

# Toma de decisiones en enjambres

Cuando 10.000 abejas buscan una nueva morada, ¿cómo resuelven, en una decisión colectiva, dónde instalarse?

Thomas D. Seeley, P. Kirk Visscher y Kevin M. Passino

**E**l problema de la decisión colectiva ha tenido en jaque durante siglos a sociólogos y politólogos. En los grupos, el dilema fundamental para la toma de decisiones estriba en traducir a una sola las varias preferencias que los individuos puedan tener sobre los posibles resultados y en que tal decisión sea aceptada por el grupo entero. Este problema se ha estudiado, sobre todo, en lo concerniente a los grupos humanos, que han desarrollado un abanico de procedimientos de votación para singularizar una sola opción de entre una lista de elecciones posibles: las reglas de mayoría absoluta o de mayoría simple, sistemas de votación ponderada, etcétera. Menos se ha estudiado la decisión social en grupos animales, a pesar de la abundancia de ejemplos: una horda de babuinos decide hacia donde dirigirse después de un período de descanso; una colonia de hormigas decide si ataca o no a otra colonia vecina.

La elección del lugar de anidamiento por un enjambre de 10.000 abejas ofrece un llamativo ejemplo de toma de decisiones en un grupo animal. Este proceso entraña la intervención de varios centenares de abejas del enjambre: colaboran para hallar una docena o más de cavidades adecuadas en los árboles; luego seleccionan la mejor opción para instalar su nueva morada. Los autores vienen investigando este proceso desde hace diez años, valiéndose para ello de una gavilla de estudios de observación, experimentación y modelización matemática. Tales trabajos han revelado que el enjambre cuenta con mecanismos conductuales que producen de forma sistemática decisiones colectivas excelentes. Inteligencia grupal, que constituye un producto del desacuerdo y la competición —no del consenso y la componenda— entre varios grupos de abejas que presentan posibilidades distintas ante el problema en cuestión. La evolución ha suministrado una solución harto curiosa al problema de lograr que un grupo opere como unidad eficaz de toma de decisiones.

## Trabajos precursores

Los apicultores saben desde hace siglos que, en las postrimerías de la primavera o comienzos del verano, las colonias de abejas se escinden por *enjambro*. En este proceso, la reina y alrededor de la mitad de las obreras abandonan la colmena para fundar una nueva colonia; entre tanto, la reina hija y el resto de las obreras permanecen donde están para perpetuar la antigua colonia. Se sabía también que una vez que un enjambre abandona su colmena materna, las abejas se apiñan formando una especie de barba en una rama de algún árbol cercano, inspeccionan los alrededores en busca de nueva vivienda y, por fin, acaban alzando el vuelo y trasladándose todas juntas hasta su nueva morada, que suele ser un árbol hueco distante.

Desde hace mucho, los colmeneros han capturado a los enjambres que han descubierto vivaqueando y los han instalado en colmenas de factura humana, cortando de raíz la búsqueda de alojamiento emprendida por las abejas. Por ello, no resulta sorprendente que este proceso de toma de decisiones haya permanecido oculto durante largo tiempo.

La situación empezó a cambiar en los años cincuenta del siglo pasado cuando Martin Lindauer, zoólogo alemán, publicó un artículo seminal sobre la búsqueda de vivienda por las abejas melíferas. Lindauer completaba entonces su formación posdoctoral en la Universidad de Múnich con el etólogo Karl von Frisch, quien poco antes había descodificado la *danza del vientre* (“waggle dance”) de las abejas (movimiento oscilante del abdomen).

Mediante este comportamiento comunicador, las merodeadoras más afortunadas informan a sus compañeras de la colmena de la ubicación de ricas fuentes de alimento. La abeja danzarina avanza volando y efectúa una *pasada de contoneo* (“waggle run”), haciendo vibrar su abdomen hacia los lados; después describe un círculo de regreso a su punto de partida. En eso consiste un circuito de danza. Una danza consta de varios circuitos. Von Frisch des-



1. UN ENJAMBRE DE UNAS 10.000 OBRERAS Y UNA REINA vivaquea en la rama de un árbol. La tarea de buscar un nuevo asentamiento donde anidar se delega en unos pocos cientos de abejas; durante el proceso, el resto permanece quiescente para conservar energía. La forma en que las exploradoras seleccionan los posibles alojamientos, deliberan sobre las opciones candidatas y alcanzan un veredicto constituye un proceso cuya complejidad rivaliza con la de las deliberaciones de una comisión decisoria humana. Una vez las exploradoras han elegido su nuevo hogar, estimulan al enjambre para que levante el vuelo; después lo guían hasta el nuevo domicilio.



**2. LAS ABEJAS MUESTRAN CIERTAS PREFERENCIAS “INMOBILIARIAS”.** Se inclinan por cavidades situadas a una altura considerable sobre el suelo, con una capacidad de unos 20 litros cuando menos, a las que se acceda por un agujero situado en la base de la cavidad, cuya sección no pase de 30 centímetros cuadrados y esté orientado hacia el sur. En este árbol (*izquierda*), la entrada corresponde al agujero de un nudo, en la bifurcación izquierda del tronco. Al talar el árbol, el nido de su interior quedó a la vista (*derecha*).

cubrió que la longitud de la pasada de contoneo representaba la distancia hasta la fuente de alimento; el ángulo de la danza denotaba la dirección en que se encontraba el alimento.

Lindauer era un observador atento y perspicaz. En cierta ocasión en que estudiaba un enjambre que se había establecido en el jardín del Instituto Zoológico, observó que unas abejas de la superficie del enjambre estaban ejecutando danzas ventrales. A diferencia de las del interior de una colmena, estas danzarinas, que permanecían sobre el enjambre, no portaban cargas de néctar ni de polen. No parecían, pues, abejas forrajeras que estuvieran dando a conocer provechosas fuentes de alimento. ¿Podría tratarse de exploradoras, que estuviesen informando de posibles asentamientos nuevos? Había descubierto una danza ventral de finalidad desconocida hasta entonces.

Lindauer dilucidó esta cuestión a partir de la observación paciente de todas las danzarinas de varios enjam-

bres, una tarea maratónica que le obligó a muchos días de vigilancia constante y de frenética toma de notas. Cada vez que veía a una nueva abeja danzante, Lindauer anotaba la ubicación que codificaba en su danza y marcaba a la abeja con una mancha de pintura, para no registrar más de una vez la información contenida en su danza.

Este concienzudo trabajo fructificó en varios hallazgos notables. Así, durante el proceso de toma de decisiones, sólo unos centenares de entre los miles de abejas del enjambre se mostraban activas: volaban hacia y desde el enjambre, en busca de sitios donde anidar; después danzaban. La mayoría de las abejas permanecía inmóvil —con toda probabilidad, para conservar la provisión de energía del enjambre— hasta que se tomaba una decisión y llegaba la hora de volar hasta el emplazamiento elegido.

