

Matías Pandolfi

Martín Ramallo

Agustina Birba

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

# El cerebro de los peces y sus variadas formas de reproducción

## El grupo más diverso de vertebrados

En la actualidad los peces conforman el grupo de vertebrados con mayor número de especies, las que exceden las 31.000, más que las de todos los otros grupos de vertebrados sumadas. Para conservar esa gran biodiversidad, así como para la cría de especies comestibles, especialmente de agua dulce, o de especies que pueblan los acuarios ornamentales, no alcanza con conocer sus características generales. Es importante,

además, comprender su fisiología, es decir, cómo funcionan todos los sistemas de estos animales adaptados al medio acuático. En esa abundancia de organismos podemos encontrar una gran diversidad de formas, colores, tamaños, dietas, hábitats, maneras de reproducirse y modos de vida.

Los primeros estudios sobre la fisiología de los peces datan de mediados de la década de 1960, mucho más

	PECES	AVES	REPTILES	ANFIBIOS	MAMÍFEROS	TOTAL
Número de especies	31.300	9.998	9.084	6.433	5.490	62.275
Porcentajes	50,2	16,0	14,6	10,4	8,8	100,0

Diversidad de los vertebrados. Datos de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2010.

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

El estudio del funcionamiento del cerebro, del comportamiento y de las modalidades reproductivas de los peces es importante para el avance de múltiples disciplinas científicas.

Pez dorado chino (*Carassius auratus*), del que se descubrió en la década de 1980 que la actividad eléctrica de algunas neuronas cerebrales se mantenía idéntica en animales muertos y en vivos, y permanecía así por hasta veinticuatro horas después de la disección de su cerebro si este se conservaba en un medio adecuado y con buena aireación. Fue domesticado hace siglos y en la actualidad existen diversas razas de acuario cuyos ejemplares tienen muy diversos tamaños y configuraciones. Lámina de William Houghton & Alexander Lydon, *British Fresh-Water Fishes*, Londres, 1879.



tarde que los similares sobre mamíferos, y desde entonces se han producido grandes avances. Mucho de lo que se aprende sobre las características únicas de estos animales acuáticos puede servir para conocer cómo funcionan los animales en general, incluidos los terrestres y, como parte de ellos, los mamíferos, los que incluyen a los humanos.

## Un cerebro con propiedades únicas

Los peces constituyen un excelente modelo para estudiar el sistema nervioso de los vertebrados, ya que poseen dos características únicas: (i) fuera de la cabeza su cerebro mantiene sus funciones casi intactas por muchas horas, y (ii) son capaces de formar nuevas neuronas en muchas regiones del cerebro durante su vida adulta.

La primera característica del cerebro de los peces permite estudiar por largos períodos la actividad eléctrica de sus neuronas con el órgano intacto. En otros vertebrados, en cambio, siempre se debe trabajar con porciones de masa encefálica. En la década de 1980 se demostró que la actividad eléctrica de algunas neuronas de cerebros disecados del pez dorado chino (*Carassius auratus*) era idéntica a la de los animales vivos, y se mantenía así por hasta veinticuatro horas después de la disección si el cerebro se conservaba en un medio adecuado y con buena aireación. Se comprobó también en esos experimentos que por hasta diecisiete horas luego de retirar el cerebro del cráneo la síntesis y la liberación de proteínas fuera de las neuronas eran idénticas en ellos y en animales intactos. A partir de ese estudio pionero se hicieron otros sobre diferentes especies ictícolas que permitieron ana-

lizar, de un modo más cercano a la realidad fisiológica que en otros vertebrados, el funcionamiento de zonas específicas del cerebro. Estos estudios permiten investigar el sistema nervioso ocasionando mínimo daño en los numerosos axones y dendritas, que son unas delicadas prolongaciones de las neuronas.

La segunda característica del cerebro de los peces, técnicamente llamada *neurogénesis adulta*, contradice uno de los principios aceptados de la biología, según el cual no existía formación de nuevas neuronas en la vida adulta de los vertebrados. En 1962, un grupo de investigación del Instituto de Tecnología de Massachusetts dirigido por Joseph Altman (que en 2011 recibió el premio Príncipe de Asturias), demostró que algunas zonas del cerebro de las ratas eran capaces de formar nuevas neuronas. Hoy es ampliamente aceptado que en cuatro regiones específicas del cerebro de los mamíferos –ventrículos laterales, hipocampo, corteza del cerebelo y mucosa olfatoria– hay formación de nuevas neuronas a partir de células precursoras. Algo similar ocurre en los reptiles y en las aves, grupos para los que no hay tantos estudios que lo avalen como para mamíferos.

