálice) (Fig. 5). Os basidiósporos, esporos característicos de cogumelos, originam-se externamente a uma estrutura chamada basídio (Fig. 6).

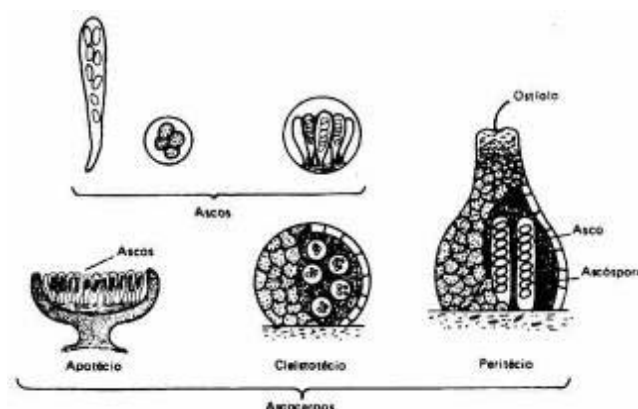


Figura 5: Representação esquemática dos diferentes tipos de ascos e ascocarpos.

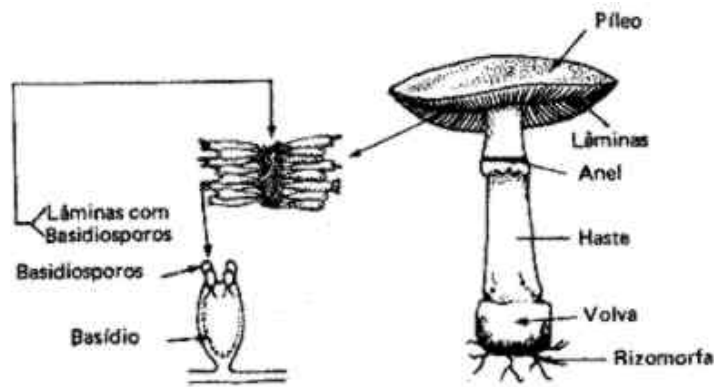


Figura 6: Principais estruturas encontradas em Basidiomicetos. As estruturas reprodutivas estão ilustradas à esquerda da figura.

2. Estrutura celular

A célula fúngica apresenta os principais componentes das células eucarióticas. O estudo dos constituintes celulares de fungos segue abaixo:

a) Parede celular: Estrutura rígida, feita de material fibroso, depositada em camadas concêntricas, com função de proteção contra pressão osmótica. A sua constituição depende do fungo, podendo ser basicamente de quitina ou da mistura de duas substâncias (glucanas e mananas). A quitina é um polímero de glicose imerso em uma matriz protéica que está restrita a área de blastoconidiação na parede, sendo encontrada em maior proporção em fungos filamentosos do que em leveduras. As glucanas e mananas formam glicoproteínas, manoproteínas e glicoproteínas, estando associadas a proteínas. As glucanas são polímeros de glicose ligados por pontes β -glicosídicas, enquanto as mananas são polímeros de manose e é o material amorfo da parede.

b) Membrana citoplasmática: Constituída de fosfolípidos, apresentando uma parte polar, constituída de diacilglicerolfosfolinas e diacilgliceroetanolaminas, e outra apolar, constituída por triacilgliceróis e esteróides (ergosterol). Enquanto as proteínas presentes na membrana atuam como enzimas, os lipídeos fornecem propriedade estrutural. A membrana atua como barreira semipermeável e no transporte ativo e passivo dos materiais. Nela ocorre invaginações que dão origem a vacúolos ou vesículas (pinocitose).

c) Vacúolos (vesículas, microcorpos, citossomos, esferossomos, fragmossomos ou partículas gama): Podem ser de dois tipos: digestivo ou de reserva. Podem estar relacionados aos sistemas enzimáticos ou conter glicogênio ou lipídeos, por exemplo. Eles podem apresentar vários tamanhos, ocupando de 30% a 90% do conteúdo celular.

d) Retículo endoplasmático: Sistema em rede espalhado por toda a célula, podendo ser liso ou rugoso (quando associado a ribossomos 80s). É provido da membrana nuclear.

e) Aparelho de Golgi: Sistema de vesículas e canalículos, que tem a função de armazenamento de substâncias que serão excretadas pela célula. Essa organela não está presente em todos os fungos.

f) Lomassomos: Corpúsculos presentes no periplasma, espaço entre a parede e a membrana celular. Provavelmente estão envolvidos com a secreção, formação de parede e síntese de glicogênio.

g) Mitocôndrias: Essa organela contém DNA e ribossomos próprios. Variam de tamanho e forma nos diferentes grupos de fungos e em diferentes condições fisiológicas.