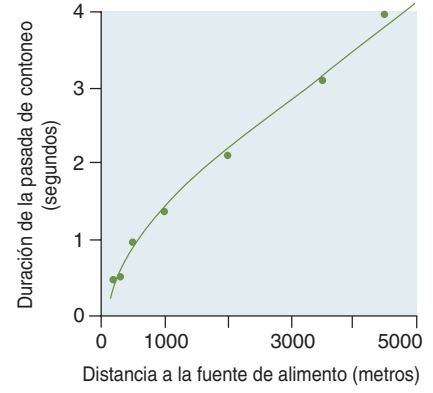
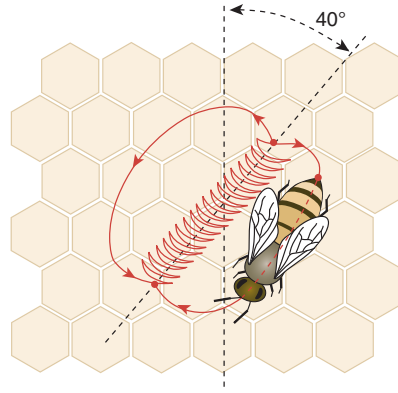
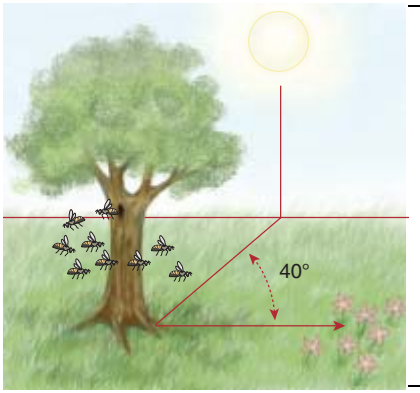
Descubrió también que, al principio, las danzas de las abejas señalaban distintos lugares en torno al

enjambre; al ir pasando las horas, el número de asentamientos publicitados se iba reduciendo, hasta que por fin quedaba sólo uno, que era vigorosamente anunciado por docenas de abejas danzantes. Al poco de que las danzas se refirieran a un solo sitio, el enjambre completo despegaba súbitamente y volaba hacia el lugar acordado. A veces, el investigador lograba correr campo a través bajo el enjambre durante todo su vuelo y conocer así su destino exacto, que solía ser la oquedad de un árbol o de un edificio, siempre en el lugar indicado en las últimas danzas. No cabía duda: las abejas danzarinas informaban de lugares de anidamiento. De hecho, parecía como si éstas celebraran una especie de plebiscito sobre el futuro hogar del enjambre, aunque se desconocía la forma en que llevaban a cabo sus deliberaciones.

### Un segundo análisis

A mediados de los años noventa, nos propusimos ahondar en esta apasionante muestra de democracia animal. En el intervalo transcurrido desde el trabajo de Lindauer, varios expertos habían estudiado las preferencias “inmobiliarias” de las abejas melíferas. Descubrieron que, para una colonia de abejas, una morada de primera clase debe disponer de una cavidad con una capacidad de más de 20 litros y un orificio de acceso de menos de 30 centímetros cuadrados, situado a varios metros de altura sobre el suelo, que mire al sur y se encuentre a ras del suelo de la cavidad. Pero nadie había determinado la forma en que las abejas exploradoras de un enjambre materializan estas “preferencias inmobiliarias” durante la elección colectiva de nueva residencia.

Lo primero que hicimos fue repetir las observaciones de Lindauer sobre las danzas de las exploradoras. Esta vez, sin embargo, usaríamos modernos equipos de vídeo para lograr una imagen más completa de la posible hace 50 años. Trabajamos con enjambres pequeños, de unos 4000 individuos. Marcamos las abejas una por una, para facilitar su identificación; así podríamos atribuir cada danza a un sujeto y, por tanto, cerciorarnos de su contribución a que el enjambre tomase una decisión determinada.



**3. LAS ABEJAS MELIFERAS SE VALEN DE LA “DANZA DEL VIENTRE”** para informar a las demás sobre fuentes de aprovisionamiento. Ahora bien, esa misma danza sirve también para describir la ubicación de los asentamientos donde anidar. En este ejemplo, hay flores situadas a lo largo de una línea que forma 40° hacia la derecha del Sol cuando las abejas salen de la colmena (*izquierda*). Para indicar el lugar, una abeja vuela trazando

un ocho sobre un panal vertical (*centro*). En el tramo central de su danza, ejecuta una “pasada de contoneo”: hace vibrar su cuerpo hacia los lados. El ángulo de esta pasada indica la dirección de la fuente de alimento; la duración revela la distancia hasta las flores (*derecha*). Cuando la danza se refiere a sedes de anidamiento, se desarrolla sobre la superficie del enjambre, en vez de hacerlo sobre los panales del interior de la colmena.

Grabamos las danzas ejecutadas por cada una de las abejas exploradoras. El patrón que descubrimos guardaba una estrecha semejanza con las conclusiones de Lindauer, basadas en las observaciones de sólo la primera danza de cada exploradora. En un enjambre que estuvimos observando desde el 20 al 22 de julio de 1997, el proceso completo de toma de decisión requirió unas 16 horas de actividad danzante, repartidas a lo largo de tres días. Durante la primera mitad del proceso, las exploradoras informaron de un total de once asentamientos candidatos, sin que ninguno de ellos predominase en las danzas. Durante la segunda mitad, en cambio, uno de los asentamientos fue ganando protagonismo hasta convertirse en el elegido. En el transcurso de las últimas horas del proceso de toma de decisión, el sitio que se erigió favorito pasó a ser el motivo de todas las danzas.

**¿Consenso o quórum?**

Ante la forma tan llamativa en que las danzarinas de un enjambre llegaban a representar un solo sitio y por el modo en que el enjambre acababa trasladándose a éste, diríase que la toma de decisiones en el enjambre correspondía, en esencia, a un proceso de obtención de consenso, algo así como el advenimiento del “sentir de la asamblea”. Según esta hipótesis, cada abeja exploradora “vota” a favor de cierto asentamiento danzando por

