

Nephila clavipes



Los Milagros de la Seda

Luis Fernández de Castro Díaz

ÍNDICE

ÍNDICE	Pág.1
GENERALIDADES	Pág.2
Distribución y Hábitat	Pág.2
Anatomía	Pág.3
Relaciones intra e interespecíficas	Pág.5
Filogenia y taxonomía	Pág.5
Reproducción y ciclo de vida	Pág.7
Alimentación	Pág.8
COMPORTAMIENTO	Pág.9
Construcción de la red	Pág.9
De defensa	Pág.11
Caza	Pág.12
Copulatorio	Pág.13
INTERÉS PARA EL HOMBRE	Pág.15
Secreción de seda en arácnidos	Pág.15
Estructura molecular y propiedades mecánicas de la seda	Pág.16
Explotación y biotecnología de la seda	Pág.17
Algunas aplicaciones de la seda	Pág.19
VÍDEOS	Pág. 19
AGRADECIMIENTOS	Pág. 20
BIBLIOGRAFÍA	Pág. 20



Fig. 1: *Nephila clavipes* hembra domesticada del Laboratorio de Bimateriales de Dr. Mike Ellison (University of Clemson)

GENERALIDADES

Nephila clavipes o la araña de seda dorada (llamada así por el brillo característico de su red) es un organismo que en los últimos años ha ido ganando interés para su uso por el hombre, aunque tradicionalmente ha sido una especie muy estudiada ya que presenta algunas llamativas pautas de comportamiento y es en sí mismo un organismo muy atractivo, debido a su tamaño y aspecto y a que exhibe una de las mayores redes conocidas, de entre uno y dos metros de lado, que además es de intrincado diseño. Ya en 1835 la describe Darwin bajo el género erróneo *Epeira* en “El viaje del Beagle”, donde incluye una descripción de su peculiar comportamiento de defensa.

Estudios recientes le dan un valor añadido a la seda que produce, ya que es el material fibroso de mayor resistencia que se conoce. Debido a esto, el interés por esta especie ha adquirido nuevos tintes económicos, dejando de estar restringido a lo puramente académico.

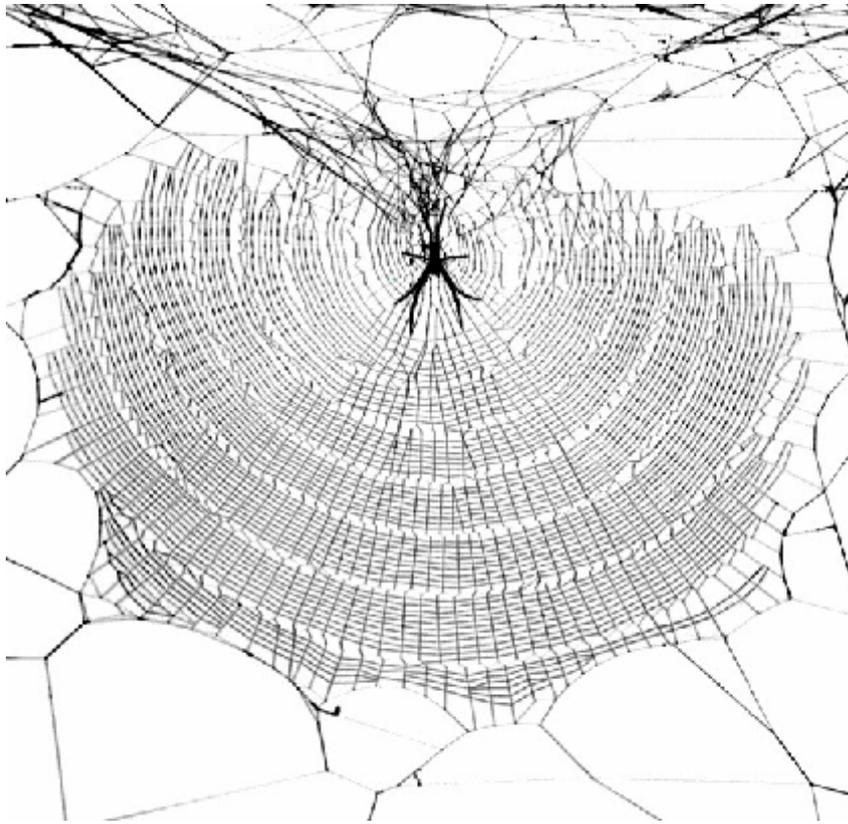


Fig. 2: Red de *Nephila clavipes* (Samuel Zschokke, University of Basel).

