



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Para estudiar la vida presente en una gota de agua podemos reducir nuestro tamaño, o bien aumentar el mundo de lo más pequeño: el microcosmos. Como la primera opción sólo podría ocurrir en un mundo de fantasía, sólo queda recurrir al microscopio que nos revela una inesperada diversidad de organismos: rotíferos, rizópodos, spirogyras, euglenas, pulgas de agua y otros seres, cuyas estrategias de orientación, movimiento, procreación y alimentación son tan extrañas como sus nombres. La pulga de agua, por ejemplo, se llama así porque se mueve dando pequeños saltos

llevaba nada. Recién en 1967, el científico británico J. Green descubrió que se trataba exactamente de la misma especie. Las diferencias morfológicas podían atribuirse a los diferentes lugares de donde se habían extraído las muestras: en un caso, el lugar de muestreo contaba con peces mientras que el otro no. Los cambios fenotípicos parecen ser un mecanismo de defensa, ya que en especial a los alevines (pero también a otros depredadores como las larvas de insectos) les resulta difícil atrapar a este tipo de pulgas de agua con "armadura". Detrás del fenómeno

De viaje por el microcosmos Porqué las pulgas de agua deben usar casco

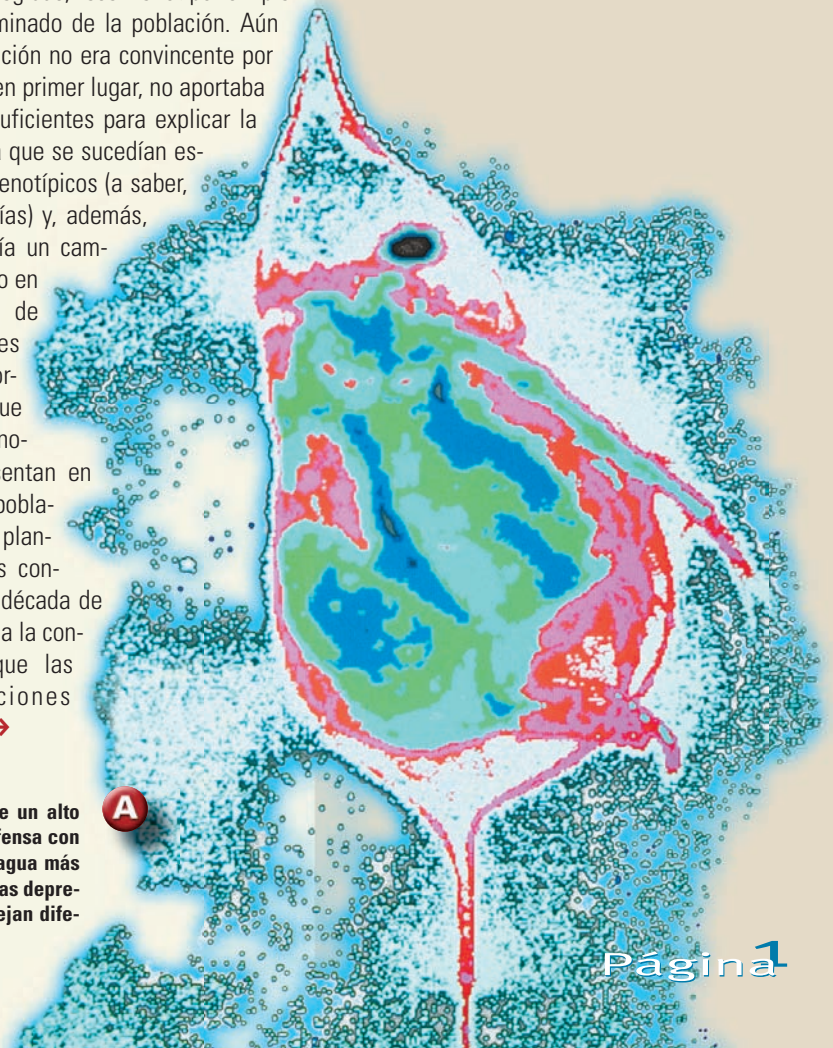
producidos por golpes bruscos de sus antenas que, al quedar desplegadas entre golpe y golpe, hacen posible que el animal quede suspendido en el agua. La pulga de agua pertenece a la clase de los branquiópodos que, con sus casi 90 especies, habitan prácticamente toda clase de espejos de agua en Europa Central; desde lagos profundos hasta charcos. Estos crustáceos de apenas unos milímetros evitan la proliferación de plantas acuáticas, filtran el plancton, tamizan los detritos, revuelven el lecho lodoso o se deslizan debajo de la superficie acuática. Cumplen un papel importante como alimento para los peces contribuyendo a que las pequeñas algas y el plancton sirvan como nutrientes. De modo que representan un eslabón imprescindible en la cadena alimentaria de los sistemas de agua dulce.