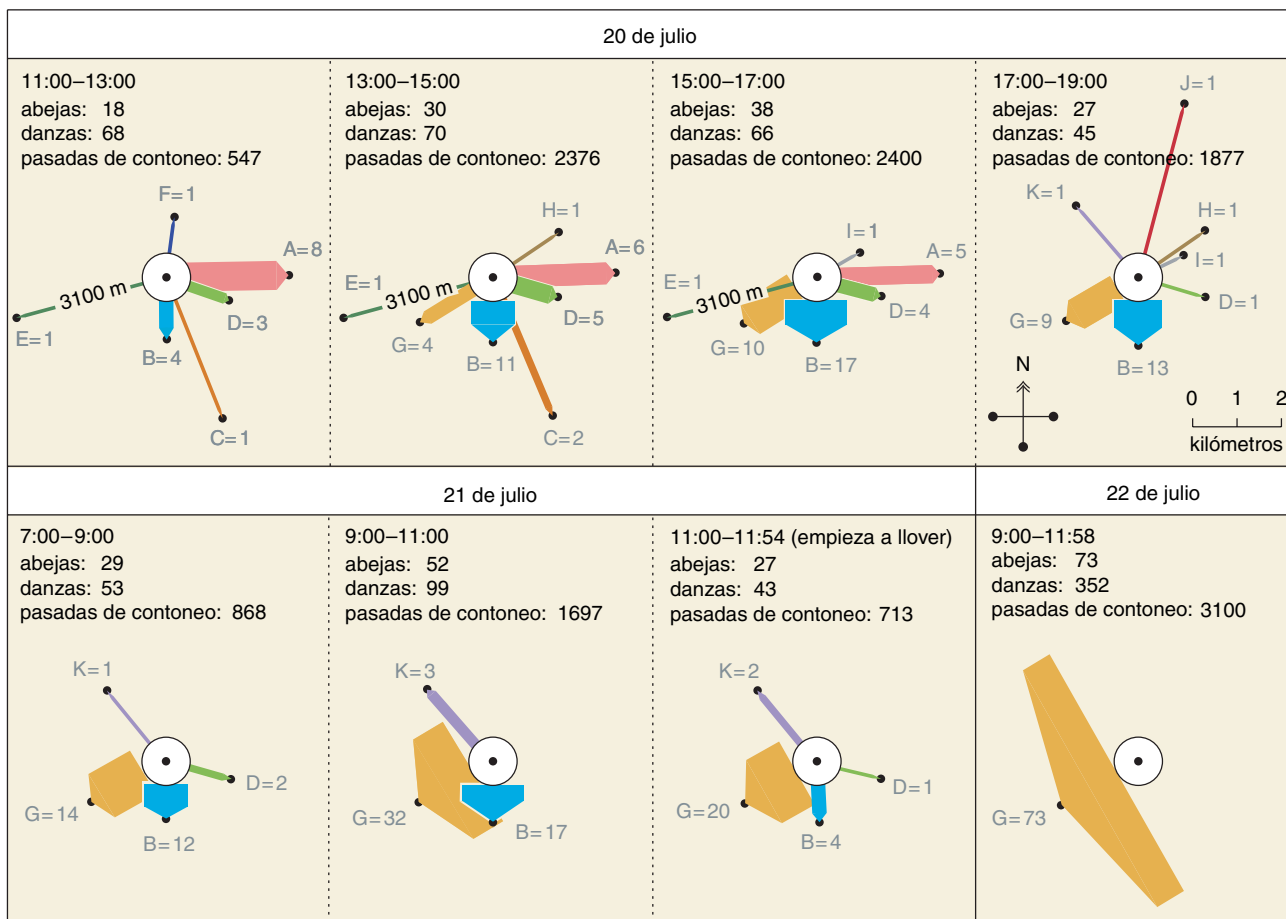
él; luego, las exploradoras interactúan para llegar a acuerdos a favor de un sitio cada vez mejor. El patrón de votos se supervisa con regularidad, con lo que saben cuándo han llegado a un acuerdo y pueden empezar a actuar en virtud del mismo.

Había, sin embargo, dos aspectos que ensombrecían esta hipótesis tan atractiva. En primer lugar,

ni Lindauer ni nosotros habíamos observado señal alguna de que las exploradoras sondeasen a sus compañeras danzantes, algo que sin duda tendrían que hacer para saber si se ha llegado a un acuerdo. Segundo, tanto Lindauer como nosotros habíamos observado que, en alguna ocasión, el enjambre se echaba a volar sin que las danzantes hubieran llegado



**4. ABEJAS MARCADAS** con una diminuta pieza de plástico, numerada, coloreada y fija al tórax; en algunos casos, portan también una mancha de pintura en el abdomen. Estas marcas distinguen a las exploradoras, lo que facilita la observación del comportamiento de un enjambre.



5. ASI SE ALCANZA EN UN ENJAMBRE UN QUORUM favorable a un cierto lugar de anidamiento. En cada recuadro se resume un intervalo de actividad de una a tres horas; se indican el número total de abejas, danzas y pasadas de contoneo correspondientes a ese intervalo. El enjambre está representado por el círculo blanco. Los puntos de anidamiento candidatos (*puntos negros*) se han rotulado con letras, que corresponden al orden en que las abejas informaron de ellos. Las flechas denotan la dirección y la distancia hasta el

emplazamiento; su grosor es proporcional al número de abejas que danzan en su favor durante el intervalo de tiempo correspondiente, que aparece indicado junto a la designación del sitio. En este caso el enjambre consideró un total de 11 sitios durante un plazo de tres días, pero ninguno de ellos se informó con mayor energía que los demás durante la primera mitad del proceso de toma de decisión. Durante la segunda mitad, en cambio, el emplazamiento G fue ganando apoyo y acabó siendo el motivo de todas las danzas.

al consenso, es decir, pese a existir dos fuertes coaliciones danzantes que anunciaban emplazamientos distintos. Estos casos raros de despegue con disenso, ¿correspondían a meras anomalías curiosas, que no merecían atención, o se trataba de valiosas pistas, a las que debíamos atender?

Optamos por prestarles atención, pues veníamos preguntándonos desde hacía tiempo si la esencia de la toma de decisiones en el enjambre no estribaría en la percepción de un *quórum* (acuerdo entre un número suficiente de exploradoras) al respecto de uno de los sitios, en vez de un *consenso* (acuerdo unánime entre las exploradoras danzantes).

Según la hipótesis de percepción del quórum, una abeja exploradora

“vota” a favor de un sitio pasando tiempo en él. Las exploradoras interactúan de forma que su número se eleva con mayor prontitud en los emplazamientos más idóneos; las abejas de cada sitio supervisan cuántas se hallan allí para saber si han alcanzado el número umbral (quórum) y pueden iniciar la puesta en marcha del enjambre hacia ese sitio. Ello explica los despegues con disenso: corresponderían a casos en los que se ha alcanzado el quórum en un sitio antes de que la competición entre las danzarinas que propugnan lugares distintos haya cesado las danzas correspondientes a todos los lugares menos a uno.

Ensayamos estas dos hipótesis (consenso y quórum) mediante expe-

rimentos realizados en la isla Appledore, sede del Laboratorio Marino de Shoals de la Universidad Cornell. La isla se encuentra frente a la costa de Maine. Apenas tiene árboles, por lo que carece de cavidades naturales de anidamiento para abejas melíferas. Cada uno de los enjambres que transportamos a la isla hubo, pues, de prestar atención a las colmenas artificiales que les proporcionamos.

En el primer experimento, presentamos a varios enjambres (uno cada vez) dos cajas de anidamiento idénticas, situadas cada una en un emplazamiento excelente. El enjambre se emplazaba en el centro de la isla; las dos cajas, cerca de la costa rocosa, cada una a unos 250 metros del enjambre, pero en direcciones

distintas. Descubrimos que cuando el enjambre se veía obligado a elegir entre dos emplazamientos de primera clase, emprendían sistemáticamente el vuelo cuando las exploradoras estaban todavía danzando vigorosamente a favor de ambos sitios. Parecía que el consenso no era necesario para que estos enjambres se lanzasen a volar hacia uno de los sitios. La hipótesis de la percepción de consenso quedaba, por tanto, desechada.

Al propio tiempo, se vio reforzada la hipótesis de la percepción de quórum: el enjambre, de forma sistemática, empezaba a prepararse para el vuelo en cuanto un grupo de 15 o más abejas se concentraba en una de las cajas de anidamiento. Es preciso señalar, no obstante, que, debido a que las abejas pasan la mayor parte del tiempo en el enjambre, si se observan al menos 15 de ellas en un sitio de anidamiento en un instante dado, ello significa que un total de unas 150 abejas están visitando ese emplazamiento.