De esta forma, empresas biotecnológicas de primera línea como DuPont o Nexia han adquirido un rápido interés por la seda que produce, invirtiendo grandes cantidades de dinero en estudios para rentabilizar su explotación.

¿Qué hace de esta seda un material tan interesante? Es más resistente, ligera y elástica que el Kevlar y el acero de alta tensión. Puede ser útil para campos tan diversos como la medicina (nuevas fibras biodegradables y biocompatibles), deporte (tejidos más ligeros para utilizarlos en paracaídas, velámenes de barcos...), defensa (chalecos antibalas más ligeros y resistentes), etc.

Distribución y Hábitat

Se distribuye fundamentalmente en áreas neotropicales del continente americano, incluyendo el Caribe, Centroamérica, parte de Norteamérica y casi toda Sudamérica (*fig. 3*), abundando especialmente en la isla de Puerto Rico (Vargas 1997).

Se suelen asentar en medios húmedos pero relativamente abiertos de los bosques, normalmente en las lindes, junto a los senderos o en los pasos de agua, donde disponen de espacio suficiente para tejer sus grandes redes sobre el estrato herbáceo, lugares de mayor afluencia de insectos voladores (Vargas 1997). El macho habita solitario o en pequeños grupos en la periferia de las redes tejidas por las hembras, alimentándose de los pequeños insectos que no son consumidos por ella.



Fig. 3: Distribución de *Nephila clavipes*.

Anatomía de *Nephila clavipes*

La hembra de *N. clavipes* mide entre 23 y 40 mm y se caracteriza por presentar un opistosoma cilíndrico y alargado de color anaranjado con puntos amarillos. El prosoma es plateado, y las patas poseen bandas amarillas y marrones, con mechones de pelos en el extremo distal de la tibia y el fémur de los pares I, II y IV (*fig.4*).

El macho sin embargo es poco llamativo. Mide entre 4 y 8 mm y es de color marronoso, pasando normalmente desapercibido (*fig.6*).