h) Capa nuclear: Presente em alguns grupos de fungos aquáticos, que possuem flagelo. Essa estrutura cobre parcialmente o núcleo e é constituída densamente por ribossomos.

i) Centríolo: Presente nas células fúngicas flageladas.

j) Cinetossomo (corpo basal ou blefaroplasto) e flagelo: Presente em fungos aquáticos. O flagelo se origina de uma "placa basal".

k) Núcleo e cromossomos: A carioteca é formada por uma dupla membrana com poros bem distribuídos. Uma característica do núcleo de fungos é a presença de fuso meiótico ou mitótico. Os cromossomos são lineares, o DNA é de dupla fita contendo histonas. O nucléolo, presente no núcleo contém DNA, RNA e proteínas e é o sítio de produção do RNA ribossomal.

l) Septos e poros septais: Podem ser total, em zigomicetos, ou perfurado, nos demais fungos. Os poros permitem a passagem de citoplasma, organelas e até mesmo do núcleo celular, quando isso

acontece, a célula se torna $2n$ (dicariótica). Os septos podem ser uniporados ou multiporados.

m) Protoplastos ou esferoplastos: Células fúngicas sem parede celular.

n) Ribossomo: Sítios de síntese protéica. A subunidade 60S e a 40S formam a partícula ribossomal (80S).

o) Cápsula: Presente em alguns fungos, sendo importante na patogenia, dificultando a fagocitose. Ela é constituída por mucopolissacarídeos, com estrutura fibrilar de amilose e proteínas semelhantes à goma arábica.

Fisiologia

Os fungos são organismos heterotróficos, ou quimiorganotróficos, incapazes de assimilar o carbono inorgânico, exigindo carbono orgânico que será utilizado como material plástico ou energético. Os processos de obtenção de energia é a respiração e a fermentação. Esses microrganismos são em sua maioria aeróbios obrigatórios, com exceção de algumas leveduras que são fermentadoras anaeróbias facultativas. Na respiração ocorre a oxidação da glicose. Em condições aeróbias, 30% da glicólise ocorre pela via de hexose monofosfato, em anaerobiose, a via clássica usada pelas leveduras é a Embden-Meyerhof, formando piruvato.

Os fungos para se nutrirem precisam viver em estado de saprofitismo, parasitismos ou simbiose. Sua nutrição na maioria das vezes ocorre por absorção (enzimas hidrolíticas degradam macromoléculas e essas são assimiladas por mecanismos de transporte). Para seu desenvolvimento, os fungos são capazes de utilizar diferentes fontes de carbono, incluindo carboidratos complexos como a lignina (componente da madeira), lipídeos, ácidos nucléicos e proteínas, mas, preferencialmente, utilizam carboidratos simples como a D-glicose. Fontes de nitrogênio também são necessárias, podendo ser inorgânica (amônias ou nitratos) ou orgânica (peptona, sulfatos e fosfatos). Alguns oligoelementos (ferro, zinco, manganês, cobre, cálcio, por exemplo) são exigidos em pequenas quantidades. Fatores de crescimento, como as vitaminas, também são essenciais.

A maioria dos fungos cresce em atividade de água na faixa de 0,8 (os valores oscilam entre 0 e 1). Algumas espécies são halófilicas (crescem em elevada concentração de sal). Há uma ampla faixa de temperatura, podendo ser encontrados fungos psicrófilos, mesófilos e termófilos. O pH ótimo para crescimento fica em torno de cinco. A forma e a esporulação em fungos podem ser influenciadas por estes fatores e pelas condições nutricionais, apresentando algumas espécies dimorfismos, variando sua forma morfológica, ou pleomorfismo, em dermatófitos, que é expresso pela perda de estruturas de reprodução e mudanças na morfologia das colônias. As estruturas vegetativas dos fungos crescem preferencialmente em ambientes com pouca luz, enquanto a parte reprodutiva procura a luz para se desenvolver.

Reprodução

1. Ciclo assexuado

a) Brotamento do blatoconídio-mãe, produzindo novos blastoconídios. A célula parental forma um broto na sua superfície externa. À medida que o broto se desenvolve, o núcleo da célula parental se divide e um dos núcleos migra para o broto. O material da parede celular é então sintetizado entre o broto e a célula parental, separando-os.

b) Fragmentação do astroconídio. As hifas crescem por alongamento das extremidades. Um fragmento quebrado pode se alongar para formar uma nova hifa.

c) Fissão das células somáticas em células-filhas.

d) Produção de esporos assexuais, através da germinação das hifas, formando um tubo germinativo que se desenvolve formando o micélio. Esse é o tipo mais comum de reprodução assexuada em fungos.