PULGAS DE AGUA CON ARMADURA

En 1912, el zoólogo V. Brehm describió una especie de pulga de agua y la llamó *Daphnia monacha*. Durante más de 50 años, los científicos creyeron que esta especie era completamente diferente a la pulga de agua africana, *Daphnia lumholtzi*. Mientras que *D. lumholtzi* contaba con una suerte de "casco" y un aguijón de cola (Fig. A), *D. monacha* no

por el cual en espejos de agua con "presión de depredación" sólo se encuentran pulgas de agua con "armadura", parecía esconderse un simple mecanismo de selección: debido a que los depredadores sólo atrapan pulgas de agua desprotegidas, ese fenotipo simplemente es eliminado de la población. Aún así, la explicación no era convincente por dos razones: en primer lugar, no aportaba argumentos suficientes para explicar la velocidad a la que se sucedían estos cambios fenotípicos (a saber, unos pocos días) y, además, no se producía un cambio simultáneo en la frecuencia de genotipos (es decir, la proporción en la que diferentes genotipos se presentan en una misma población). Debían plantearse nuevos conceptos. En la década de 1980 se llegó a la conclusión de que las transformaciones descriptas, →

► El casco, al que la coloración blanca de la imagen le confiere un alto grado de transparencia, y el aguijón de cola son mecanismos de defensa con los cuales *Daphnia cucullata* (una de las especies de la pulga de agua más frecuentes en los lagos del norte de Alemania) se protege de las larvas depredadoras del mosquito. Los colores generados por computadora reflejan diferentes densidades ópticas.



→ efectivamente, sólo se producían a nivel fenotípico y que eran inducidas por sustancias químicas presentes en el agua que funcionan como señal, sin que sea necesario un contacto directo entre depredador y presa.

Los ecólogos y biólogos evolucionistas hablan de **plasticidad fenotípica**, refiriéndose con este término a la capacidad de un organismo de desarrollar diferentes fenotipos en función de las diferentes condiciones ambientales imperantes. Puede tratarse de cambios morfológicos como, por ejemplo, la formación de dicha estructura de protección, aunque también de cambios en el comportamiento. En general, estos cambios se revierten, debido a que la plasticidad fenotípica no sólo implica un beneficio, sino también un costo. Sucede que el material invertido en estructuras morfológicas puede faltar al momento de la reproducción. Sin embargo, los científicos todavía no han logrado probar de manera directa la existencia de este "factor de costo" (reflejado, por ejemplo, en una menor cantidad de huevos).

SÓLO HEMBRAS Y TODAS CLONADAS

Una adaptación flexible a condiciones de vida específicas representa una ventaja, en especial, cuando el medio es muy variable y se presentan depredadores con hábitos alimenticios muy diferentes. Por eso, la pulga de agua parece ser un modelo adecuado para analizar este fenómeno, ya que en el ecosistema del lago hay gran cantidad de depredadores que atentan contra su vida.

Las pulgas de agua o dafnias se reproducen por **partenogénesis**. Las hembras producen huevos diploides (que contienen dos copias del cromosoma), subitáneos o vírgenes de los que vuelven a nacer hembras. Dado que de este modo no se mezclan los genes, todos los descendientes son idénticos a sus ma-

dres que prácticamente se clonan a sí mismas y a una velocidad increíble: durante un período de vida máximo de dos meses, una hembra cada tres días produce hasta veinte crías, que a su vez, están en condiciones de reproducirse a partir del sexto día. En unas pocas semanas, una población así podría alcanzar más de mil individuos. Bajo determinadas condiciones externas (por ejemplo superpoblación), algunos huevos se definen masculinos (la determinación del género es fenotípica; los cromosomas sexuales no inciden). Otros factores ambientales – en su mayoría desfavorables – determinan la formación de huevos haploides (que contienen una única copia cromosómica) de resistencia o diapausa. Para no perecer, deben ser fecundados antes de ingresar a la cavidad incubadora. Los huevos de resistencia están protegidos por membranas especiales y recién se desarrollan después de un período de inactividad que puede durar semanas o años (**Fig. B**). De ellos, sin excepción, nacen hembras que, en la primavera y después de períodos de sequía, generan nuevas generaciones de hembras a partir de huevos vírgenes no fecundados.

