





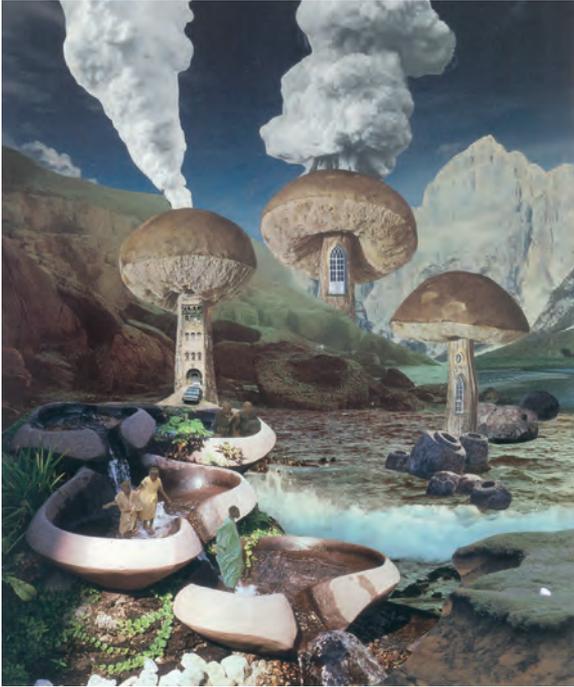
## FORMAS FÚNGICAS DE REPRODUCIRSE

Rodolfo Salas Lizana

**U**nos meses antes de casarse con su prima, Darwin escribió algunas notas sobre las ventajas y desventajas del matrimonio. Entre las primeras estaban la compañía constante, una amistad al llegar a viejos y tener hijos "si Dios quiere". Las segundas incluían perder el tiempo, no tener suficiente dinero para libros ni libertad para viajar. Es notable que Darwin, estudioso obsesivo de la naturaleza, considerara necesario el matrimonio para reproducirse.

Aunque no es un requisito indispensable para todos ellos, la posibilidad de generar descendencia a través del sexo es muy frecuente en los eucariontes: protistas, algas, plantas, animales y, por supuesto hongos. De hecho, es probable que el ancestro común de todos ellos ya lo hiciera así. Quizás ocurre esto porque de la reproducción sexual, más que de la asexual, resulta una mayor variación genética. En ella suceden la meiosis y la recombinación, que mezclan azarosamente fragmentos de los genomas parentales como quien revuelve dos barajas, y produce un genoma único en cada descendiente. Por otro lado, en la reproducción asexual los individuos nuevos son una copia casi idéntica del organismo que les dio origen. Ese casi está dado por la bajísima probabilidad de que en la mitosis ocurra alguna mutación mientras se duplica el material genético. No obstante, el sexo también ofrece algunas desventajas frente a la reproducción asexual, como el tiempo y el esfuerzo que se emplea en buscar una "buena" pareja, el riesgo de contraer enfermedades y la pérdida de variantes ventajosas de los padres, pues solo se hereda una parte del material genético de cada uno.

◀ ©Seana Gavin, *Mindful Mushroom*, de la serie *Mushrooms*, 2017. Cortesía de la artista



©Seana Gavin, *Untitled, Mushroom Chimney*, de la serie *Mushrooms*, 2017. Cortesía de la artista

A través de la evolución, los hongos han podido aprovechar ambas modalidades reproductivas. La asexual es ventajosa en un ambiente más o menos estable y con abundante alimento, algo así como que pudieras hacer una miríada de copias de ti mismo para aprovechar hasta la última migaja de un enorme buffet. De esta forma actúa el hongo fitopatógeno *Puccinia graminis* en un campo de trigo, pues produce millones de esporas asexuales que infectan a muchísimas plantas del cultivo, su buffet. No obstante, al terminar la temporada agrícola, cuando el ambiente se torna inhóspito, la reproducción sexual puede ser más ventajosa: los individuos de *P. graminis* liberan esporas de paredes gruesas que sobreviven el invierno y producen individuos recombinantes en la primavera. Así, con un poco de suerte, esta descendencia tendrá la variación suficiente para infectar una nueva generación de plantas.

