

## CONTENIDOS BÁSICOS

### **La polinización**

Los antiguos asirios (800 dc) ya sabían que las flores necesitaban que el polen pasara de los órganos masculinos a los femeninos para que hubiera polinización y se desarrollaran los frutos. Existen relieves tallados sobre piedra, algunos de los cuales se conservan en el Museo Británico de Londres, donde se representa la transferencia de polen desde las inflorescencias masculinas hasta las femeninas, aparentemente en palmeras datileras.

Aunque la mayoría de las plantas pueden emplear diferentes formas de reproducción asexual y generar así clones de si mismas, el intercambio genético que se produce durante la **reproducción sexual** con la **polinización cruzada** entre individuos diferentes, resulta vital para la buena salud de las poblaciones a corto plazo y para la evolución de las especies a largo plazo [1].

El término **polen** deriva del latín y significa "polvo fino o harina"; el uso de la palabra en este contexto se remonta a la antigüedad, pero el primero que lo usó como término científico para describir las unidades portadoras de las células sexuales masculinas en las plantas con flores fue Linneo en su obra *Sponsalia Plantarum*, publicada en 1.747.

Podemos definir la **POLINIZACIÓN** como el **proceso mediante el cual el polen viaja desde las anteras (parte masculina) de una flor hasta alcanzar el estigma (parte femenina) de esa misma u otra flor, en principio de la misma especie.**

La **autofecundación** no es la alternativa más frecuente y las plantas emplean diferentes estrategias para evitarla. A menudo se dan casos de autoincompatibilidad, es decir, la superficie del estigma no reconoce las señales químicas del polen del mismo individuo y se impide la formación del tubo polínico que lleva al gameto masculino hasta el óvulo para su fecundación.

Los vectores o agentes encargados de transportar el polen de unas flores a otras son tres: el **VIENTO**, el **AGUA** y los **ANIMALES** (en este último caso, se denomina **polinización biótica**).

Muchas especies vegetales están adaptadas a la **polinización por el viento** (plantas anemófilas), por ejemplo las ortigas, alisos, robles, abedules, hayas, la mayoría de las coníferas o las gramíneas. Los granos de polen de estas plantas se producen en grandes cantidades y suelen ser pequeños y/o secos, fáciles de transportar por el viento. En el caso de las gramíneas, los tallos que portan sus inflorescencias son normalmente largos y delgados, moviéndose de forma efectiva incluso con una leve brisa. En otros casos, las plantas muestran otras adaptaciones a este tipo de polinización, como la presencia de estigmas plumosos que les permiten atrapar el polen transportado por el viento, o unos filamentos estaminales largos como hilos, con las anteras expuestas al viento colgando libremente en sus extremos.

La **polinización por el agua**, aunque menos frecuente, está bien desarrollada en plantas de agua dulce, como las lentejas de agua, así como en las especies del

género *Zostera* (de aguas salobres), cuyos granos de polen son liberados en masa y transportados pasivamente por las mareas a través de los campos de *Zostera*, alcanzando los estigmas femeninos que sobresalen a lo largo de su ruta.

Los granos de polen de las coníferas poseen un par de sacos de aire, que se asocian evolutivamente con la aerodinámica y la hidrodinámica, porque le permiten al polen ser transportado con éxito por el aire o por el agua.

## ***La polinización por animales***

Los animales, sobre todo los insectos en nuestras latitudes, juegan un papel vital en la reproducción de las plantas al facilitar la polinización de muchas especies vegetales. De estos polinizadores, los **insectos** son con diferencia el grupo más numeroso, aunque algunos **reptiles**, **aves**, e incluso **mamíferos** (como los murciélagos o los lemures) pueden también desempeñar esta importante labor.

**Plantas y polinizadores** llevan millones de años evolucionando juntos y probablemente constituyen el ejemplo más claro de **mutualismo** que se puede observar en la naturaleza (se dice que dos especies interaccionan de forma mutualista cuando ambas salen beneficiadas de dicha interacción); normalmente los polinizadores obtienen de las plantas una recompensa, bien sea en forma de alimento (principalmente néctar y polen), de fragancias que posteriormente utilizan en sus cortejos o simplemente de protección para su descendencia, facilitando a cambio la perpetuación de los vegetales.

Sin embargo, si un gestor del medio ambiente le preguntara a un científico "*¿Cuántas plantas con flores son polinizadas por animales?*", una respuesta honesta por parte del investigador implicaría asumir que "*no lo sabemos*".

En la vegetación actual, las **angiospermas** (plantas con flores y cuyas semillas se encuentran protegidas en el interior de un fruto) son sin lugar a duda el grupo dominante de plantas vasculares superiores; también son las especies vegetales que dependen en mayor grado de la polinización animal, y de hecho se considera que fueron en parte este tipo de interacciones entre plantas e insectos las que posibilitaron la gran diversificación de ambos grupos. En la actualidad hay cerca de 352.000 especies de angiospermas descritas y de la mayoría de ellas desconocemos su tipo de polinización. No obstante, en trabajos recientes se ha estimado que el 87.5 % de esas plantas, **unas 308.000 especies, dependen de los animales para su polinización en mayor o menor medida** [2].

Estos trabajos, en los que se han efectuado comparaciones acerca de la proporción de plantas polinizadas por animales y plantas polinizadas por el viento en varios tipos de ecosistemas (se incluyen ecosistemas en latitudes templadas, tropicales y subtropicales, tanto de zonas costeras como de montaña, desde bosques hasta matorrales desérticos, pasando por selvas, sabanas o praderas), concluyen además que la proporción de especies polinizadas por animales oscila, de media, entre un 78 % en comunidades de zonas templadas y un 94 % en comunidades tropicales. Es decir, aunque en los ecosistemas templados la proporción de plantas polinizadas por el viento es algo mayor que en ecosistemas tropicales (y por tanto, presentan una menor dependencia de los animales), en ningún caso hay duda de que **las interacciones planta - polinizador juegan un papel crucial para el mantenimiento de la integridad funcional de los ecosistemas terrestres**.