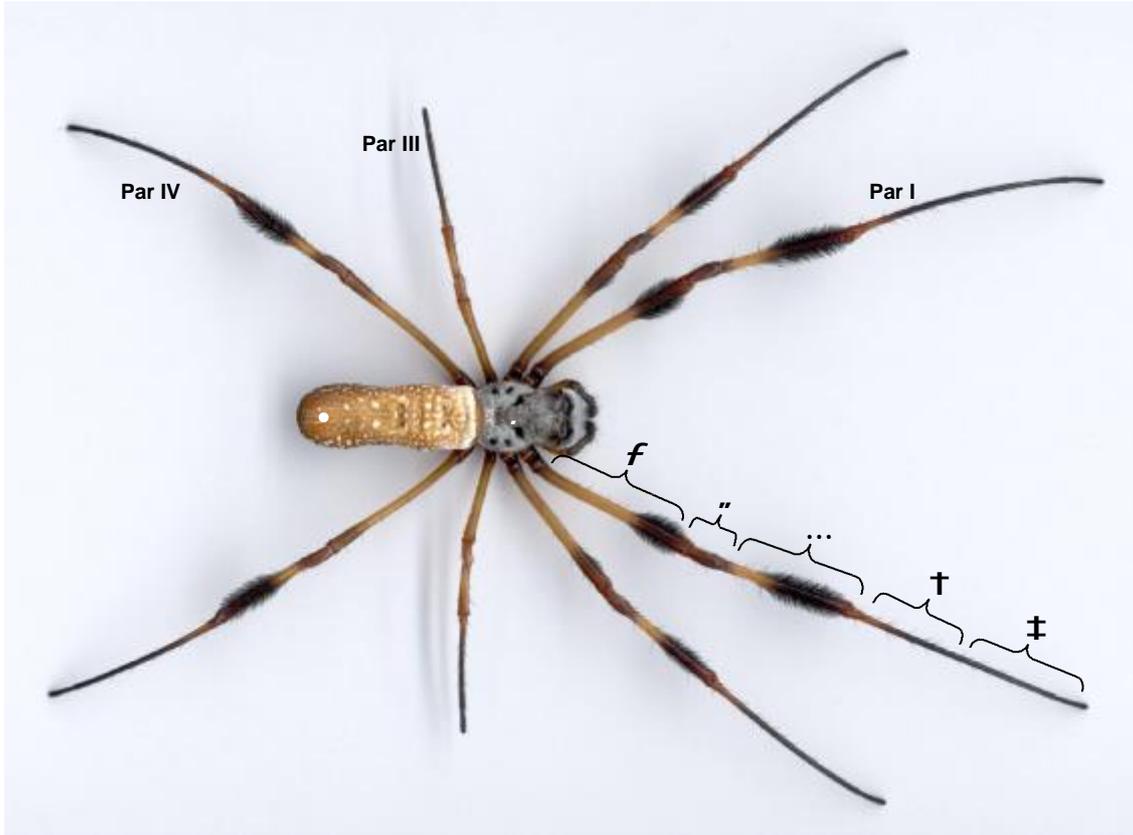


Fig. 4: Anatomía de *Nephila clavipes*. Vista dorsal. •.- Opistosoma, ,.- Prosoma, *f*.- Fémur, „.- Patela,- Tibia, †.- Metatarso, ‡.- Tarso. (www.floridanature.org).



Fig. 5: Anatomía de *Nephila clavipes*. Vista ventral. •.- Pedipalpos, ,.- Pulmón en libro, *f*.- Labium. (www.floridanature.org).



Fig. 6: Dimorfismo sexual. (C. Frank Starmer).

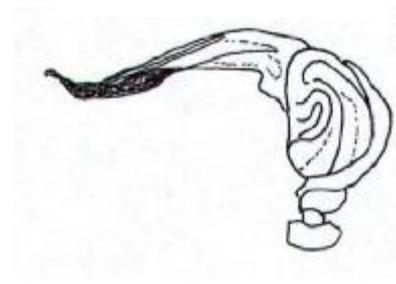


Fig. 7: Detalle del pedipalpo del macho. (C. Frank Starmer).

Relaciones intra e interespecíficas

Nephila clavipes es una especie fundamentalmente solitaria. Sus relaciones intraespecíficas se limitan a las mencionadas entre machos y hembras, “parasitando” el macho la red de la hembra. Los encuentros entre hembras son infrecuentes, aunque se han observado en algunas ocasiones agregados de telas, en ocasiones de alta abundancia de insectos y en las regiones más tropicales de su distribución geográfica. Esto se debe a que la captura de presas es mayor en estas asociaciones (Ann Lundie Rypstra, 1985).

Como predadores naturales, *Nephila* es atacada fundamentalmente por pájaros, arañas aracnófagas como *Peucetia tranquillini* (Gonzaga, M., 1998) y avispas asesinas como *Poecilopompilus mixtus* y *Trypoxolon* sp. (G. W. Uetz et al, 2002).

Nephila posee además una especie kleptoparásita de su red. *Argyrodes fissifrons* es una pequeña araña que habita en las proximidades de la red robando las presas de menor tamaño que no han sido capturadas por *Nephila* o bien las presas que permanecen empaquetadas a la espera de ser consumidas (K. Tanaka, 1984).

Filogenia y taxonomía de *Nephila clavipes*

Desde su descripción por Linneo en 1767, el género *Nephila* ha pertenecido a diversos grupos dentro de la superfamilia Araneidea.