Debido a esta forma de reproducción, en una población de pulgas de agua siempre hay gran cantidad de individuos con un mismo genotipo. Esto representa una condición fundamental para los estudios genéticos, que hace de la pulga de agua un objeto de investigación ideal, especialmente en genética ecológica.

Ahora sólo deben generarse condiciones de investigación adecuadas. Los experimentos de campo son complicados, porque prácticamente es imposible repetirlos en idénticas condiciones. Cuando los ecólogos quieren realizar un experimento en un lago no pueden realizar simultáneamente un control, porque no existen dos lagos exactamente iguales. Si el experimento de control se realiza con un



C ▲ Realización de un experimento a campo en un lago del norte de Alemania.

desfasaje temporal, por ejemplo un año después, entonces, las condiciones climáticas ya no serán las mismas. Una solución razonable es colocar en el agua del lago grandes bolsas de plástico que contienen todos los organismos a estudiar. De ese modo, en un mismo lago pueden realizarse gran cantidad de experimentos de forma paralela (**Fig. C**). Aún así, las posibilidades experimentales son limitadas, ya que los científicos no pueden manipular los factores físicos y climáticos a voluntad.

TORRES PARA LA CIENCIA

La solución alternativa consiste en simular la columna de agua de un lago en tierra utilizando tanques de agua tubulares llamados torres de plancton. Las torres de plancton de mayor tamaño (también llamadas mesocosmos) tienen unos diez metros de altura y unos tres metros de diámetro y se encuentran en la Universidad de Dalhousie en Halifax, Canadá, y en el Instituto Scripps en La Jolla, California, EE.UU. Las dos torres de plancton del Instituto Max Planck de Limnología, con sede en Plön, Alemania, superan a sus pares norteamericanas en un metro y medio, aunque su diámetro interior sólo es de 86 centímetros (**Fig. D**). A diferencia de las torres de Canadá y EE.UU., en el Instituto de Plön, las columnas de agua están rodeadas por una doble capa de acero inoxidable termoconductor; como en un radiador, entre ambas capas circula el refrigerante temperado. La doble capa está dividida verticalmente en 22 segmentos refrigerantes. De esta forma, los

◀ Hembras de dafnia se desprenden del caparazón similar a una montura (epifio) que se forma sobre la región dorsal para proteger la cavidad incubadora en la que llevan dos huevos de resistencia, fruto de la reproducción sexual. El epifio puede subsistir durante décadas en medios adversos, antes de que de los huevos nazcan nuevas dafnias.



científicos del Instituto Max Planck pueden ajustar una temperatura distinta cada 50 centímetros. El perfil térmico establecido es controlado por computadora. Por fuera, los tubos están bien aislados, ya que el segmento inferior de la columna de agua debe mantenerse permanentemente a 4 °C, como ocurre en un lago natural. De cada segmento refrigerante pueden extraerse muestras de agua o agregarse sustancias químicas, algas, etc. mediante orificios o cánulas de inyección (Fig. E). Cada torre posee ocho ventanillas de observación que permiten realizar el seguimiento y el registro de los movimientos de los organismos de mayor tamaño en las tres dimensiones. En las torres incluso puede regularse la incidencia lumínica mediante fuentes artificiales que permiten simular crepúsculo, amanecer y atardecer.