## ***Importancia de los polinizadores en los ecosistemas***

Toda las especies que habitan la Tierra tienen valor en sí mismas, y deberían ser respetadas por el mero hecho de existir. Sin embargo, no es este tipo de importancia "moral" la que aquí se considera, ya que se da por supuesta.

Podemos definir la diversidad biológica o **biodiversidad** como la variedad de formas de vida que habitan en la Tierra, y no estaríamos exagerando si afirmásemos que la polinización, es un proceso clave para el mantenimiento de esta biodiversidad, al menos en los ecosistemas terrestres.

Normalmente se consideran tres niveles de biodiversidad, que se organizan de forma jerárquica como si de muñecas rusas se tratara: la **diversidad de ecosistemas** (formados por diferentes especies, el ambiente físico en el que viven y la suma total de sus interacciones), que a su vez incluye la **diversidad de especies** y dentro de esta, podemos hablar de una **diversidad genética**, que considera las diferencias entre poblaciones e individuos de una misma especie.

Si tenemos en cuenta que la polinización es un proceso que implica directamente a las distintas especies (de plantas y polinizadores), que estas interacciones planta-polinizador son imprescindibles para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y que influyen directamente en la variabilidad genética de los organismos, podemos al menos intuir la magnitud del proceso.

Tampoco debemos olvidar que el resultado de la reproducción sexual de las plantas es la producción de semillas y frutos, que además de facilitar la propagación y supervivencia de las distintas especies vegetales, constituyen a su vez el alimento de muchos otros animales, incluidos nosotros, los seres humanos.

A menudo se resaltan aquellas relaciones planta - polinizador altamente especializadas (donde una planta depende en gran medida de un determinado polinizador, o viceversa) como ejemplo de la importancia de la polinización para la conservación de las especies. Esto ocurre por ejemplo en el caso de las plantas del género *Ficus* (entre las que destaca la higuera común, *Ficus carica* L.) y las avispas de la familia Agaonidae, donde prácticamente cada especie vegetal tiene su avispa polinizadora particular. Otro ejemplo que ilustra el ajuste perfecto entre un par de especies lo constituye la planta *Angraecum sesquipedale*, una orquídea que se descubrió en Madagascar en tiempos de Darwin. Su corola es muy alargada, lo que llevó a Darwin a predecir la existencia de un insecto polinizador con una trompa de una longitud similar. Fue sólo cuestión de tiempo encontrar a la esfinge de Morgan (*Xanthopan morgani praedicta*), una polilla de la familia *Sphingidae* cuya trompa tiene la increíble longitud de 40 cm.

Sin embargo, ésta es sólo una cara de la moneda y aunque estos casos efectivamente se dan en la naturaleza, no son los más habituales. El mejor modo de considerar la relación entre las plantas y los animales que propagan su polen no es tomando en cuenta pares de especies así ligadas, sino la red de conexiones de ese tipo que se producen en un ecosistema. De hecho, **las interacciones mutualistas entre las plantas y los animales que las polinizan y dispersan sus semillas, forman complejas redes de interdependencias que constituyen la arquitectura de la biodiversidad** [3].

Estas dependencias en beneficio mutuo, o mutualistas, entre una especie animal y otra vegetal han desempeñado una función muy importante en la generación de la biodiversidad en la Tierra. Hoy en día sabemos que las especies vegetales que producen flores polinizadas por animales se han diversificado mucho más que sus primas hermanas con flores polinizadas por el viento. Las plantas con flor proporcionaron un nuevo nicho ecológico para los insectos, que se diversificaron, lo que a su vez facilitó la diversificación de las plantas. Plantas e insectos han ido de la mano y se han proporcionado oportunidades mutuas.

Uno de los grandes retos actuales es entender cómo la biodiversidad, en su sentido global de red, responderá ante una variedad de perturbaciones: la pérdida de hábitat, las invasiones biológicas, la sobreexplotación de los recursos naturales o el cambio global. Por ejemplo, ¿cómo afectará la extinción de una especie a estas redes de interdependencias planta-polinizador o planta-dispersor de semillas? ¿Se verán afectadas sólo una o dos especies, o, por el contrario, iniciará una avalancha de coextinciones que se propagarán por toda la red?.

En los pocos estudios realizados hasta la fecha donde se analizan las interacciones planta-polinizador a nivel de ecosistema, se ha visto que intervienen decenas e incluso cientos de especies en tupidas redes de relaciones. El patrón general que se observa es una red con una amplia variabilidad en el número de interacciones por especie. Bascompte y Jordano se encontraron con que las **redes mutualistas** son muy **heterogéneas** (la mayoría de las especies interactúan con otras pocas especies, pero unas pocas especies están mucho más conectadas de lo que se esperaría por azar; no obstante, ya sea por causas fenológicas, morfológicas, etc., no todas las interacciones planta-animal son posibles, por lo que a partir de cierto grado de conectividad, disminuye la probabilidad de encontrar especies con un nivel superior de generalización), **encajadas** (las especies que sólo mantienen relaciones especializadas muestran predilección por interactuar con especies generalistas) y construidas mediante **dependencias débiles y asimétricas** (si una planta depende mucho de un animal, el animal apenas dependerá de esa planta).