En 1815 se estableció la subfamilia Nephilinae formada únicamente por este género, que fue incluida primero en la familia Argiopidae, inexistente ahora (Simon, 1894), y en la familia Araneidae después (Roewer, 1942).

En 1980, Levi descartó el grupo Nephilinae e incluyó el género *Nephila* en la subfamilia de Araneidae Metinae (también desaparecida) aunque no descartó que pudiese pertenecer a un subgrupo o subfamilia propia. Más tarde, en 1989, Levi y Eickstedt descubrieron en el género ciertos caracteres apomórficos en los pedipalpos (*fig.5*) que lo ligaban a la familia Tetragnátidae, en la que ha permanecido hasta los últimos años (*fig. 8*).

En 2004, un estudio basado en las secuencias de los genes para ARNr y MaSp1 (proteína de la seda) acercan al género a la familia Araneidae (Pan Hong-Chun et al, 2004), aunque con suficientes diferencias como para formar una subfamilia propia (*fig. 9*). Esta conclusión está secundada con caracteres morfológicos propios por un lado, tales como un labium más largo que ancho, surcos transversales en las cubiertas del pulmón y un metatarso y tarso más largos que la patela y la tibia (*figs.4 y 5*), y caracteres comunes o sinapomorfías con la familia Araneidae por otro, como la estructura del órgano palpal del macho (*fig. 7*) y un marcado dimorfismo sexual (*fig. 6*). De apoyarse estos datos, el género *Nephila* estaría incluido dentro de una subfamilia Nephilinae de nuevo perteneciente a su vez a la familia Araneidae.

El género *Nephila* está formado por más de 50 especies, siendo las más comunes: *N. antipodiana*, *N. clavata*, *N. inaurata*, *N. maculata*, *N. senegalensis*, *N. pilipes* y *N. clavipes* (*fig.8*).

La especie *Nephila clavipes* está formada por tres subespecies: *N. clavipes*, *N. clavipes fasciculata* y *N. clavipes vespucea* que incluyen más de 40 variedades (Norman I. Platnick et al, 2000).

Reino	Filo	Subfilo	Clase	Orden	Suborden	Superfamilia	Familia	Género	Especie
Metazoa	Arthropoda	Chelicerata	Aracnida	Araneae	Mesothelae Mygalomorphae Araneomorphae	Eresoidea Orbicularia Dysderoidea Araneoidea	Araneidae Cyatholipidae Linyphiidae Mysmenidae Nesticidae Pimoidae Synotaxidae Theridiidae Theridiosomatidae Tetragnathidae	<i>Leucauge</i> <i>Meta</i> <i>Tetragnatha</i> <i>Nephila</i>	

Fig. 8: Árbol taxonómico de *Nephila clavipes* (NCBI taxonomy browser).

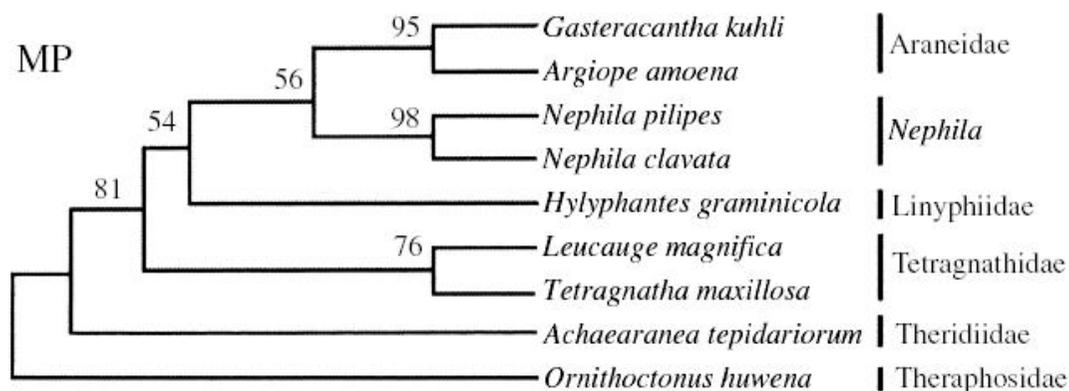


Fig. 9: Análisis filogenético de máxima parsimonia (MP) del género *Nephila* (Pan Hong-Chun et al, 2004).