2. Ciclo sexuado

Em fungos, a reprodução sexuada envolve a união de dois núcleos compatíveis, e é dividida em três fases:

a) Plasmogamia: Fase caracterizada pela união de dois protoplastos. Os núcleos haplóides, da célula doadora (+) e o da receptora (-), permanecem juntos na célula receptora. Nesta fase, os fungos superiores são chamados de dicários ou dicarióticos.

b) Cariogamia: Os núcleos se fundem para formar um zigoto diplóide.

c)Meiose: O núcleo diplóide origina um núcleo haplóide (esporos sexuais), dos quais alguns podem ser recombinantes genéticos.

Os gametângios, que são os órgãos sexuais, podem formar gametas ou conter núcleos gaméticos. O gametângio masculino se chama anterídio, e o feminino, oogônio. Estes podem ser heterogametângios, quando são morfologicamente diferentes, ou isogametângios, quando são idênticos. As espécies heterotálicas são aquelas que apresentam gametas da célula doadora e da receptora localizadas em talos separados ou quando apresentam ambos os sexos, mas os gametas não são compatíveis. Espécies homotálicas ou hermafroditas são aquelas que produzem gametas (+) e (-) autocompatíveis no mesmo talo.

3.Ciclo parassexual

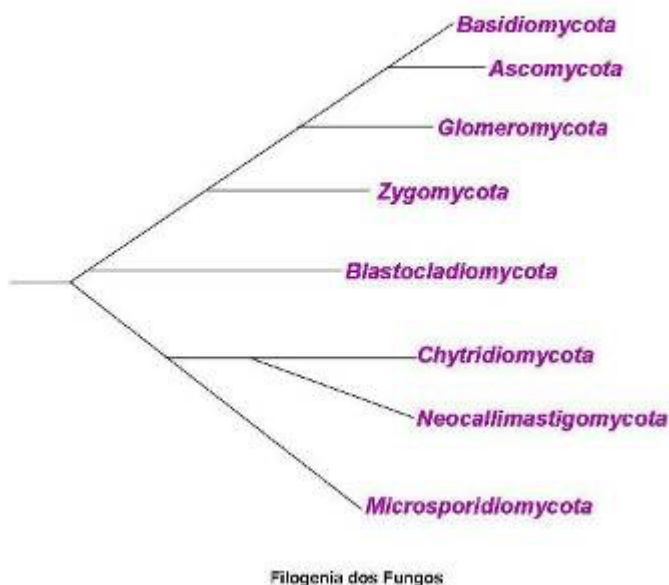
Consiste na fusão de hifas e na formação de heterocarion, contendo núcleos haplóides. Quando estes núcleos se fundem, ocorre a recombinação de cromossomos homólogos na mitose, através de um “crossing-over” mitótico, sem ser observado o processo de meiose.

Taxonomia

A identificação dos fungos sempre foi feita quase que basicamente pela morfologia de suas estruturas macro e microscópicas, mas atualmente técnicas moleculares têm ajudado os cientistas a melhorar a classificação. Os pesquisadores estão conduzindo uma pesquisa no Reino Fungi utilizando um método chamado seqüência de multilocus, analisando e avaliando as relações entre esses microrganismo baseando-se nas similaridades das seus seqüências gênicas. Este estudo mostra que o Reino Fungi contenha pelo menos oito filos distintos, em vez de quatro como se via antes nas classificações. Os filos são:

- 1.Filo Ascomycota
- 2.Filo Basidiomycota
- 3.Filo Zygomycota
- 4.Filo Chytridiomycota
- 5.Filo Glomeromycota
- 6.Filo Blastocladiomycota
- 7.Filo Neocallimastigomycota
- 8.Filo Microsporidiomycota

A relação filogenética entre os oito filos de fungo pode ser vista na Figura 7:



CAMERON R. et al *Fungus-growing ants use antibiotic-producing bacteria to control garden parasites* - Nature 398, 701 - 704 (2009) © Macmillan Publishers Ltd

JAWETZ; MELNICK; ADELBERG. Microbiologia médica. 24 ed. Rio de Janeiro. Editora McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda. 2009.

LACAZ, Carlos da S.; PORTO, Edward; MARTINS, José Eduardo C.; HEINS-VACCARI, Elisabeth Maria; MELO, Natalina T. de. Tratado de micologia médica Lacaz. 9 ed. Editora Sarvier. São Paulo. 2002.

RAVEN, Peter H.; EVERT, RAY F.; EICHHORN, SUSAN E. Biologia Vegetal. 7 ed. Editora Guanabara Koogan. Rio de Janeiro. 2007.

TORTORA, Gerard J.; FUNKE, Berdell R.; CASE, Christine L. Microbiologia. 8 ed. Editora Artmed. Porto Alegre. 2009.