La funga es tan antigua como la flora y la fauna, por eso no sorprende que millones de años

después existan diferencias notables entre sus sistemas genéticos. Los núcleos de plantas y animales son *diploides*, mientras que en los hongos son casi siempre *haploides*. Dicho de otra manera, nosotros tenemos dos copias de cada cromosoma en nuestros núcleos celulares, en cambio, muchos hongos solo tienen una. Esto implica que sus ciclos de vida son muy diferentes al nuestro. Mientras que para nosotros inicia con la unión de dos gametos haploides para formar un cigoto diploide que se desarrollará hasta ser un adulto, el ciclo de vida de la mayoría de los hongos comienza con la producción de esporas haploides y recombinantes que germinan y producen un nuevo talo compuesto de hifas o de levaduras. Esto último sería equivalente a que nuestros gametos pudieran desarrollarse independientemente y convertirse en adultos. Algunos hongos permanecen haploides durante casi toda su vida; otros, como las setas y champiñones (en la clase *Agaricomycetes* del *Phylum Basidiomycota*) fusionan sus hifas al poco tiempo de que las esporas germinan y forman un micelio con dos núcleos haploides llamado *dicariótico*. Esta estrategia produce individuos que, como nosotros, tienen dos copias de cada cromosoma, solo que en núcleos separados. Cada copia de los genes contenidos en esos cromosomas, así como en los nuestros, podría ser diferente, lo que aumenta la variabilidad de los individuos.

En los seres humanos y muchos otros animales, el sexo está determinado por los genes de los cromosomas sexuales X y Y. Los productos de estos genes contienen la información necesaria para el desarrollo de los diferentes órganos sexuales y las diferencias morfológicas entre ambos sexos. En cambio, en los hongos no hay cromosomas sexuales y para la gran mayoría no hay diferencias morfológicas que

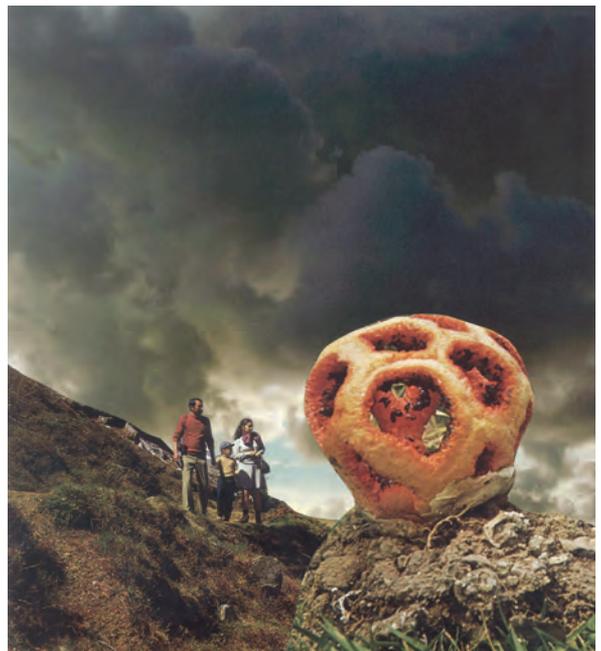
## Una vez que las hifas se reconocen como pareja potencial se fusionan, de manera que el contenido de sus células se mezcla.

correspondan a lo que nosotros reconocemos como femenino y masculino. Sin embargo, la mayoría de los hongos poseen dos tipos de compatibilidad, es decir, dos sexos. En estos sistemas el sexo está determinado por un locus (el término técnico para referirse a una región específica del genoma) que puede tener uno o más genes, los cuales, como los genes de los cromosomas X y Y, son distintos en cada uno de los dos sexos y se complementan. Entre las funciones del locus están la producción de las señales químicas (feromonas) que atraen a parejas potenciales, su recepción, la meiosis y la formación de estructuras de reproducción. Los genes pueden variar entre linajes, pero en ellos se suelen codificar proteínas que regulan la expresión de otros genes.