SUMERGIRSE CUANDO ACECHA EL PELIGRO

En las torres de plancton reinan condiciones casi naturales hechas a medida. Aquí pueden estudiarse muy bien los cambios de comportamiento de las pulgas de agua. Durante el día, muchos organismos del zooplancton, entre ellos la pulga de agua, permanecen en las zonas profundas, frías y oscuras de los lagos para resguardarse de la depredación de los peces. Éstos cazan orientándose con la vista, y por ende, preferentemente en las capas superficiales de los espejos de agua donde tienen suficiente visibilidad. Los organismos del zooplancton recién regresan a las aguas superficiales cuando cae la noche para alimentarse de algas entre otras cosas. El acople de este comportamiento migratorio al ritmo diario tiene sentido, porque la estrategia de evasión también tiene su precio: al sumergirse hacia las profundidades del lago, las pulgas de agua alcanzan regiones pobres en alimento. Por otra parte, las bajas temperaturas en esas zonas profundas inhiben el desarrollo de sus huevos y, por ende, su tasa de reproducción. El cambio relativo de la intensidad de la luz no es el único factor que controla la **migración vertical diaria**, como se solía creer. Efectivamente, las pulgas de agua como *Daphnia hyalina* sólo reaccionan al cambio de luz, cuando una sustancia química producida por los peces denominada **cairona**, los induce a hacerlo (Fig. F). Cuanto mayor sea la cantidad de peces que cazan plancton, tanto mayor será la concentración de esta sustancia de señal en el agua y tanto más marcado será el comportamiento migratorio. La obser-

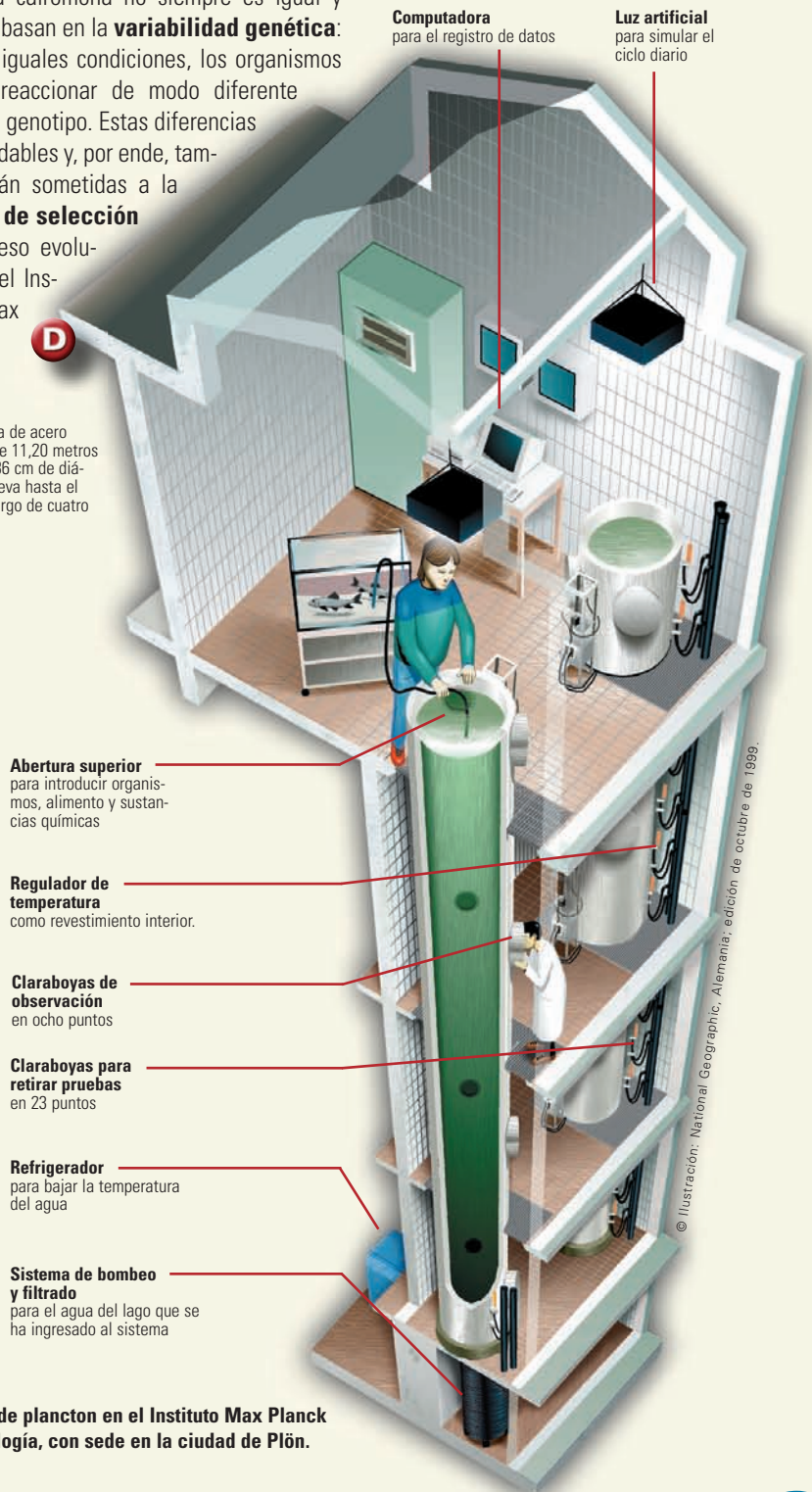
vada diversidad de reacciones y de organismos reaccionantes reflejan la presencia de gran cantidad de caironas. Sin embargo, hasta ahora, los científicos no saben cuál es su composición química ni el mecanismo mediante el cual los organismos acuáticos perciben esas señales químicas.