En el segundo experimento, ensayamos la hipótesis de percepción de quórum mediante la verificación de una predicción falsable, consecuencia de ella: si se retrasa la formación de quórum en el sitio de anidamiento elegido, a la vez que se deja intacto el resto del proceso de toma de decisión, el vuelo del enjambre hasta ese lugar sufrirá también un retraso. Para demorar la formación de quórum situamos cinco cajas de anidamiento idénticas, muy cerca unas de otras, en un punto de la isla. Las exploradoras que visitaban el lugar se dispersaban, por tanto, entre cinco cavidades de anidamiento, en vez de concentrarse en una sola. Comprobamos entonces cuánto tardaba un enjambre, una vez descubierto el emplazamiento de las cajas-nido, en tomar la decisión de despegar hacia el sitio. Con cada enjambre, realizamos también una prueba de control con una sola caja.

Los dos ensayos correspondientes a cada enjambre se efectuaron en distintos puntos de la isla, con lo que cada ensayo comenzaba de la misma forma: con una abeja exploradora que descubría una cavidad de anidamiento atractiva en un lugar nuevo.

En los cuatro enjambres estudiados se producía un retraso notable en el despegue cuando se ofrecían cinco cajas (442 minutos de media), en



6. EN LA ISLA DE APPLEDORE, en Maine, escasean los árboles. Con ello nos aseguramos que las abejas se centren en las cajas de anidamiento que les proporcionamos. Los abrigos garantizan que todas las cajas queden expuestas por igual al sol, al viento y a la lluvia. El tamaño de la caja y el de su abertura se modificaron, para que la caja resultase más o menos atractiva para las abejas. Los observadores (*aquí, Seeley*) contaban el número de exploradoras que visitaban cada una de las cajas-nido.

comparación con el tiempo de decisión asociado a una sola caja (196 minutos de media). Los resultados respaldaban con fuerza la hipótesis de la percepción de quórum.

La forma en que las abejas exploradoras perciben el quórum sigue siendo un enigma. Quizá se valen de información visual, olfativa e incluso táctil para evaluar el número de compañeras exploradoras que hay en un sitio, pero ello sigue siendo materia para estudios futuros.

En cuanto el umbral de quórum se alcanza en uno de los sitios, las abejas dan inicio a un comportamiento que se conoce bien. Las exploradoras de este sitio regresan a la concentración del enjambre y empiezan a producir una señal acústica especial, aguda, que estimula a las no-exploradoras del enjambre a calentar sus músculos de vuelo, mediante temblequeo, hasta los 33 a 35 grados centígrados que necesitan para volar. En la producción de esta señal de *gaito de obreras* (“worker piping”), una exploradora zigzaguea a través del enjambre apiñado; se detiene cada segundo o dos para hacer presión con su tórax contra otra abeja y activar así los músculos alares de ésta. Aunque casi toda la energía vibratoria se transfiere directamente a la abeja contactada, el

movimiento produce una vibración audible que recuerda a los acelerones de calentamiento del motor de un fórmula uno. La señal de arranque dura unos 0,8 segundos; tiene una frecuencia fundamental de unos 200 hertz. Dado que el estímulo para el arranque consiste en un quórum —no en un consenso— de exploradoras en el emplazamiento elegido, el proceso de calentamiento del enjambre suele comenzar antes de que las exploradoras hayan alcanzado un consenso. Sin embargo, dado que el calentamiento dura una hora o más, sí suele haber tiempo suficiente para llegar al consenso antes de que todo el enjambre remonte el vuelo.

### Elección del hogar más idóneo

A partir del estudio del proceso de toma de decisiones en los enjambres, mediante la observación de las danzas de las abejas exploradoras, Lindauer y nuestro grupo hemos demostrado que un enjambre elige nido de entre un conjunto de cinco o más emplazamientos posibles. Se plantea entonces la cuestión siguiente: ¿elige el enjambre el mejor de esos sitios? Y, de ser así, ¿cómo lo hace?

Para evaluar la precisión de la elección de emplazamiento, planteamos a los enjambres de Appledore la posibilidad de elegir entre cinco pun-

tos: cuatro anidamientos mediocres y uno excelente. Los anidamientos mediocres resultaban atractivos por todos los conceptos, excepto porque cada caja ofrecía sólo 15 litros de espacio habitable. La caja-nido excelente era idéntica a las otras, pero proporcionaba, en cambio, un espacio de 40 litros, el más adecuado para satisfacer las diversas necesidades de espacio de una colonia (cuidado de las crías, almacenaje de alimento, etcétera).

Casi todos los enjambres del experimento eligieron la mejor caja-nido. Si bien la sede excelente no era nunca la primera en ser descubierta, una vez una abeja exploradora daba con ella, el número de abejas que la visitaban crecía con mayor prontitud que en otros sitios y alcanzaba antes el umbral de quórum. Además, al tiempo que aumentaba el número de abejas en el lugar óptimo, disminuía el de los lugares mediocres; es decir, el interés creciente por el punto de máxima calidad reducía el interés por los demás. Esta inhibición del crecimiento en los sitios menos atractivos por acumulación en el mejor reviste

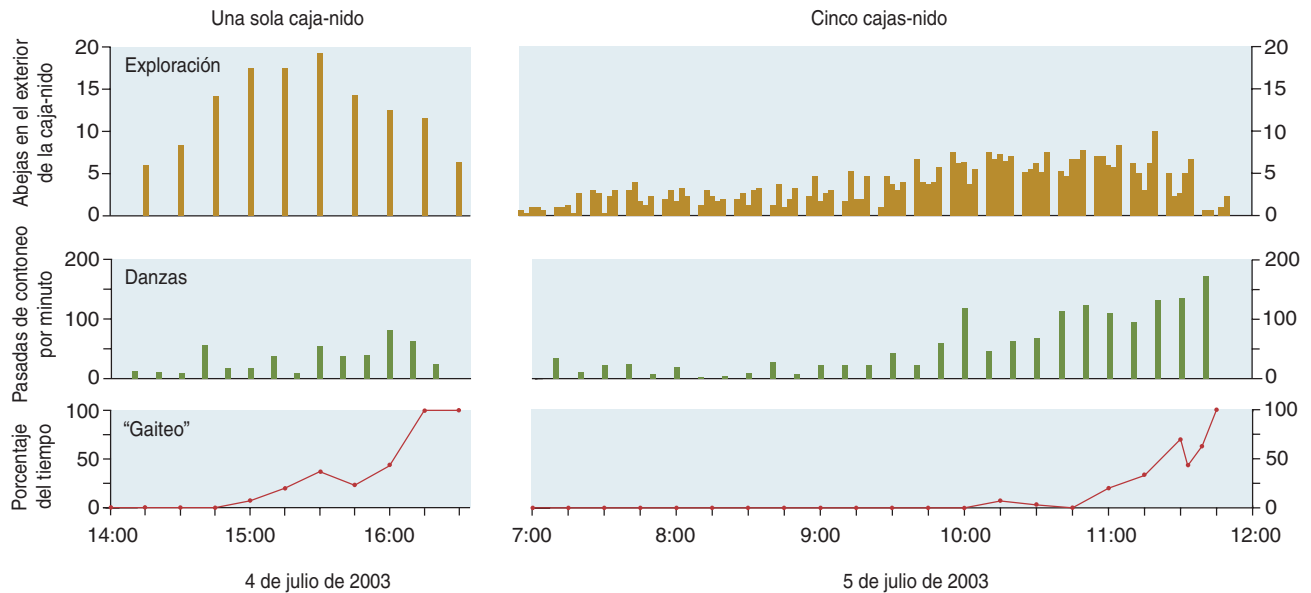
suma importancia, pues contribuye a que el umbral de quórum se supere antes en el sitio óptimo y a la generación del patrón de consenso entre danzarinas, que aparece casi siempre un poco antes de que el enjambre emprenda el vuelo hacia su nuevo hogar.