La heterogeneidad de las redes mutualistas, les confiere una cierta robustez ante la extinción de especies al azar. Su naturaleza encajada implica la existencia de un núcleo en la red, constituido por un número pequeño de plantas y animales generalistas que interactúan entre sí y constituyen una estructura redundante, con una fracción elevada de interacciones del total. Este núcleo es flexible ante la pérdida de algunas de sus interacciones y, por tanto, proporciona rutas alternativas para los flujos de materia y energía. Por otro lado, el hecho de que las especies de uno de los conjuntos (por ejemplo, el de los animales) tiendan a interactuar sólo con las generalistas del otro conjunto, confiere mecanismos de persistencia para los especialistas, ya que los generalistas de los que dependen suelen ser más abundantes y menos fluctuantes, al contar con muchos y diversos recursos. La conjunción de interacciones débiles y asimétricas favorecen, presumiblemente, la persistencia de las especies en la comunidad. Si las dependencias entre cada par de especies implicadas fueran fuertes y simétricas (o recíprocas), una disminución poblacional en una de las especies comportaría la reducción de la otra, lo que a su vez dificultaría la recuperación de la primera. Este tipo de efecto en cascada hacia la extinción resulta más improbable cuando hablamos de interacciones débiles y asimétricas. Cabe resaltar también que en casi la mitad de las grandes redes estudiadas, las especies filogenéticamente emparentadas tienden a tener un papel similar en la red.

Una alteración del éxito reproductivo relativo de las diferentes especies de plantas debida a su sistema de polinización puede conducir a profundos cambios en la estructura de la comunidad vegetal, lo cual, a su vez, puede tener efectos en

cascada sobre la comunidad animal asociada. No obstante, un descenso de los servicios de polinización puede tener consecuencias más sutiles que una simple reducción de la producción de semillas; por ejemplo, también podría conducir a una reducción del cruzamiento y por lo tanto a un aumento de la endogamia.

Desafortunadamente, desconocemos los requerimientos de polinización de la mayor parte de las flores silvestres, y mucho menos si se encuentran limitadas por una falta de polinizadores, por lo que nos resulta imposible predecir cuales son las especies que más riesgo corren. Es probable que muchas plantas raras estén recibiendo un servicio de polinización menos seguro que el que un día tuvieron, pero esto generalmente no será desvelado ya que nadie lo está estudiando. Son muy pocos los estudios a largo plazo que se llevan a cabo en cualquier hábitat, y resulta muy difícil separar los efectos de la abundancia de polinizadores de los efectos de otros cambios ambientales. En el caso de las plantas perennes, si estas producen pocas semillas, probablemente pasaran bastantes años antes de que los efectos sean observados. **En la actualidad, simplemente no hay suficientes datos disponibles para sacar conclusiones a gran escala sobre si los cambios en la abundancia de polinizadores están teniendo un impacto generalizado en las comunidades naturales de plantas [4].**

Aunque los ecosistemas parecen mostrar una serie de mecanismos que les otorgan una cierta estabilidad ante determinadas alteraciones, producidas bien de forma natural o fruto de las actividades humanas, resultaría contraproducente, a la par que irresponsable, emplear este argumento como justificación para continuar explotando los servicios ecosistémicos de forma irracional, sobre todo si consideramos el desconocimiento que todavía tenemos acerca de su funcionamiento.

### ***Importancia de los polinizadores en los cultivos***

En el año 2.012 ya habitamos en el planeta Tierra **7.000 millones de seres humanos**, una población que se estima podría alcanzar los 9300 millones de personas a mediados de este siglo. Pero... **¿quién polinizará los cultivos que harán falta en un futuro para satisfacer las necesidades de tanta gente?**

La polinización es un proceso esencial, tanto para los ecosistemas terrestres naturales como para los gestionados por el hombre; resulta vital para la producción de alimentos y los medios de vida de los seres humanos, relacionando directamente los ecosistemas silvestres con los sistemas de producción agrícola.

Los seres humanos, basándonos en el supuesto de que la polinización es un servicio ecológico gratuito y abundante, hemos sometido a los polinizadores a una gran presión con nuestra actividad (ver apartado 5- Factores que pueden afectar a la diversidad y abundancia de polinizadores). La horticultura se ha expandido rápidamente a lo largo de las últimas décadas, mientras que el paisaje se ha uniformizado a causa de la agricultura intensiva. La falta de polinización ha aumentado la sensibilización acerca del valor de este servicio y de los requerimientos de su ordenación.

Numerosos estudios nos indican que **la producción de más del 80% de las especies cultivadas en Europa depende, en mayor o menor medida, de animales polinizadores**, principalmente insectos y, dentro de estos, de las abejas (silvestres y domésticas).

La polinización por insectos es un servicio ecosistémico y también una práctica productiva ampliamente utilizada por agricultores de todo el mundo. Constituye a su vez una herramienta de gestión en la que las abejas domésticas, los abejorros y otras pocas especies de abejas son compradas o arrendadas por los agricultores en muchos países para complementar la actividad de los polinizadores silvestres locales. Los agricultores tienen claro el beneficio económico de la polinización animal, existiendo ya un mercado bien desarrollado en EEUU y en Europa de alquiler de colmenas de abejas domésticas, y de colonias de abejorros por todo el mundo. Esta práctica, sugiere que no hay ya suficientes polinizadores silvestres para asegurar una polinización adecuada de todos los cultivos que se demandan actualmente. Sin embargo, la actividad de estos últimos no debe ser despreciada, pues los polinizadores silvestres, en particular las abejas silvestres, contribuyen significativamente a la polinización de una gran variedad de cultivos.

En los últimos tiempos, parece que tanto la abundancia y diversidad de polinizadores silvestres, como la abundancia de las abejas domésticas se encuentran seriamente amenazadas. Este descenso de las poblaciones de polinizadores, ha llevado a los investigadores a tratar de evaluar, del modo más fiable posible, las potenciales pérdidas económicas que esta tendencia podría suponer, y a estimar el grado de dependencia de la agricultura mundial de los animales polinizadores.