- N. antipodiana*
- N. clavata*
- N. inaurata*
- N. maculata*
- N. senegalensis*
- N. pilipes*
- N. clavipes*

Reproducción y ciclo de vida de *Nephila clavipes*

En las regiones templadas de Norteamérica, *Nephila clavipes* tiene un ciclo de vida de un año, aunque esto puede variar en regiones más meridionales y en condiciones de cautividad. La madurez sexual de las hembras se da en Agosto, mientras que los machos son maduros desde Julio. Hasta llegar a la madurez, *N. clavipes* pasa por varias mudas, siendo receptiva la hembra tras la última muda durante 48 h, ya que la cutícula no se ha endurecido aún y permite la cópula (S.G. Brown, 1985).

En arácnidos, el macho introduce el semen en un pequeño paquete de seda, que es introducido con el órgano palpal en el epiginio de la hembra.

Una vez finalizada la cópula, la hembra puede conservar el semen del macho durante prolongados periodos de tiempo en las espermatecas. Normalmente la hembra realiza varias cópulas con machos distintos, depositando los huevos 27 días después de la última muda. La puesta consiste en al menos dos sacos (mayor número en regiones más tropicales) con cientos de huevos en un lugar protegido y cercano a la red (*fig. 10*).



Fig. 10: Saco de huevos de *Nephila clavipes* (www.floridanature.org).

Fig. 11: Eclósión de los huevos (C. Frank Starmer).

Alimentación

N. clavipes se alimenta de pequeños insectos en su mayoría voladores entre los que se distinguen saltamontes, mariposas, polillas y moscas que quedan atrapados en su red. Cuando un insecto entra en contacto con la red, la araña acude rápidamente y lo envuelve en un saco de seda que es consumida de inmediato inyectándole un fluido digestivo o bien almacenada suspendida de un hilo en la parte más alta de la red, junto al centro, para ser consumida horas más tarde.



Fig. 12: Comida almacenada en la red *Nephila clavipes* (C. Frank Starmer).

COMPORTAMIENTO

Construcción de la red

El tipo de red que fabrica *Nephila* es la conocida en inglés como orb-web. Se trata de una red de dos dimensiones orientada normalmente en el plano vertical para aumentar las probabilidades de incidencia de insectos voladores. Es la de mayor tamaño conocida de este tipo, con uno o dos metros de lado. Está construida normalmente sobre dos soportes que pueden ser dos arbustos o árboles situados a esta distancia.

Algunas propiedades mecánicas de las redes “orb-webs” (Zschokke S., 2000):

Evolutivamente, la selección natural ha favorecido en las arañas que las redes ocupen el mayor espacio posible con el menor gasto de seda, de forma que la estructura más eficiente de la red sería una cuadrícula (como las redes de pescar).

Sin embargo, su estructura es orbicular, con un centro en el que confluyen múltiples radios y varias circunferencias concéntricas de seda. La explicación para esto es que la araña se sitúa en el centro de la red para recibir las vibraciones del insecto cuando topa con la red, que son transferidas por los radios, transmitiéndole rápidamente información acerca de donde se encuentra la presa y su tamaño así como si se trata de un depredador. Así, la araña puede acudir rápidamente a cazarlo o bien iniciar su estrategia de defensa.

Para que una red sea eficiente, ha de cumplir dos objetivos: detener al insecto que se topa con ella e impedir que se escape. Para ello, una red está constituida fundamentalmente por dos tipos de seda: una más dura con función de soporte y otra más fina y pegajosa que permite que los insectos se queden adheridos. La seda dura forma la periferia de la red y los radios que confluyen en el centro, donde se sitúa la araña. La seda pegajosa une estos radios en círculos concéntricos y no posee funciones estructurales.