¿Cuáles son los mecanismos conductuales individuales que subyacen a estas dinámicas? Uno de ellos es una fina regulación de la intensidad de la danza ventral, que se expresa mediante el número de circuitos que se ejecutan para un sitio y varía en función de la calidad del mismo. Para estudiar este fenómeno, ofrecimos a un enjambre de la isla Appledore dos cajas-nido a la vez, una excelente y otra mediocre; analizamos las danzas correspondientes a las dos cajas cuando se interpretaban codo a codo sobre el enjambre.

Descubrimos que la primera vez que una exploradora regresaba al enjambre, de vuelta de un emplazamiento de primera clase, realizaba 100 o más circuitos de danza del vientre. Las exploradoras también informaban de emplazamientos ni-

dales mediocres, pero aceptables, por si acaso no se hallaba nada mejor. En cambio, la primera vez que una exploradora regresaba de un emplazamiento mediocre, realizaba una danza compuesta sólo por una docena de circuitos. Cuanto mayor era la intensidad de la danza correspondiente a un lugar determinado, tanto mayor era el flujo de abejas nuevas que iban a visitarlo. En breve, el incremento de exploradoras será más rápido en el sitio que ofrece mejores condiciones.

La diferencia en intensidad de las señales de reclutamiento está amplificada por otra curiosa característica del comportamiento de las abejas exploradoras. Si una exploradora se mantiene fiel a un sitio, realizará múltiples visitas al mismo (para expresar preferencia por “su sitio” y para mantenerse informada de cómo va aumentando allí el número de compañeras exploradoras); tras cada visita, la abeja indicará el lugar con una danza del vientre. Sin embargo, reducirá la intensidad de su danza informativa en unos 15 circuitos cada vez que regrese



7. ENSAYO DE LA HIPOTESIS de la percepción de quórum. Esta teoría describe el modo en que las abejas exploradoras saben en qué momento ha tomado el enjambre una decisión sobre su nuevo nido. Los resultados muestran lo que ocurre al diluir la atención de las abejas mediante el emplazamiento de cinco cajas-nido idénticas en un mismo lugar. Cuando se les ofreció una sola caja, el número de exploradoras que visitaban el lugar (*arriba a la izquierda*) y la tasa de danzas sobre el enjambre (*en el centro a la izquierda*) aumentaba con prontitud; el “gaito” de arranque, que alerta al en-

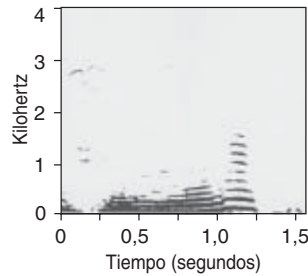
jambre para que se apreste a despegar, ganó intensidad al cabo de sólo 79 minutos de danza (*abajo a la izquierda*). En el escenario con cinco cajas, el número de abejas exploradoras no pasó de diez en ninguno de los sitios, pues las abejas se repartieron entre las cajas idénticas (*arriba a la derecha*); las danzas duraron más tiempo (*en el centro a la derecha*); el “gaito” no se intensificó hasta pasados 244 minutos de danzas (*abajo a la derecha*). La duración de las danzas antes del despegue fue de 138 minutos y 277 minutos para los casos de una y de cinco cajas, respectivamente.

al enjambre para realizar el baile. Así pues, la diferencia total entre la intensidad de dos señales de reclutamiento, correspondientes a dos sitios distintos, constituye casi una función exponencial de la diferencia de calidad entre tales sitios.

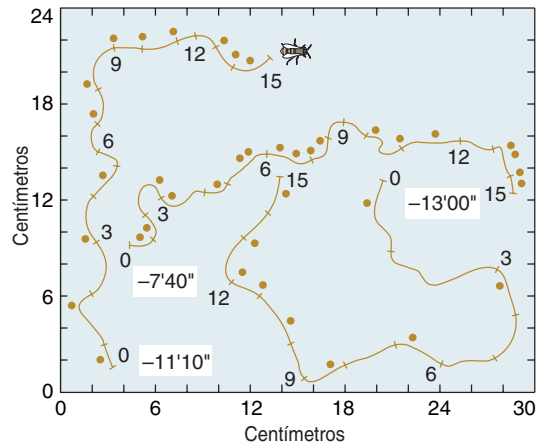
Si dos abejas que anuncian un asentamiento excelente y uno mediocre ejecutan, respectivamente, 90 y 30 circuitos de danza en su primer regreso al enjambre, la diferencia total en sus señales de reclutamiento no será el triple, sino el séptuplo ( $90 + 75 + 60 + 45 + 30 + 15 + 0 = 315$  circuitos en total, frente a  $30 + 15 + 0 = 45$  circuitos en total). A esto se añade una fuerte retroalimentación positiva en el proceso de reclutamiento, pues cuanto mayor sea el número de abejas partidarias de un sitio, mayor será el número de reclutadoras, lo que genera, a su vez, un número todavía mayor de abejas partidarias del sitio. Por tanto, pequeñas diferencias en la calidad de los sitios de anidamiento y en la intensidad de las danzas correspondientes aumentan en progresión geométrica y generan grandes diferencias en el número de exploradoras afiliadas a dichos sitios.

Las diferencias en el vigor de la danza ventral y la retroalimentación positiva inherente a este proceso de reclutamiento explican la diversidad del número de exploradoras consagradas a los lugares candidatos, siendo el más adecuado el que gana adeptas con mayor prontitud. Pero, ¿qué provoca la caída del número de partidarias de los sitios de menor calidad, al tiempo que se infla el correspondiente al mejor? La caída responde al hecho de que todas las exploradoras, incluso las asociadas a sitios excelentes, acaban por abandonar su sitio. De ordinario, una abeja deja de visitar un lugar poco después de haber dejado de danzar a favor del mismo; las abejas abandonan los sitios malos antes que los buenos.