Los primeros intentos que se realizaron para tratar de asignar un valor monetario a los polinizadores, consistían simplemente en cuantificar el valor total de los cultivos polinizados por animales (principalmente insectos). Sin embargo, ya que la producción de los cultivos en la mayoría de los casos tan sólo se reduce en ausencia de polinizadores, un segundo método más refinado para estimar la importancia de éstos consiste en introducir un porcentaje o proporción de dependencia, que tiene en cuenta el impacto real de los polinizadores sobre la producción de los diferentes cultivos. Esta proporción de dependencia permite calcular la pérdida de producción en caso de desaparición de los polinizadores, siendo así asimilado el valor de la polinización por animales con la correspondiente pérdida del valor del cultivo. Por lo tanto, el valor monetario de la polinización por animales está directamente relacionado con las tasas de dependencia de los polinizadores estimadas para cada cultivo. Lo verdaderamente difícil es ponerse de acuerdo a la hora de precisar esos valores de dependencia de los polinizadores para los diferentes cultivos y las distintas regiones geográficas.

Gallai y colaboradores se propusieron cuantificar la pérdida económica que supondría para los 100 principales cultivos utilizados directamente en la alimentación humana la total desaparición de los insectos polinizadores. Sus cálculos se realizaron bajo el supuesto de una pérdida total de polinizadores, aunque podrían extrapolarse a cualquier nivel de disminución de polinizadores, pues existe evidencia empírica de que el rendimiento de los cultivos entomófilos (cultivos polinizados por insectos, de forma predominante o exclusiva) muestra una correspondencia lineal con la densidad de polinizadores. Estimaron que **el valor económico mundial de los insectos polinizadores en el año 2.005 fue de 153.000 millones de euros**, lo que representaba **9,5% del valor de la producción mundial agrícola** utilizada para alimentación humana en ese año. Observaron que los cultivos que mayor dependencia de los polinizadores presentan son los vegetales, los frutales y las plantaciones de especies para la extracción de aceites. También se encontraron con que el valor (por tonelada) de aquellos cultivos que no dependen de la polinización por insectos (como los cereales, la caña de azúcar o raíces y tubérculos) era, como promedio, cinco veces inferior al de aquellos cultivos dependientes de polinizadores. La tasa de vulnerabilidad (o dependencia) de la producción agrícola mundial frente a la desaparición de los



polinizadores biológicos que estimaron para ese año 2.005 (9,5%) puede parecer pequeña, pero no revela el amplio margen de valores encontrado para las diferentes categorías establecidas de cultivos. Tal y como era esperable, tanto por elevado número de especies consideradas como por la heterogeneidad existente en cuanto a la producción agrícola, la vulnerabilidad ante un descenso de polinizadores variaba también mucho entre las diferentes regiones y continentes. Sin embargo, en cada región podía encontrarse al menos una categoría de cultivo altamente dependiente de los polinizadores, con tasas de vulnerabilidad entre el 22% y el 94% [5].

Efectivamente, **no todas las especies vegetales cultivadas por el ser humano dependen de los polinizadores para su producción**. No obstante, muchas de las plantas cultivadas muestran un aumento en la producción de semillas y frutos en presencia de los polinizadores adecuados. Árboles frutales (almendros, melocotoneros, cerezos, ciruelos, manzanos, perales, etc.), leguminosas forrajeras (como la alfalfa o el trébol), cucurbitáceas (melones, pepinos, calabazas, calabacines, etc.), plantas para la extracción de aceite (como la colza o el girasol) o fibras textiles (como el lino y el algodón), son sólo algunos ejemplos de plantas que podrían resentirse por la falta de agentes polinizadores.

En los últimos años, la preocupación sobre la posible disminución de estos agentes polinizadores ha ido en aumento. En ocasiones, se habla incluso de una **"crisis a nivel mundial de los polinizadores"**. La cuestión es **¿resulta esto una exageración?** ¿o nuestra preocupación está realmente justificada?

Para algunos científicos, nuestra percepción de esta crisis de polinizadores se basa principalmente en la elevada mortalidad de colonias de abejas melíferas empleadas para polinizar diferentes cultivos en Norteamérica y en el descenso de abejorros y mariposas en Europa, mientras que en muchos otros lugares, las comunidades de polinizadores silvestres muestran respuestas mixtas frente a los cambios ambientales (es decir, en unos casos su número disminuye, pero en otros casos su número aumenta). Además, sostienen que no son tantos los cultivos de alimentos básicos para el ser humano que dependen por completo de los servicios de polinización, y que la mayoría de los que sí dependen habitualmente se plantan a pequeña escala en agroecosistemas diversificados que probablemente alberguen comunidades sanas de polinizadores silvestres, o en sistemas altamente manejados, en buena medida independientes de estos polinizadores silvestres. La pérdida de algunas especies de polinizadores no tendría por qué afectar necesariamente a la producción de los cultivos; puede que estos sean polinizados por el viento o que se autopolinicen, o quizá estos cultivos puedan hacer frente a la pérdida de algunas especies polinizadoras si existe una diversidad suficiente de polinizadores sustitutos (he aquí un buen ejemplo de la importancia de conservar la biodiversidad, pues en general, los ecosistemas más diversos son también los más estables). Por lo tanto, una disminución de polinizadores probablemente sólo causaría una crisis agrícola en aquellos cultivos que son dependientes de los polinizadores, que están limitados por la presencia de estos o que necesitan de un polinizador específico. La cuestión se complica si consideramos las consecuencias ecológicas que estos descensos de los servicios de polinización podrían acarrear; y es que la mayoría de estos polinizadores se encuentran también en la base de las cadenas tróficas de los ecosistemas terrestres, como alimento de peces, anfibios, reptiles, aves, micromamíferos, etc.