En contraste, los peces exhiben una capacidad mucho mayor para la neurogénesis adulta y la regeneración neuronal. El primer estudio sobre el tema se llevó a cabo en 1970, sobre una especie de agua dulce del norte de Sudamérica denominada lebiste o guppy (*Poecilia reticulata*), muy conocida por los aficionados a los peces tropicales. Investigaciones posteriores de esa y otras especies dejaron en evidencia que la capacidad neurogenerativa de los peces se da en todo el cerebro y durante toda la vida. Es cuatro veces superior a la de un ratón.

En los peces, las células que se dividen y dan origen a nuevas neuronas se denominan *células gliales radiales*. Se encuentran en varias regiones del cerebro, en las que dan lugar a precursores neuronales que luego migran a áreas específicas del órgano. Las células gliales radiales se caracterizan por tener una única prolongación, larga y de orientación radial, que actúa como guía para las neuronas recién formadas en su viaje hasta el lugar en que finalmente quedarán. En los mamíferos, en cambio, las células gliales radiales solo aparecen en estadios tempranos de su desarrollo.

Las células gliales radiales también se caracterizan por producir *estradiol*, una hormona de la familia de los esteroideos relacionada con la regulación de la reproducción en las hembras de los vertebrados.

Una posible explicación de por qué la historia evolutiva de los mamíferos los llevó a tener, comparados con los peces, una reducida capacidad de generar nuevas neuronas en la vida adulta es la llamada *hipótesis de equivalencia numérica (numerical matching hypothesis)*, que predice la existencia de una relación entre el número de células cerebrales y de células periféricas, como las musculares. En los peces, que tienen la capacidad de crecer a lo largo de toda su vida, se comprueba la aparición de nuevas células musculares, lo mismo que de nuevas células sensoriales que deben ser inervadas por nuevas neuronas. Los mamíferos, en cambio, dejan de crecer al alcanzar la edad adulta: su masa muscular aumenta por el incremento de tamaño de sus células musculares más que por la aparición de nuevas.

Actualmente, un importante número de investigadores estudia los mecanismos de la neurogénesis en la vida adulta, que son de gran interés para la medicina para definir tratamientos de lesiones del sistema nervioso y enfermedades neurodegenerativas. El conocimiento de

los factores moleculares que influyen en la regeneración neuronal en los peces permitiría en un futuro comprender mejor los procesos de los mamíferos.

## Múltiples formas reproductivas

Al pensar en cómo se reproducen los peces, la primera imagen que se nos viene a la mente es la hembra que libera sus huevos en el agua, sobre los que el macho disemina después el esperma. En ese caso, los espermatozoides masculinos fecundan las gametas femeninas fuera del cuerpo de la hembra, lo que se denomina *fecundación externa*. Las gametas pueden provenir de una única hembra o de un grupo que desova junto. La ovulación y la espermiación pueden acontecer a la vez, como en muchas especies que habitan arrecifes de coral, o en distintos momentos. En segundo caso, puede suceder que el macho libere primero el esperma y lo deje adherido a las paredes de algún nido (como algunas especies de góbidos) o que la hembra lo haga primero con los huevos, incluso que luego los tome con su boca y el macho libere su esperma en la boca de la hembra (como sucede en algunas especies de cíclidos africanos). La mayoría de las especies que presentan fecundación externa son *ovíparas*, es decir, sus hembras expulsan huevos sin fecundar por su poro genital.

Sin embargo, los peces tienen otras formas reproductivas, que en varios casos incluyen también fecundación interna, mucho menos frecuente que la externa. En esos casos, el macho tiene alguna disposición de las aletas pélvicas o anales que facilita la llegada de los espermatozoides a las cavidades ováricas de las hembras, donde ocurre la fecundación. Un caso curioso es el de algunas especies de caballitos de mar, cuyas hembras



Lebiste o guppy (*Poecilia reticulata*), pez de agua dulce del norte de Sudamérica, muy conocido por los aficionados a los peces tropicales, sobre el cual se realizaron en la década de 1970 los primeros estudios de neurogénesis y regeneración neuronal. Mide unos 3,5cm. Foto Wikimedia Commons

depositan los huevos en una bolsa incubadora que los machos llevan en su vientre, dentro de la cual estos liberan los espermatozoides y ocurre la fecundación.