Una vez que una exploradora abandona un sitio, se "repone a cero". Se la recluta para otro sitio o incluso para el mismo sitio por segunda vez. No obstante, cuando una abeja abandona la danza a favor de un lugar, en el 80 por ciento de las veces dejará de danzar definitivamente. Las exploradoras dependen, en consecuencia, del reclutamiento de otras exploradoras



**8. LAS EXPLORADORAS "GAITERAS"** describen un trazado aleatorio sobre el enjambre que estimula a las obreras y las apresta para el despegue (*arriba a la derecha*). Aquí se representan trayectorias de 15 segundos; los puntos indican acontecimientos de "gaito". En los recuadros blancos se consigna el tiempo hasta el despegue del enjambre. Cuando una abeja "gaitea", junta las alas, hace presión con el tórax contra el sustrato y activa los músculos de las alas para producir una vibración (*abajo a la derecha*). En la colmena, las exploradoras hacen esto sobre un panal, pero en el enjambre, casi siempre lo hacen directamente sobre otra abeja. Un sonograma muestra que la señal es cada vez más aguda (aumenta la frecuencia) y contiene armónicos (*arriba a la izquierda*).



que no han encontrado emplazamientos candidatos durante su búsqueda y que, por ello, no se han comprometido con ningún lugar.

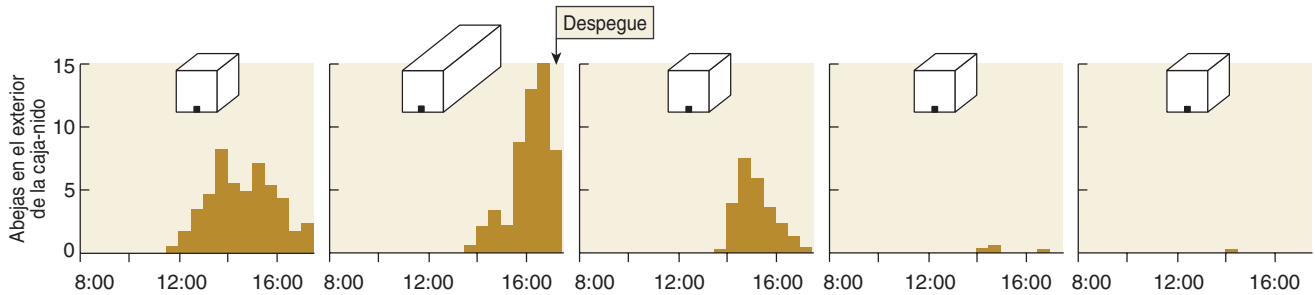
Ahora bien, cuando una abeja es reclutada para visitar un sitio, si no le parece lo bastante bueno quizá no se incline de inmediato por él y, por tanto, no se ponga a danzar en su favor a su regreso. Cabe, pues, que una exploradora no comprometida visite varios sitios antes de encontrar uno que en su opinión valga la pena.

En cuanto la tasa de reclutamiento a favor de un sitio supere a la de abandonos, aumentará el número de exploradoras afiliadas a ese sitio. Al final, la tasa de reclutamiento para el emplazamiento de máxima calidad crecerá tanto, que se desplomarán las tasas correspondientes a lugares de menor calidad; el grupo de exploradoras no comprometidas es finito y la mayoría son reclutadas para el lugar óptimo. Cuando la tasa de reclutamiento cae por debajo de la tasa de abandono en cada uno de los lugares de menor calidad, el número de exploradoras partidarias de

ellos empieza a disminuir. En breve, conforme crece el grupo partidario del lugar óptimo, van quedando excluidos de la competición los grupos afiliados a emplazamientos menos adecuados.

Mary R. Myerscough, de la Universidad de Sydney, ha desarrollado modelos matemáticos de la dinámica poblacional de las abejas exploradoras cuando éstas efectúan danzas para las distintas sedes de anidamiento. Ha demostrado que, si se les concede tiempo, las exploradoras danzantes acabarán, casi siempre, centrando la atención en el mejor de los sitios descubiertos. Este resultado concuerda con lo que Lindauer y nosotros hemos presenciado en las interrelaciones entre exploradoras: se alcanza por lo común un consenso o acuerdo antes de que el enjambre emprenda el vuelo hacia el nuevo hogar.

Aunque la unanimidad entre abejas danzantes poco antes del despegue constituye un rasgo sobresaliente de los registros de danzas, la esencia de la toma de decisiones grupales en los enjambres consiste en alcan-



**9. ¿ELIGEN SIEMPRE LAS ABEJAS EL MEJOR DE LOS SITIOS DISPONIBLES?** Para averiguarlo, situamos en abanico y a la misma distancia del enjambre (250 metros) cinco cajas: cuatro mediocres, de sólo 15 litros de capacidad, y una magnífica, de 40 litros. Cada 30 minutos se contaban las exploradoras que

visitaban cada sitio. El sitio mejor no fue el primero en ser descubierto; sin embargo, una vez localizado, el interés por él creció rápidamente y por fin atrajo hacia sí toda la atención, por lo que el quórum se alcanzó allí en primer lugar. Las abejas seleccionaron la sede óptima en cuatro de las cinco pruebas.

zar un quórum, no un consenso. Sin embargo, no se debiera considerar que el consenso corresponde a un subproducto incidental y de importancia menor en la toma de decisiones. Por el contrario: tal consenso es necesario para que el enjambre tenga éxito en su vuelo hacia la nueva residencia.

Hemos observado, en ocasiones, que un enjambre remontaba el vuelo, mientras las exploradoras danzaban vigorosamente en favor de diversos sitios. En todos los casos, el enjambre, ya en el aire, parecía incapaz para alejarse. No acaban de conocerse los mecanismos de guiado del enjambre en vuelo, pero de tales observaciones se deduce que el proceso de guiado depende de que un número suficiente de exploradoras proporcionen una información direccional coherente para el resto de las abejas del enjambre en vuelo. Diríase que, cuando se produce una división de opiniones, el enjambre necesita posarse de nuevo y continuar con las deliberaciones, hasta que uno de los lugares candidatos predomine.

### Prontitud y acierto

Un problema fundamental en la toma de decisiones estriba en hallar un punto medio idóneo entre la prontitud y el acierto de la decisión. Cuando un animal, o un grupo, ha de decidir rápidamente, corre el riesgo de que su decisión sea errónea o mediocre; no puede examinar un número elevado de posibilidades, no puede evaluarlas con suficiente profundidad o ni una cosa ni otra.

Si damos por supuesto que a un enjambre se le plantea el mismo di-

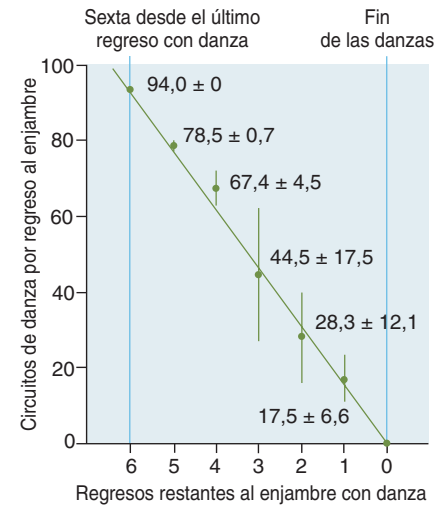
lema entre prontitud y precisión al escoger un nido, cabe preguntarse si la selección natural habría afinado los parámetros conductuales del proceso de decisión grupal en las abejas, de modo que el enjambre haya de soportar costos reducidos de tiempo y energía, al propio tiempo que minimiza las probabilidades de elegir un sitio poco idóneo.