NUEVOS TIPOS GARANTIZAN LA SUPERVIVENCIA

Hay otros motivos por los cuales la reacción ante una cairona no siempre es igual y éstos se basan en la **variabilidad genética**: frente a iguales condiciones, los organismos pueden reaccionar de modo diferente según su genotipo. Estas diferencias son heredables y, por ende, también están sometidas a la **presión de selección** del proceso evolutivo. En el Instituto Max

Planck de Plön, los investigadores del equipo de Winfried Lampert verificaron esta hipótesis mediante un experimento. Un clon de dafnia, cuyos individuos nunca estuvieron expuestos a la presión de depredación de los peces, no tiene que bucear en busca de aguas profundas. Por eso, en el experimento tampoco muestra un patrón de migración vertical. Otro clon proveniente de un lago, donde coexistía con peces, se sumerge cuando percibe la correspondiente cairona. Pero ¿qué

La torre
Una columna de acero inoxidable de 11,20 metros de altura y 86 cm de diámetro, se eleva hasta el techo a lo largo de cuatro pisos



► Torre de plancton en el Instituto Max Planck de Limnología, con sede en la ciudad de Plön.

→ sucede cuando se mezclan ambos clones y se agrega un pez? Pocas horas después, las frecuencias genotípicas pasaron de una proporción de 50:50 a una de 90:10 a favor del clon que se sumerge buscando aguas más profundas. En la torre de control sin peces, en cambio, se mantiene la relación 50:50. Para los científicos esta es una clara prueba de que los genotipos migratorios cuentan con una ventaja selectiva en presencia de peces.

Los cambios en la composición del *pool* genético de una población son el primer paso hacia el cambio evolutivo de una especie. Los investigadores denominan **microevolución** a la selección que se produce a partir de una variabilidad existente, es decir, a partir de una mezcla de diferentes tipos. Dado que los factores ambientales varían espacial y temporalmente, los factores de selección no permanecen constantes permitiendo que diferentes genotipos dispongan de un mejor valor adaptativo.

EL ESTRÉS ACELERA LA MICROEVOLUCIÓN

En la década de 1960, el Lago Constanza mostró los primeros síntomas de "sobrefertilización" por vertido de efluentes. Alrededor de 1980 alcanzó su máximo punto de eutrofización con un desarrollo masivo de algas; recién entonces comenzaron a surtir efecto las complejas medidas de saneamiento que, hasta el día de hoy, permitieron un buen estado de conservación del lago. Bastan mínimas con-

centraciones de algas azules tóxicas (cianobacterias) para que las pulgas de agua se vean afectadas, ocasionándoles problemas de crecimiento o incluso la muerte. Durante la eutrofización del Lago Constanza inducida por el hombre, evidentemente se produjo una proliferación de aquellos genotipos de dafnia que resultaron ser menos sensibles a esos cohabitantes tóxicos.