Según los razonamientos de los científicos más escépticos, aunque justificar acciones de conservación en base a un descenso en los servicios de polinización podría ser un tanto excesivo, **las iniciativas existentes para la monitorización**

**de polinizadores estan bien fundadas, dada la incertidumbre existente acerca de la dinámica poblacional de la inmensa mayoría de ellos [6].**

Esto, en lo que a la agricultura se refiere. Si nos propusiéramos adjudicar un valor económico a los animales polinizadores considerando su importancia para todas las plantas que de ellos dependen para su reproducción, muy probablemente llegaríamos a la conclusión de que esa cifra tiene un valor incalculable.

Sea como fuere, a nivel global el polinizador "doméstico" más utilizado para incrementar la producción agrícola es la abeja melífera (*Apis mellifera*), por lo que nos centraremos en este insecto, aunque otras especies de abeja se emplean en contextos específicos (como por ejemplo la abeja cortadora de hojas, *Megachile rotundata*). Otra práctica frecuente en la polinización de cultivos es el uso de abejorros (*Bombus* sp.), especialmente útiles en cultivos bajo plástico (invernaderos), o para polinizar aquellas especies vegetales donde las abejas domésticas no son eficaces, como el tomate.

### ***La abeja doméstica, un polinizador universal***

Se ha demostrado que la abeja melífera, que ha sido bien estudiada en comparación con otras especies de abejas, es capaz de incrementar la producción de los cultivos polinizados por animales hasta un 96 %. La abeja doméstica también poliniza muchas plantas silvestres, pero esta contribución no siempre está bien documentada con datos empíricos, y la contribución de los polinizadores silvestres podría ser mayor de lo que se piensa.

Para comprender por qué se considera a la abeja melífera un buen polinizador, es necesario tener en cuenta una serie de características básicas acerca de la biología de esta especie. Las abejas melíferas son insectos sociales (pertenecientes al orden *Hymenoptera*), que se agrupan en colonias muy pobladas (del orden de 60.000 abejas en una colmena tipo), que se mantienen recolectando grandes cantidades de polen y néctar principalmente y en las que existe una diferenciación de castas (reinas, obreras y zánganos) con un alto grado de organización. Como es bien sabido, las abejas melíferas emplean una peculiar danza para comunicarse unas a otras la localización del alimento, repartiendo en grupos a sus pecoreadoras (obreras recolectoras), que concentran temporalmente su trabajo en flores de la misma especie. Es decir, mientras las flores de una determinada especie vegetal están dando polen o néctar (algo para lo que cada planta requiere unas condiciones determinadas de temperatura, humedad, etc.), las pecoreadoras que se encuentran explotando esa fuente de alimento muestran una alta fidelidad por la misma, lo que aumenta considerablemente las probabilidades de éxito en términos de polinización cruzada. A esto debemos sumarle el hecho de que las colmenas de abejas melíferas, podemos transportarlas de un lugar a otro a nuestro antojo, llevarlas a un determinado cultivo cuando las plantas se encuentran en flor y transportarlas después a otros cultivos o a zonas mas propicias para su mantenimiento.

**El uso racional de colonias de abejas melíferas para la polinización de cultivos constituye una rama de la actividad apícola por sí misma**, con unas reglas que es importante conocer, por el bien tanto de los apicultores como de sus socios agricultores [8]. Las colmenas manejadas para la polinización de cultivos, normalmente son forzadas a trabajar en condiciones estresantes para la especie, teniendo que soportar procesos de carga y descarga, transportes más o menos largos, una fuerte limitación espacio-temporal del alimento (ya que en muchas ocasiones los únicos recursos florales a disposición de las abejas son los



proporcionados por el cultivo en cuestión), un exceso de tratamientos sanitarios con finalidad preventiva (con los inconvenientes que esto supone, principalmente debidos al desarrollo de resistencias), etc. Las reinas, que de forma natural duran 3-4 años en buenas condiciones, en estos casos se renuevan prácticamente cada año. Se trata de una apicultura intensiva al servicio de la alimentación humana.

Como ejemplo, podemos considerar la aportación de la abeja doméstica al cultivo del almendro, donde se recomiendan de 5 a 8 colmenas por hectárea para una buena polinización. En este caso, se ha estimado un incremento en el rendimiento de la producción de 1.000 € por cada colmena introducida.

Estados Unidos es el primer productor de almendras, acaparando el 80% de la producción mundial. Solamente en California, las plantaciones de almendros ocupan unas 300.000 hectáreas, donde son necesarias 1,5 millones de colmenas. Para hacernos una idea de la importancia que ha ido adquiriendo la polinización de cultivos: en 1.973, el valor del alquiler de una colmena en EEUU era aproximadamente de 10 €, mientras que en el 2.007 superaba ya los 100 €.

España es la segunda productora de almendras, con una superficie aproximada de 550.000 hectáreas dedicadas a su cultivo donde, según las recomendaciones de algunos expertos, serían necesarias 2.750.000 colmenas. Sin embargo, en nuestro país, en las raras ocasiones en las que el agricultor le paga al apicultor por el alquiler de las colmenas, el valor oscila entre 10-15 € por colmena.

Otros ejemplos nos llegan desde Nueva Zelanda, donde la demanda de colmenas para polinizar kiwis se ha incrementado en un 5.000% en los últimos 15 años. O desde Chile, donde se estima que se generaron entre 9 y 16 millones de dólares de ganancias gracias a la polinización por las abejas domésticas, y donde el pago por polinización constituye el 50% de los ingresos del apicultor.