Con el fin de averiguarlo, pergeñamos un modelo matemático estocástico, con variable temporal discreta, del proceso de toma de decisiones de los enjambres. Luego utilizamos este modelo para crear enjambres “pseudo-mutantes”, es decir, enjambres con distintos valores para los diversos parámetros conductuales. Observamos así de qué modo los incrementos o decrementos de cada parámetro afectaban a la prontitud y la precisión con que el enjambre elegía su hogar.

Un parámetro obviamente susceptible de modificación era el tamaño del quórum, pues la percepción del quórum resulta fundamental en la toma de decisiones del enjambre. Al variar el tamaño del quórum en el modelo (manteniendo todo lo demás en sus valores normales), observamos que un quórum reducido conllevaba decisiones rápidas, aunque a menudo inadecuadas; con un quórum elevado, en cambio, pese a que la decisión se retrasara, era más acertada. Cabe resaltar que el valor de quórum deducido del modelo que proporcionaba un equilibrio idóneo entre prontitud y precisión —entre 15 y 20 abejas— concuerda con la observación empírica: las abejas exploradoras dan comienzo al proceso de calentamiento del enjambre, pre-

vio al despegue, cuando el número de abejas que rondan uno de los sitios se sitúa entre 10 y 20.

Examinamos también una de las características del comportamiento de las abejas exploradoras que parece contribuir al proceso de toma de decisiones del enjambre: a saber, la forma en que una exploradora reduce la intensidad de su danza a favor de una posible sede de anidamiento



**10. EL NUMERO DE CIRCUITOS** de danzas ventrales que una exploradora ejecuta tras la visita a un sitio disminuye de forma rápida y lineal en cada uno de los sucesivos regresos al enjambre. Sin embargo, las abejas partidarias de sitios excelentes empiezan con un número grande de circuitos de danza, mientras que las abejas que visitaron sitios mediocres comienzan en puntos más bajos de la línea. Así pues, las exploradoras gradúan la intensidad de su reclutamiento en función de la calidad del sitio.

to, cuando efectúa repetidas visitas a la misma. Resulta llamativo que cada vez que una exploradora visita un posible lugar de anidamiento y regresa luego al enjambre para informar del sitio, ejecuta un número menor de circuitos de danza; es decir, aboga a favor de su sitio cada vez con menos vehemencia. Al variar en nuestro modelo la tasa de reducción de circuitos por danza quedó manifiesta la importancia de ese factor.

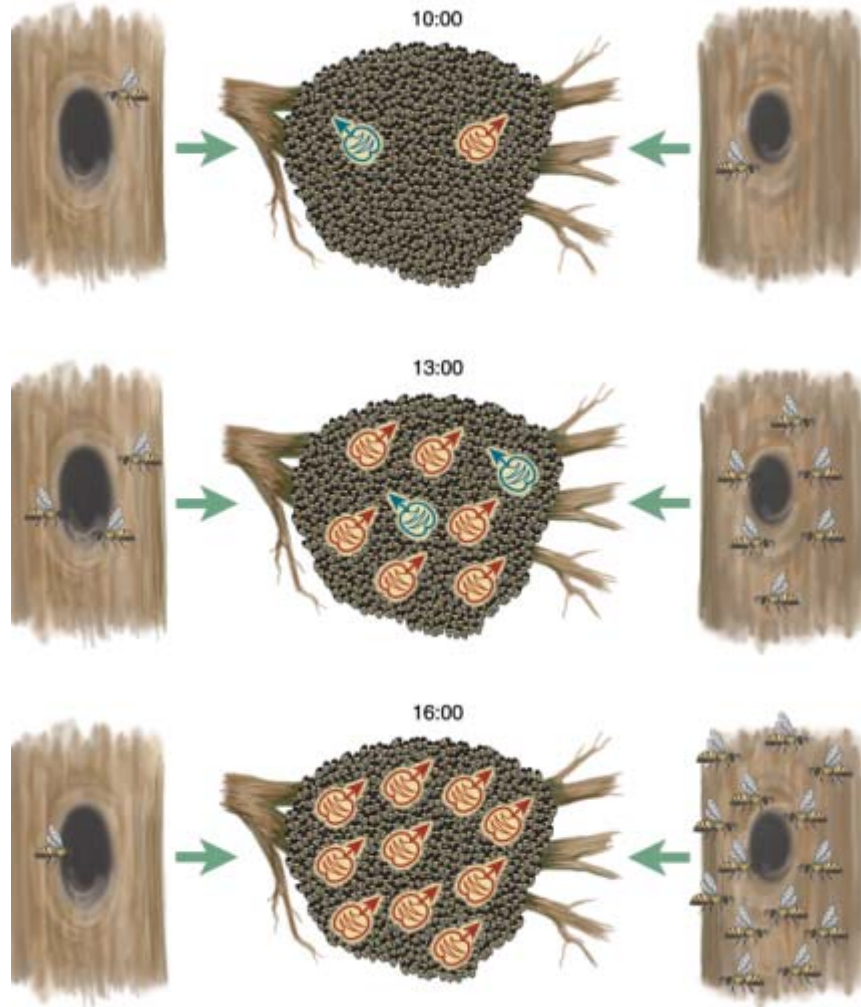
En efecto, si el número de circuitos se reduce con mayor prontitud que la observada en la naturaleza, el tiempo necesario para llegar a una decisión aumenta, pues un descenso rápido en el número de circuitos dificulta el alcance de quórum en cualquiera de los sitios. Recíprocamente, si el número de circuitos se reduce a un ritmo menor que el observado en la naturaleza, surge un problema todavía más grave: la toma de decisiones en el enjambre fracasa al producirse decisiones con disenso (se alcanza el quórum en lugares distintos).

En consecuencia, según nuestro modelo, la tasa de reducción de circuitos que proporciona un buen equilibrio entre prontitud y precisión (entre 15 y 20 circuitos de danza por visita al nido) coincide con la observación empírica: por término medio, las abejas abrevian sus danzas en unos 15 circuitos por visita a un asentamiento.

A la vista de estos hallazgos sobre el tamaño del quórum, la reducción del número de circuitos por danza y otros parámetros, dedujimos que la selección natural ha depurado y refinado la conducta de las exploradoras en los enjambres de abejas melíferas. Se ha desarrollado un proceso de decisión grupal que ofrece un equilibrio cuasióptimo entre las exigencias contradictorias de prontitud y acierto.