En contraste, el sexo de algunas especies de *Agaricomycetes* está determinado por dos regiones (*loci*) distantes en el genoma; este cambio aparentemente sencillo permite la existencia de miles de sexos. Las hifas de estos hongos se atraen a distancia gracias a las feromonas que están codificadas en el primer locus (B). Para que un par de individuos se atraigan, las feromonas deben ser diferentes a las propias; es decir, deben tener diferentes *alelos* o variantes en los genes del locus B. Una vez que las hifas se reconocen como pareja potencial se fusionan, de manera que el contenido de sus células se mezcla. Para que este "matrimonio" entre hifas funcione, deben formar unas proteínas que están compuestas de dos partes, cada una proveniente de uno de los padres. La producción de estas proteínas, que serán compatibles únicamente si son diferentes entre sí, está codificada en los genes del segundo locus (A), donde también hay muchos alelos. Un ejemplo más gráfico podría ser el siguiente: las proteínas  $A_1B_1$  y  $A_3B_2$  son compatibles entre sí,

mientras que  $A_2B_3$  y  $A_3B_3$  son incompatibles por compartir  $B_3$ .

En resumen, para que esta historia tenga un "final feliz", los individuos involucrados deben tener alelos diferentes en cada uno de los dos *loci*. Es difícil imaginar cómo funciona este sistema desde la perspectiva humana. Es como si tuviéramos un segundo par de cromosomas sexuales y todos ellos tuvieran diferentes letras del alfabeto, de manera que la combinación de los dos pares de letras en cada individuo determinara un sexo diferente y compatible con cualquier otro sexo, siempre y cuando este último tenga otra combinación. Dada la cantidad de alelos que la especie *Schizophyllum commune* tiene en los *loci* A y B, se estima que en ella



©Seana Gavin, *Afternoon Walk*, de la serie *Mushrooms*, 2021. Cortesía de la artista

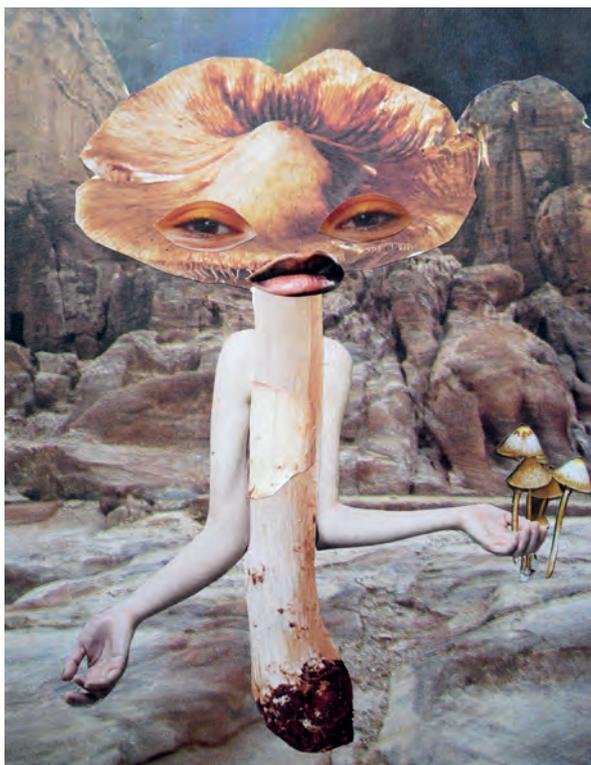
son posibles más de 20 mil combinaciones o sexos. Este complicado sistema le facilita encontrar pareja, garantiza que la reproducción sexual ocurra entre dos individuos diferentes y maximiza la variación generada por la recombinación.