Una cuestión importante y que conviene dejar clara es que la calidad y el cuajado de los frutos también mejoran considerablemente en presencia de los polinizadores adecuados, por lo que sería un error cuantificar únicamente en términos absolutos de producción los beneficios que éstos suponen para los cultivos.

### ***Factores que pueden afectar a la diversidad y abundancia de polinizadores***

Son varios los factores potenciales que afectan a la biodiversidad en general y a la abundancia y diversidad de polinizadores en particular. Además, resulta fundamental matizar que los diferentes factores ambientales raramente actúan de forma aislada; estos efectos interactivos, no aditivos, donde un factor sub-letal puede aumentar la severidad de otro factor, podrían ayudar a explicar algunos casos actuales de disminución de polinizadores, tanto silvestres como domésticos. Sin embargo, mientras aumenta la preocupación por la importancia de las interacciones entre los distintos factores, la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha han analizado el impacto de factores específicos aislados, por lo que la evidencia de los efectos interactivos es escasa.

### **Modificaciones en el uso del territorio**

La especie humana es, con diferencia, la que más altera el medio que le rodea. La consecuencia de muchas de nuestras actividades suele ser la **pérdida de hábitats o la fragmentación de los mismos**, lo que **afecta de forma desigual a los distintos taxones de polinizadores. En muchos casos esto conlleva efectos negativos sobre sus poblaciones** (se reducen sus zonas de nidificación, se eliminan sus fuentes de alimento, etc.), aunque también hay determinadas especies que pueden verse beneficiadas por nuestra proximidad.

En una revisión cuantitativa (meta-análisis) de 54 estudios sobre los efectos de diferentes tipos de perturbaciones en las comunidades de abejas, Winfree *et. al.* encontraron un efecto negativo significativo, aunque relativamente pequeño, de varios tipos de perturbaciones sobre la abundancia y riqueza de especies de abejas silvestres, de las cuales la pérdida y/o fragmentación del hábitat era la más importante. De forma similar, en un análisis sintético y cuantitativo de 23 estudios de 17 cultivos en zonas agrícolas repartidas por todo el globo, Ricketts *et. al.* encontraron un efecto negativo muy significativo de la distancia a un hábitat natural en la riqueza y abundancia de abejas silvestres. En ambas revisiones cuantitativas, no se observaron los mismos efectos en las abejas melíferas, que aparecían como especie manejada en muchos de los estudios considerados. Resumiendo, la mayoría de evidencias de estos estudios cuantitativos soportan la hipótesis de que **la pérdida de hábitats reduce la diversidad y abundancia de abejas** [7].

Sin embargo, también se han observado casos de efectos positivos de actividades como la agricultura o la urbanización sobre determinados grupos de abejas (por ejemplo las que anidan en cavidades dentro de zonas urbanas) o sobre la abundancia y riqueza de abejas. Varios factores podrían ser responsables de este efecto positivo de la conversión del hábitat, incluyendo niveles intermedios de perturbación que promueven la disponibilidad de recursos para los polinizadores a través de múltiples hábitats parciales y la introducción de nuevos recursos de forrajeo y/o anidamiento o micro-hábitats. Además, como las abejas son organismos muy móviles, ciertas especies pueden tolerar o beneficiarse de un moderado nivel de perturbación, incluyendo niveles moderados de pérdida de hábitat.

La fragmentación del hábitat también se ha postulado como un efecto negativo para las poblaciones de polinizadores silvestres, pero hasta la fecha, existen relativamente pocos estudios sobre los efectos de la fragmentación en la polinización por sí misma. Varios estudios no han encontrado un efecto del área fragmentada sobre la riqueza o abundancia general de abejas polinizadoras, aunque han detectado diferentes respuestas entre tribus o grupos, con algunos favorecidos por el aumento de hábitat original y otros favorecidos por la matriz resultante de hábitats no nativos. Otros estudios muestran un descenso de la riqueza y abundancia de especies a medida que disminuye el tamaño de los fragmentos en el caso de abejas y mariposas. Al igual que en los estudios anteriores, los resultados varían entre grupos, con un efecto severo de la fragmentación sobre la riqueza y abundancia de abejas solitarias, parasíticas y/o recolectoras de pólenes específicos (oligoléticas), y sobre las mariposas monófagas. La variación de respuesta a la fragmentación entre estudios y entre grupos dentro de cada estudio podría estar relacionada con la calidad de la matriz que rodea a los fragmentos de hábitat y con las habilidades de dispersión de los polinizadores.

Una cuestión pendiente e importante es si hay una superficie de hábitat crítica requerida para mantener poblaciones viables de polinizadores. Sin embargo, la información adicional disponible para responder a esta cuestión es escasa, ya que

la matriz rural podría proveer de recursos de anidamiento y forrajeo para los polinizadores y facilitar sus movimientos entre parches de hábitats naturales o seminaturales; las zonas urbanas, que suponen límites "duros" entre los distintos fragmentos de hábitat más o menos conservado, podrían constituir a su vez los mejores escenarios para la investigación.

Por otro lado, la biodiversidad vegetal en la mayoría de las regiones del mundo también se ha visto sometida a rápidos cambios en las últimas décadas. Allí donde se han compilado datos con suficiente calidad, la diversidad de plantas locales parece haber disminuido en la mayoría de lugares y en la mayor parte de los hábitats. Estos descensos parecen haber afectado obligatoriamente a las poblaciones de plantas polinizadas por animales (polinización cruzada), sobre todo a las que dependen por completo de los insectos como vectores para transportar el polen, lo que sugiere un descenso general de los recursos florales para los polinizadores. En el Reino Unido hay evidencias de que el 76 % de las plantas utilizadas como alimento por los abejorros disminuyeron en frecuencia entre 1.978 y 1.998. Investigaciones recientes han comenzado a relacionar estos descensos en las poblaciones de plantas con la dinámica de los polinizadores, tanto en experimentos controlados como en el campo. Si los recursos florales silvestres han disminuido, la plantación de cultivos que florecen en masa, como la colza o el girasol, podrían proporcionar unos valiosos recursos para los polinizadores. Sin embargo, estos recursos superabundantes sólo están disponibles durante períodos muy cortos de tiempo, por lo que su contribución al mantenimiento de poblaciones viables de polinizadores podría no ser muy grande.