### Enjambre sabio

Henry David Thoreau lamentaba en una de las anotaciones de su diario de 1838 la dificultad con que topan los grupos humanos para lograr una inteligencia colectiva. “La masa nunca alcanza el nivel del mejor de sus miembros; por el contrario, se degrada a sí misma hasta el nivel del más rastrero.” En esta misma línea, Frie-



11. LAS ABEJAS EXPLORADORAS gradúan la intensidad de su danza en función de la calidad del alojamiento descubierto. Ello acelera el logro de un quórum en el mejor de los lugares disponibles. En este caso, las exploradoras localizan dos sitios potenciales, uno con una gran entrada (*izquierda*) y otra con una entrada menor, más deseable (*derecha*). Cada exploradora vuelve entonces al enjambre (*flechas verdes*) y ejecuta una danza ventral correspondiente a su sitio (*arriba, centro*); pero la exploradora que ha encontrado el mejor de los dos ejecuta un número de circuitos de danza mayor (*rojo*) que la precedente del árbol izquierdo (*azul*). Tres horas más tarde, el número de exploradoras comprometidas con el árbol derecho se ha multiplicado por seis, mientras que el apoyo para el árbol izquierdo sólo se ha triplicado; la mayoría de las danzas son favorables al árbol derecho (*centro*). Transcurridas tres horas más, el número de exploradoras del árbol de la derecha se ha engrosado y las danzas en favor de este sitio han excluido de la competición al árbol de la izquierda (*abajo*).

drich Nietzsche escribía en *Más allá del bien y del mal*: “La locura es la excepción en los individuos, pero la norma en los grupos.” Con todo, los grupos no toman siempre decisiones lamentables; en ocasiones, deciden con acierto. ¿En qué circunstancias los grupos piensan con inteligencia elevada y actúan de forma colectiva para tomar decisiones acertadas? En nuestra opinión, el proceder de un enjambre en la selección de un nido

arroja luz sobre esta cuestión. Resulta evidente que las abejas realizan con éxito juicios colectivos.

El primer aspecto relevante es que la organización de las abejas exploradoras promueve la diversidad de conocimiento en el seno del grupo. No están dirigidas ni dominadas por un grupo restringido de abejas. Antes bien, en el proceso que conduce a la toma de decisiones participan todas las exploradoras del enjambre. Ello

significa que la toma de decisiones se basa en las acciones de centenares de individuos: cada uno opera como un agente autónomo que proporciona información propia e independiente para resolver el problema de búsqueda de vivienda.

El primer estadio de la toma de decisiones se basa en el descubrimiento de las diversas posibilidades entre las que optar: los centenares de abejas exploradoras del enjambre, que buscan todas a la vez y exploran una zona amplia, aportan a su regreso información variada —de lugares excelentes, mediocres o lamentables—, que comparten con otras exploradoras mediante la ejecución de danzas ventrales. Informan con plena libertad de todos los sitios de anidamiento posibles; ninguna lo hace en sordina.

Así pues, el enjambre extrae pleno provecho de su naturaleza colectiva para ensamblar con prontitud —a menudo en sólo unas cuantas horas— una profusión de opciones. Cuantas más sean éstas, mayor es la probabilidad de que una de ellas corresponda a un asentamiento de primera categoría. La organización descentralizada constituye, pues, una de las propiedades esenciales de la toma de decisiones en un enjambre: asegura la disponibilidad de un amplio abanico de opciones.

Un segundo rasgo del comportamiento de las abejas promueve su inteligencia colectiva: las exploradoras no muestran tendencia hacia la conformidad, ni hacia la imitación servil de otras, mientras contribuyen a la toma de decisiones. Ya hemos explicado que el motor de este proceso es una competición entre las diversas coaliciones de exploradoras afiliadas a distintas sedes, cada una de las cuales se esfuerza en sumar a su grupo exploradoras sin adscripción. Los miembros de cada coalición reclutan nuevos miembros mediante la ejecución de danzas ventrales, cuya intensidad depende de la calidad del sitio examinado: cuanto mejor sea éste, más vigorosa será la danza y mayor el flujo de nuevas asociadas. Pero cuando se recluta una nueva exploradora para inspeccionar un sitio, ésta no respalda ciegamente a la guía. Prefiere examinar por sí misma el lugar indicado: sólo si ella juzga que se trata de un emplaza-

miento valioso ejecutará su propia danza a favor y, así, reclutará todavía más abejas para el sitio. A través de esta independencia de opinión, las exploradoras evitan la propagación de errores en la evaluación de emplazamientos. Sólo si el sitio es verdaderamente bueno, las danzantes atraerán a nuevas danzantes; se producirá un fuerte incremento en el número de exploradoras que rondan el sitio. Las abejas exploradoras evitan así las manías colectivas por opciones sin valor.

La tercera clave para el éxito del enjambre estriba en el modo en que el proceso de percepción de quórum agrega las opiniones diversas e independientes de las exploradoras, pues equilibra las necesidades opuestas de acierto y prontitud en la toma de decisión. El grado de quórum es suficientemente elevado como para que muchas abejas deban evaluar de forma independiente la calidad del sitio antes de que se erija favorito. La selección rápida, basada en la opinión favorable de sólo una o de unas cuantas abejas, no es posible. El proceso de percepción de quórum filtra y elimina las opiniones extremistas o desacertadas; proporciona una evaluación ponderada, a escala de grupo, del emplazamiento

elegido. Tal evaluación requiere tiempo, pero garantiza un intervalo suficiente para que surjan auténticas diferencias de opinión y para que los sitios descubiertos se evalúen con criterios independientes. Así pues, la agregación de las informaciones de las abejas mediante la percepción de quórum favorece la diversidad y la independencia de opinión, pero sólo durante el tiempo suficiente para hacer improbable que se incurra en un error de decisión.

Las consideraciones anteriores ilustran la forma en que el estudio de la toma de decisiones en enjambres podría contribuir a que los grupos de humanos logren la inteligencia colectiva y eviten así la colectiva necesidad. Las abejas nos hacen ver que el acierto en las decisiones grupales se favorece mediante la adquisición en el grupo de tres hábitos cruciales: estructuración de las deliberaciones en forma de competición abierta de ideas, promoción de la diversidad de conocimientos y la independencia de opiniones entre miembros de un grupo y, por fin, agregación de las opiniones mediante procedimientos que respeten las limitaciones de tiempo y, a la vez, aprovechen sabiamente el abanico de conocimientos que el grupo posee.

## Los autores

**Thomas D. Seeley**, docente de neurobiología y comportamiento en la Universidad de Cornell, se formó en Harvard. Centra su investigación en la organización funcional de las colonias de abejas melíferas. **P. Kirk Visscher**, doctorado en entomología por la Universidad Cornell, es profesor de entomología en la Universidad de California en Riverside. Se ha especializado en el estudio del comportamiento social y la comunicación de las abejas. **Kevin M. Passino** enseña ingeniería eléctrica e informática en la Universidad estatal de Ohio. Se doctoró en ingeniería eléctrica en la Universidad de Notre Dame en 1989. Su investigación se centra en la biología de sistemas y en el diseño de técnicas de inspiración biológica.

©American Scientist Magazine.

## Bibliografía complementaria

- QUORUM SENSING DURING NEST-SITE SELECTION BY HONEY BEE SWARMS. T. D. Seeley y P. K. Visscher en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 56; págs. 594-601; 2004.
- THE WISDOM OF CROWDS. J. Surowiecki. Doubleday; Nueva York, 2004.
- CONSENSUS DECISION MAKING IN ANIMALS. L. Conradt y T. J. Roper en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20; págs. 449-456; 2005.
- HOW DOES AN INFORMED MINORITY OF SCOUTS GUIDE A HONEY BEE SWARM AS IT FLIES TO ITS NEW HOME? M. Beekman, R. L. Fathke y T. D. Seeley en *Animal Behaviour*, vol. 71; págs. 161-171; 2006.
- MODELLING AND ANALYSIS OF NEST-SITE SELECTION BY HONEY BEE SWARMS. THE SPEED AND ACCURACY TRADE-OFF. K. M. Passino y T. D. Seeley en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 59; págs. 427-442; 2006.