Así como hay algunos hongos que tienen miles de sexos, existen otros con sistemas muy inusuales en plantas y animales. Por ejemplo, la levadura de la cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) es un organismo unicelular que puede reproducirse tanto asexual como sexualmente y cambia a uno de los dos sexos posibles en su especie después de cada mitosis. Esto lo logra a través de la edición del ADN —una operación parecida a cortar, copiar y pegar un tex-

to—, mediante la cual reemplaza un fragmento de este que expresaba un sexo por una copia de ADN que expresa el otro. Después de miles de mitosis con levaduras cambiando de un sexo al otro, la población estará compuesta por individuos de cada uno en la misma proporción, algo que será muy útil para encontrar pareja cuando llegue el momento de la reproducción sexual. Sin embargo, esto significa que los apareamientos entre levaduras “hermanas” (con genomas casi idénticos provenientes de la mitosis) son frecuentes y, por tanto, que la recombinación no produce una progenie significativamente diferente a los padres. A pesar de ello, este método de reproducción sigue siendo ventajoso, pues durante la meiosis de todos los organismos sexuales (nosotros incluidos) ocurre una especie de limpieza de los cromosomas y reparación del ADN. Ese proceso restablece el reloj biológico de las levaduras, que si bien no tendrán los beneficios de la recombinación, sí tendrán los cromosomas “como nuevos”.

Las funciones del sexo que van más allá de generar variación no son exclusivas de las levaduras. El hongo *fimícola* (una palabra elegante para decir que “le gusta” crecer en el excremento) *Podospora anserina* aprovecha los ciclos sexuales para eliminar genes duplicados sin función aparente en el organismo, también llamados *egoístas*, que pueden multiplicarse en los genomas y causar mutaciones indeseables. Este mecanismo contribuye a mantener los genomas fúngicos pequeños, comparados con los de animales y plantas, lo que implica, entre otras cosas, que los hongos tienen proporcionalmente más genes codificantes de proteínas en sus genomas que los otros dos grupos de organismos.

Algunos hongos perdieron la capacidad de reproducirse sexualmente, pero eso no ha im-



©Seana Gavin, *Untitled, Mushroom Lady*, de la serie *Mushrooms*, 2021. Cortesía de la artista



©Seana Gavin, *Land of the Midnight Mushroom* (detalle), 2019. Cortesía de la artista

pedido que, gracias a la evolución, hayan desarrollado sistemas que mantienen o incrementan la variación genética. Muchos mohos, como las especies en los géneros *Penicillium* o *Aspergillus* (comunes en frutas y otros alimentos), pueden formar hifas con núcleos haploides provenientes de dos o más individuos. A este fenómeno se le llama *heterocariosis* y ocurre como efecto secundario del sistema de auto-reconocimiento de dichos hongos, que es análogo a nuestro sistema inmunitario. Las hifas se reconocen como propias cuando los alelos en un puñado de *loci* son idénticos, mientras que pueden ser diferentes en el resto de sus miles de genes. Las hifas que se reconocen de esta manera se fusionan y los genes de ambos núcleos se complementan cuando estas hifas crecen en ambientes donde no sobrevivirían de manera individual. Como si esto fuera poco, la heterocariosis abre la puerta a un proceso llamado *ciclo parasexual*, que puede generar una variación equivalente a la de la recombinación. De vez en cuando los dos nú-

cleos diferentes se fusionan, lo que da lugar a núcleos diploides que, después de varias mitosis un poco accidentadas, producen núcleos haploides con combinaciones al azar de los cromosomas de los núcleos originales. Estos núcleos recombinantes pueden dispersarse en esporas asexuales con la posibilidad de colonizar ambientes nuevos. El comensal y patógeno de humanos *Candida albicans* es capaz de este tipo de proceso, que le ha permitido superar, junto con otras características, los fármacos que usamos para controlar sus infecciones.