## Utilización de productos químicos

Probablemente la mayor amenaza para los polinizadores. En la actualidad, el ser humano emplea muchas sustancias químicas sintetizadas en los laboratorios con fines muy diversos. **La mayoría de estas sustancias no se encuentran de forma natural en el medio, y en muchos casos sus efectos se desconocen.** Incluso en aquellos casos en los que sus efectos si se han estudiado, **se conoce el efecto de cada producto de forma aislada, pero no la interacción entre las sustancias liberadas,** algo mucho más complicado de predecir y cuyas consecuencias pueden ser sumamente graves.

Resulta evidente que la intensificación agrícola ha incrementado el uso de agroquímicos, cuyo resultado es una potencial degradación del hábitat dentro de esas áreas agrícolas. Pero los efectos de estos agroquímicos podrían no estar restringidos solamente a los terrenos agrícolas, ya que estas sustancias pueden colarse en hábitats seminaturales donde los polinizadores anidan y se alimentan.

Los insecticidas pueden causar mortalidad por intoxicación directa y repercutir en cambios locales en la diversidad y abundancia de los polinizadores, tanto silvestres como domésticos, mientras que herbicidas y fertilizantes pueden afectar a los polinizadores indirectamente al disminuir la disponibilidad de recursos florales. Los procedimientos de evaluación de riesgos de los pesticidas, normalmente sólo consideran los efectos sobre las abejas domésticas, a pesar de que los efectos de exposición a pesticidas varían entre los diferentes táxones de polinizadores. Por otro lado, efectos subletales de los pesticidas han demostrado tener implicaciones en la supervivencia a largo plazo de las poblaciones.

## Introducción de especies exóticas

Existe evidencia empírica de que plantas exóticas entomófilas se integran fácilmente en las redes de plantas nativas y polinizadores, y que pueden actuar como fuentes adicionales de polen y néctar. En este caso las plantas exóticas pueden amortiguar las disminuciones potenciales de néctar (y polen) originadas por las condiciones ambientales. Por lo tanto, las plantas exóticas con flores vistosas y/o grandes recompensas pueden disminuir la dependencia de los polinizadores nativos de las plantas nativas.

En Europa, una proporción importante de plantas exóticas entomófilas son especies ornamentales con largos períodos de floración, que poseen fragancias o flores vistosas y por tanto que interaccionan fácilmente con los polinizadores silvestres. Sin embargo, estos efectos positivos de las plantas exóticas podrían estar limitados a los polinizadores generalistas, y sus efectos indirectos podrían alterar las interacciones entre plantas y polinizadores nativos. Por ejemplo, el desplazamiento competitivo de los polinizadores nativos de sus hospedadores preferidos puede conducir al descenso de las poblaciones de los polinizadores nativos, particularmente de los más especializados [7].

**La introducción de polinizadores "domésticos" para la polinización de cultivos y producción de miel puede afectar a los polinizadores nativos,** bien a través de la competencia por los recursos o mediante interacción directa. Un alto nivel de solapamiento en el uso de las plantas (hasta un 90%) se documentó para el caso de la exótica *Apis mellifera* y especies nativas del género *Bombus* en USA, y hasta un 70% de solapamiento entre el exótico *Bombus terrestris* y las especies nativas del género *Bombus* en Japón, lo que indica un alto potencial de competición. Sin embargo, aun no está claro si esta competencia se produce realmente y si afecta negativamente a la viabilidad poblacional de los polinizadores nativos. Mientras que varios estudios no encuentran evidencias de efectos negativos de los polinizadores exóticos, otros muestran impacto sobre el éxito reproductivo y sobre el tamaño corporal de los polinizadores nativos. Los polinizadores exóticos también pueden provocar efectos negativos mediante dilución genética, por ejemplo, algunas subespecies de abeja melífera y varios abejorros pueden hibridar con poblaciones endémicas, erosionando de este modo la diversidad genética de las poblaciones nativas e incluso conduciendo a la extinción de subespecies locales.

Por otro lado, está comprobado que abejas exóticas introducidas pueden aumentar el riesgo de infección por patógenos, incluyendo la propagación del omnipresente ácaro *Varroa*. La infección de colonias por múltiples patógenos, y las interacciones resultantes entre patógenos y otros factores ambientales, se ha propuesto como una de las razones para el recientemente observado síndrome de despoblamiento de las colmenas. El cambio climático puede afectar a la dispersión y virulencia de plagas y patógenos, mientras que otros factores como el cambio en el uso del territorio, la carga de pesticidas o un descenso en la disponibilidad de recursos pueden incrementar la susceptibilidad de las abejas a esas plagas y patógenos, o viceversa.

Aunque se sabe poco acerca de la transferencia potencial de patógenos intra e inter-específicos en las comunidades de abejas, hay evidencias de que la extensión y el papel de los cambios de hospedador y de los patógenos compartidos ha sido subestimado. Esto es particularmente cierto en el caso de los virus de la abeja melífera, incluyendo el ampliamente extendido virus del ala deforme, el cual es capaz de replicarse dentro del ácaro que emplea como vector. Los virus de la abeja

melífera pueden afectar a múltiples especies hospedadoras, siendo probable que infecten a abejas silvestres de otros géneros que no sean el *Apis*, mientras que los virus de las abejas silvestres también podrían infectar a las abejas domésticas. En efecto, datos preliminares sugieren que la virulencia del virus de ala deforme podría ser mayor en abejorros que en su hospedador original, la abeja doméstica.