Las especies con fecundación interna pueden ser vivíparas u ovovivíparas. En las primeras la hembra expulsa juveniles completamente formados por su poro genital. Muchas rayas y tiburones tienen ese tipo de reproducción, propia de unas mil especies, en gran parte marinas. Las especies ovovivíparas también expulsan crías vivas, pero recién eclosionadas. A diferencia de las vivíparas, las ovovíparas retienen los huevos hasta la eclosión, pero la nutrición del embrión no depende de la madre sino del vitelo o yema del huevo. Esta forma reproductiva no es muy común en los peces marinos. Aparece en muchas especies tropicales de agua dulce, muy demandadas para acuarios ornamentales, como las de los géneros *Poecilia* y *Xiphophorus*.

Las especies con un macho y una hembra que no cambian de sexo se llaman *gonocóricas* y son la gran mayoría entre los peces. Pero también hay *hermafroditas* entre estos, que pueden ser de dos tipos: *hermafroditas simultáneos*, que son los menos frecuentes, o *hermafroditas secuenciales*. Los individuos de los primeros pueden actuar sea como machos o como hembras durante el apareamiento, incluso el mismo día; todos tienen en uso simultáneo testículos y ovarios. Los hermafroditas secuenciales, en cambio, pueden cambiar de sexo a lo largo de su vida. Sus ovarios y testículos no son funcionales al mismo tiempo: en algunas especies los individuos son machos en la primera etapa de la vida y luego se convierten en hembras y en otras sucede lo inverso.

El ejemplo más conocido de hermafroditas secuenciales son los peces payaso, de la especie marina *Amphiprion ocellaris*. Viven en pequeños grupos formados por una única hembra

dominante de mayor tamaño, un macho dominante subordinado a la hembra, y tres o cuatro machos juveniles asexuados. Si la hembra muere, el macho dominante se transforma en hembra y asegura la reproducción para la comunidad. Los individuos de otras especies son hembras en la primera etapa de su vida y luego cambian a machos, como sucede con algunos que forman harenes constituidos por un macho que cuida a numerosas hembras durante toda su vida. Las dos principales responsabilidades de esos machos son defender su territorio de otros machos y reproducirse con sus hembras. Si uno de ellos muere, la hembra dominante del harén sufrirá un cambio de sexo y pasará a ser macho.

Como vemos, hay varias formas de clasificar las modalidades reproductivas. La mayoría de los peces liberan sus huevos directamente en el agua, y dejan que se dispersen por las corrientes. Los hay que producen huevos más densos que el agua y tienen la capacidad de adherirse a alguna superficie. En estos suelen observarse comportamientos más complejos en cuanto a la agresividad desplegada por los machos o las hembras para la elección y defensa de un territorio y la construcción de nidos. Cuanto más escasos son los recursos pareja, territorio, alimento, mayor es la competencia y la agresividad desplegada, lo que resulta en engorrosas interacciones sociales, con la presencia de individuos de distinta jerarquía.

## Especies modelo para la investigación científica

Desde hace unos quince años, para estudiar los peces se ha difundido recurrir a ciertas especies modelo, como el pez cebrá (*Danio rerio*) o el pez medaca (*Oryzias latipes*), habitantes de agua dulce del sudeste asiático, para las cuales hay varias líneas de animales transgénicos, es decir, animales que poseen un gen que no les pertenece, el cual les fue introducido por procedimientos de ingeniería genética. Por ejemplo, hay medacas con un gen que expresa una proteína verde fosforescente, típica de las medusas, en algunas neuronas, lo que permite al investigador observarlas de manera directa durante la vida del animal. Como se conoce la totalidad de la información genética de estos peces, pues se ha logrado secuenciar su genoma completo, pueden realizarse con ellos muchos experimentos originales y de avanzada que revelan el funcionamiento de su organismo.

En los últimos años se comenzó a usar varias especies de la familia de los cíclidos (*Cichlidae*) para estudiar el control social de la reproducción. Se trata de especies territoriales que poseen individuos dominantes e individuos subordinados en distintos grados, lo que resulta en complejas interacciones sociales. En ese grupo se han estudiado mucho los cíclidos africanos, de los que algunos,



Pez payaso (*Amphiprion ocellaris*), pez marino que mide unos 10cm y vive en pequeños grupos formados por una única hembra dominante de mayor tamaño, un macho dominante subordinado a la hembra, y tres o cuatro machos juveniles asexuados. Si la hembra muere, el macho dominante se transforma en hembra y asegura la reproducción para la comunidad. Foto Ritikis, Wikimedia Commons.

como las tilapias –nombre común usado para cerca de un centenar de especies–, son importantes pues además son comestibles. En la Argentina, el primer autor de esta nota y sus colaboradores trabajan desde hace más de diez años en estos temas con un cíclido autóctono (*Cichlasoma dimerus*) conocido comúnmente como chanchita. Es una especie monógama y con cuidado biparental, que vive en aguas quietas y poco profundas de lagunas asociadas con los ríos Paraná y Paraguay, desde Brasil hasta el norte de la provincia de Buenos Aires.