La alta capacidad de adaptación de los hongos se debe, en parte, a su versatilidad sexual, pero también al enorme tamaño de muchas de sus poblaciones. Como ya mencioné, la reproducción asexual produce millones de individuos casi idénticos al organismo que les dio origen, con algunas pocas mutaciones nuevas y diferentes entre ellas, pues estas ocurren de manera azarosa e independiente en cada mitosis. La mayor parte de las mutaciones no tendrán efecto en la eficacia de los individuos,

muchas serán perjudiciales y muy pocas resultarán ventajosas. De la misma forma en que tener más boletos incrementa la probabilidad de ganar un premio de lotería, en poblaciones más grandes existen mayores posibilidades de tener mutaciones ventajosas en menos tiempo. Los seres humanos hemos aprovechado este principio en la biotecnología. Por ejemplo, después de que Alexander Fleming descubriera los efectos antibióticos del hongo *Penicillium chrysogenum* fue necesario escalar industrialmente la producción de penicilina. Para lograrlo se utilizaron técnicas que aumentaron la tasa de mutación en miles de individuos experimentales y originaron variantes que incrementaron 15 mil veces la producción con respecto al cultivo original. Sin embargo, esta misma capacidad de adaptación puede jugar en nuestra contra. El uso indiscriminado de un grupo de sustancias antifúngicas (los azoles) en la agricultura intensiva está provocando que evolucione la resistencia a estos. Además del riesgo para la seguridad alimentaria que representa, quizá lo más grave es que muchos hongos del suelo pueden producir infecciones oportunistas en humanos, las cuales prácticamente solo pueden ser tratadas con azoles. El calentamiento global y la evolución de la resistencia de los hongos a los antifúngicos pueden provocar de manera conjunta una crisis de salud pública a escala mundial en los próximos años.

Los seres humanos hemos moldeado la variación genética de algunos hongos desde mucho antes de saber siquiera cómo ocurría la herencia. La producción de cerveza industrial, por ejemplo, depende de dos linajes de levadura que comenzaron a ser domesticados en Europa durante el siglo XVII. Entre las características que se seleccionaron, a veces de forma

inadvertida, destacan su gran capacidad para usar maltosa como alimento, la reducida producción de metabolitos que pueden dar mal sabor al producto, la pérdida de genes que eran indispensables para la vida libre y que se correlacionan con una baja supervivencia en la naturaleza, y su casi nula reproducción sexual. Por el contrario, toda la variedad alrededor del procesamiento de muchos vinos es bienvenida, incluida la variación en las levaduras, que se reproducen sexualmente con mucha frecuencia y sobreviven muy bien en la superficie de las uvas.

Conocer los sistemas genéticos de los hongos es vital para crear estrategias que mitiguen sus efectos negativos y, al mismo tiempo, aprovecharlos lo mejor posible. Estudiarlos desde esta perspectiva nos brinda herramientas para entender mejor la naturaleza misma del sexo, su evolución y los alcances y limitaciones de la variación. Aunque me he centrado en la variabilidad genética, hay otras variaciones que son igual de relevantes en la evolución, como la que ocurre mientras los individuos se desarrollan hacia la vida adulta y la que involucra la expresión de diferentes morfologías cuando hay cambios en el ambiente sin que por esto haya cambios genéticos. Recordemos que la inmensa cantidad de especies pertenecientes al reino de los hongos son el resultado de millones de años de "experimentos" evolutivos que han producido una interesantísima variedad de formas, colores y, por supuesto, maneras de "tener sexo". **U**

---

Gracias a Oscar A. Medellín Cepeda por su ayuda en la escritura de este artículo.

©Juan Carlos León, de la serie *Kallumpakunamikan shunku*, *Colonizar el fin*, 2021. Cortesía del artista ▶