¿Cómo puede probarse una adaptación como ésta en los estudios de campo? El problema radica en que los investigadores no pueden de manera "póstuma" analizar la fisiología de los genotipos que vivían antes de la perturbación. Sin embargo, existe un truco para eludir el problema: como ya se mencionó, las pulgas de agua producen huevos de resistencia cubiertos de un fuerte caparazón que depositan en el sedimento del lago. Allí pueden sobrevivir durante un tiempo relativamente largo y, dada la regularidad en la deposición del sedimento en el Lago Constanza, es fácil establecer la edad de sus diferentes capas. En su laboratorio de Plön, los investigadores del Instituto Max Planck aislaron huevos de resistencia de edad conocida a partir de núcleos de sedimento extraídos de dicho lago. Aún más interesante fue el hecho de que lograran criar pulgas de agua a partir de esos huevos de resistencia que habían estado inactivos en el sedimento durante hasta 40 años. Ahora, los científicos disponían de poblaciones de dafnias que habían vivido antes,

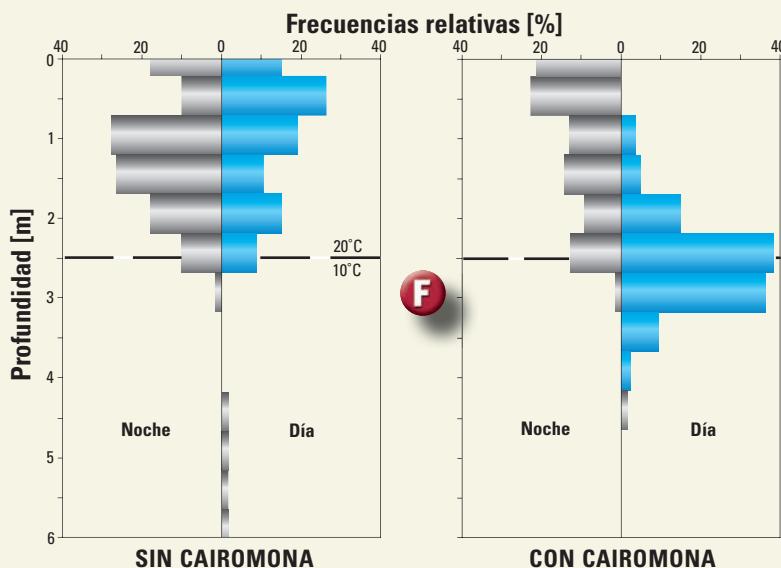


▲ Un científico toma una muestra de la torre de plancton. A la izquierda se observan los puntos para la toma de muestras, dispuestos regularmente en el centro de una de las claraboyas de observación.

durante y después de la etapa más crítica de eutrofización del lago. Se las analizó genéticamente y se testeó su resistencia ante las algas azules. Para ello, los científicos mezclaron en el alimento pequeñas cantidades de una cianobacteria que se había aislado del lago en 1972 y que contiene la sustancia hepatotóxica llamada microcistina-LR.

Se pudo observar que antes de la eutrofización del lago, la población de pulgas de agua presentaba una gran variabilidad genética que definía su sensibilidad a las algas azules. Algunos genotipos vieron fuertemente inhibido su crecimiento a causa de las algas azules, mientras que otros sólo levemente. Durante la eutrofización del lago desaparecieron los genotipos sensibles mientras que los de resistencia proliferaron. En apenas una década, la especie se adaptó a las nuevas condiciones asegurando así su supervivencia.

Las pulgas de agua se ponen un "casco" y un agujijón de cola; se vuelven "buzos de aguas profundas" o pasan años esperando hasta que lleguen épocas mejores; pueden reaccionar en horas, días o años a los cambios del medio. En su viaje exploratorio hacia el microcosmos, los científicos descubrieron estrategias hasta ahora desconocidas de este pequeño acuonauta, descifrando así las leyes fundamentales del valor adaptativo y la evolución.



▲ Comienzo de la migración vertical diaria de la *Daphnia hyalina* en las torres de plancton del Instituto Max Planck de Plön, por agregado de una cairomona. Las barras muestran el porcentaje relativo de la población que se encuentra a determinada profundidad ya sea durante el día o la noche. En ambas torres, el agua por encima de la capa en la que se produce el salto de temperatura (línea horizontal) circula a través de un acuario externo, que sólo en uno de los casos contiene peces.

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, Departamento de Información y Relaciones Públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck

Traducción: Astrid Wenzel

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.



SIEMENS

DAAD Deutscher Akademischer Austausch Dienst Servicio Alemán de Intercambio Académico

BASF The Chemical Company

200 AÑOS BICENTENARIO ARGENTINO

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva Presidencia de la Nación