Las abejas domésticas no nativas también pueden actuar como vectores de dispersión de parásitos y enfermedades asociadas, llevando a la infección de congéneres (por ejemplo, el ácaro *Varroa* en *Apis*, *Nosema* sp. en *Bombus* y el hongo *Ascosphaera apis* en *Megachile*). Mientras la introducción de plagas (como el pequeño escarabajo de la colmena, *Aethina tumida*) y varios virus patógenos han demostrado ser una amenaza importante para las abejas, tanto domésticas como asilvestradas, sus efectos sobre los polinizadores nativos silvestres permanecen desconocidos.

En lo que a España se refiere, cabe resaltar que en el BOE nº 298 (del lunes 12 de diciembre de 2011), se publicó el **Real Decreto 1628/2011, de 14 de noviembre, por el que se regula el listado y catálogo español de especies exóticas invasoras**, donde se incluyen aquellas especies para las que se ha comprobado que existe “información científica y técnica que indique que constituyen una amenaza grave para las especies autóctonas, los hábitats o los ecosistemas, la agronomía o para los recursos económicos asociados al uso del patrimonio natural”. **La introducción de especies exóticas en los ecosistemas, tanto plantas como animales, puede ocasionar graves trastornos ecológicos en los mismos.** Una vez se han instalado en los ecosistemas, las especies exóticas consideradas invasoras a menudo son muy difíciles de erradicar, pudiendo establecerse en los mejores casos costosos planes de control poblacional. Para combatir estas amenazas, la prevención es sin duda la medida más eficaz; y en este sentido, la publicación de este decreto supone un paso adelante en la lucha contra el serio problema medioambiental (y los costes asociados) que suponen las especies invasoras.

En el mencionado *catálogo español de especies exóticas invasoras* se encuentra ya incluida la **avispa asiática** (*Vespa velutina*), una avispa de unos 3 cm de longitud, originaria de China, norte de India e Indonesia, que causa daños importantes en los colmenares y que llegó a Francia a finales del año 2.004 en un contenedor procedente de China. Su presencia ya ha sido confirmada en el País Vasco y en Cantabria.

## Cambio global

Los datos científicos nos indican que el calentamiento global es un hecho; otra cuestión, en la actualidad bastante polémica, es si este calentamiento se trata de un proceso natural o está provocado por la actividad humana. Lo que si se está constatando es que **este aumento de temperatura puede ocasionar el adelanto del período de reproducción en muchas especies, tanto animales como vegetales.** En el caso de los vegetales, además de florecer cada vez primero, también comienzan a ser habituales las floraciones anómalas en otoño.

La mayoría de investigaciones acerca del impacto del cambio climático sobre los polinizadores se han realizado con mariposas, siendo escasos los estudios con otros polinizadores. El cambio climático reciente ha afectado ya a las distribución de las mariposas, y los cambios futuros, que se predice serán de mayores dimensiones que los cambios históricamente más recientes, es probable que tengan incluso



mayores consecuencias. Estos patrones concuerdan con los pocos estudios realizados con abejas.

Los efectos del cambio climático tienen lugar a todos los niveles de organización, desde el nivel individual (por ejemplo cambiando la actividad temporal de las abejas) hasta la genética de poblaciones (cambios evolutivos en mariposas), cambios a nivel de especie (cambios fenológicos, descensos de abejorros debidos a un nicho climático más estrecho, o extinciones locales o regionales de algunas especies de mariposas), pasando por cambios a nivel de comunidad (funcionamiento y composición cambiante de las comunidades de polinizadores). Además de estos impactos directos, efectos indirectos, que se producen cuando el cambio climático afecta a especies que están interactuando, podrían ser igualmente importantes aunque están muy poco estudiados.

Como no todas las especies responden igual ante estos cambios climáticos, **si se produjera un desacoplamiento entre los ciclos de vida de las plantas y sus polinizadores, los servicios de polinización animal podrían verse gravemente comprometidos en los ecosistemas.** Y esto sería tan sólo una parte de un problema de dimensiones mucho mayores; además de afectar directamente a la distribución de las especies, se prevé también una influencia de este cambio de temperaturas en otros aspectos del ciclo biológico de los organismos, como puede ser la alteración de hábitos migratorios, un desajuste de las interacciones presa- depredador, planta - dispersor de semillas, etc.

Como ya se adelantaba al inicio de este capítulo, todos estos factores descritos actúan de forma simultánea y podrían actuar sinérgicamente sobre las comunidades de polinizadores. Dicho de otro modo, dos o más factores que actuando por separado pueden resultar nocivos pero no letales, cuando actúan simultáneamente pueden incrementar exponencialmente sus efectos, afectando a las poblaciones de polinizadores, tanto silvestres como domésticos. Pero a pesar de la importancia que podrían tener estas interacciones, la mayoría de estudios realizados hasta la fecha sobre los efectos de múltiples factores tienen un alcance relativamente limitado. Sería conveniente comenzar a considerar los múltiples factores de forma simultánea, si queremos comprender como responderan los polinizadores y las plantas polinizadas por animales ante el cambio global. Y uno de los nuevos factores que probablemente habrá que tener en cuenta en el futuro a la hora de realizar este tipo de estudios, es la producción de cultivos transgénicos; esto es algo cada vez más frecuente pero, ¿qué efectos tienen estos transgénicos sobre los polinizadores?. De nuevo, uno de los pocos acercamientos al estudio del efecto combinado de varios factores se está realizando con las abejas domésticas.