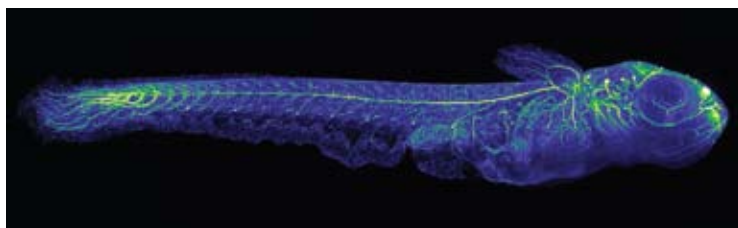
En los últimos años hemos comprobado mediante experimentos que en los grupos de estos peces imperan distintas jerarquías sociales y se dan complejas interacciones entre sus individuos. El estudio de su desempeño en acuario indicó que antes de su tiempo reproductivo los peces tienen un comportamiento gregario y un patrón de coloración característico. Cuando comienzan a observarse conductas vinculadas con la reproducción, aumenta la agresividad entre los individuos y se establece un orden jerárquico. El macho dominante elige un territorio y lo defiende de sus congéneres; la hembra selecciona al macho dominante con mejor territorio, forma pareja con él y se transforma en reproductora agresiva. Realizada la puesta, aumenta más la agresividad de los reproductores para con los individuos no dominantes. Al eclosionar los huevos acaece otro aumento de la agresividad, la que llega a su máximo cuando las larvas comienzan a nadar libremente.

## Conclusiones

Investigar a los peces es importante para distintas disciplinas y actividades. Iluminan los estudios sobre sistemática y evolución pues constituyen el grupo más diverso de vertebrados vivos. Proporcionan una oportunidad única para avanzar en el conocimiento de la biología reproductiva y el comportamiento social, ya que forman todos los tipos conocidos de estructuras sociales: especies monógamas, especies que vive en harén, especies con conflictividad social elevada y distintos tipos de dominancia, especies que puede cambiar de sexo, etcétera. Ponen a disposición de las neurociencias un cerebro que por varias horas permanece vivo y con sus propiedades intactas fuera del cuerpo del animal, y además una altísima capacidad neurogenerativa que se extiende a la edad adulta. Por último, sus muchas especies comestibles y ornamentales constituyen un recurso para la piscicultura. **CH**



Pez cebra (*Danio rerio*), pez de agua dulce de la región del Himalaya, en el sudeste asiático, popular como pez de acuario. Mide unos 5cm. Se ha secuenciado su genoma completo y suele emplearse como modelo para investigación. Foto Duke University



Pez del arroz o medaca (*Oryzias latipes*), originario del Japón y común en arrozales del este y sudeste de Asia. La imagen muestra un ejemplar de diez días, que mide 5mm, y fue tomada con un microscopio de fluorescencia y luz láser. Los trazos verdes corresponden al cerebro, el ojo y la espina dorsal en pleno desarrollo. Es un buen organismo modelo pues comparte muchos procesos moleculares con los vertebrados terrestres. Foto Philipp Keller, Laboratorio Europeo de Biología Molecular.



Chanchita (*Cichlasoma dimerus*), pez que vive en aguas quietas y poco profundas de lagunas asociadas con los ríos Paraná y Paraguay, desde el Brasil hasta el norte de la provincia de Buenos Aires. Mide unos 10cm. Foto Rainer Stawikowski



### Matías Pandolfi

Doctor en ciencias biológicas, UBA.  
Investigador adjunto del Conicet.  
Profesor adjunto, FCEN, UBA.  
pandolfi@bg.fcen.uba.ar



### Martín Ramallo

Licenciado en biología, UBA.  
Estudiante de doctorado y  
becario del Conicet, FCEN, UBA.



### Agustina Birba

Estudiante avanzada de  
la licenciatura de ciencias  
biológicas, FCEN, UBA.  
Becaria estímulo de la UBA.