Cuando una presa golpea la red, genera una fuerza centrípeta que actúa sobre los radios de soporte de la red. Para absorber el impacto, los puntos de soporte de la red adoptan una forma en arco invertido que posteriormente ha sido imitada por el hombre para el cableado de raíles (fig. 14).

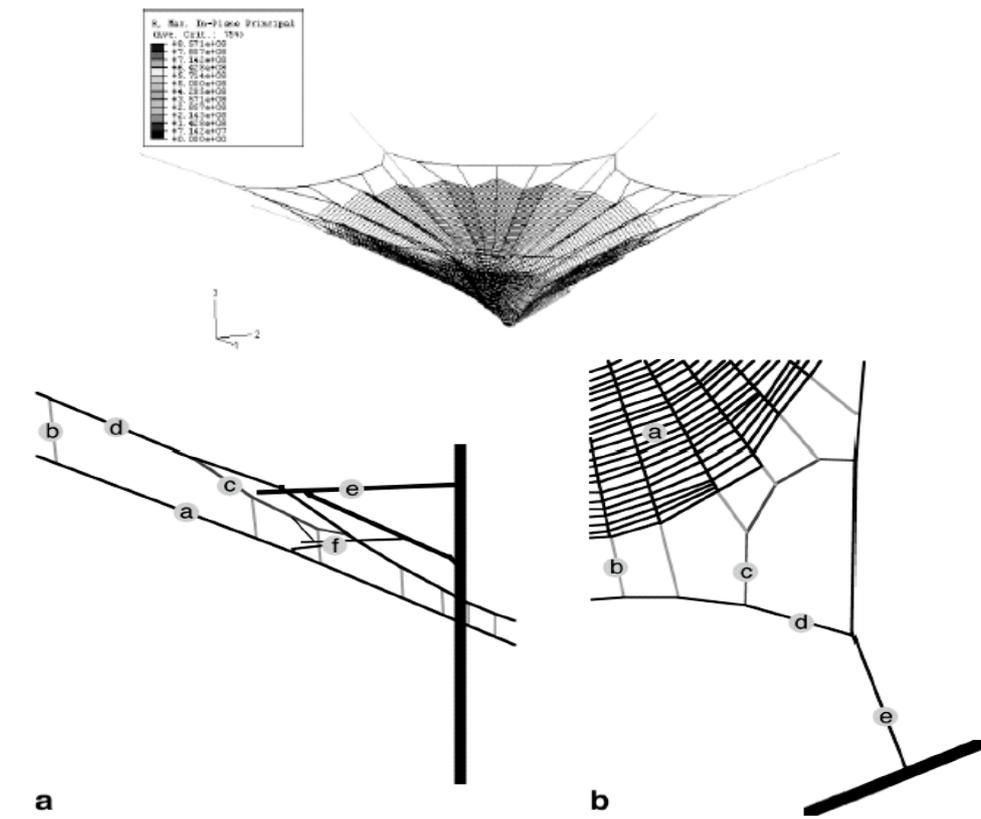


Fig. 13: Modelo informatizado de la distribución del estrés sobre la red cuando un insecto la golpea (Frank K. Ko y Jovan Jovicic, 2004).

Fig 14:(a) Cableado de tren de alta velocidad. (b) punto de soporte de una tela de araña. a) zona de impacto, b) parte exterior del radio, c) fibra auxiliar en arco, d) fibra mensajera del impacto, e) fibra de soporte. (Zschokke, S. 2000).

Etapas en la construcción de la red:

1) Exploración: La primera fase en la construcción de una red consiste en la exploración del lugar donde se va a construir la red. Tras esta fase quedan una serie de fibras marcando la periferia de la red. En la parte superior de la red la araña dispone varias fibras formando un haz que servirá de sostén al resto de la estructura. En esta fase se forman los radios o vientos que sujetarán toda la estructura al soporte físico sobre la que esta dispuesta. Posteriormente serán reforzados (*fig. 19, rojo*).

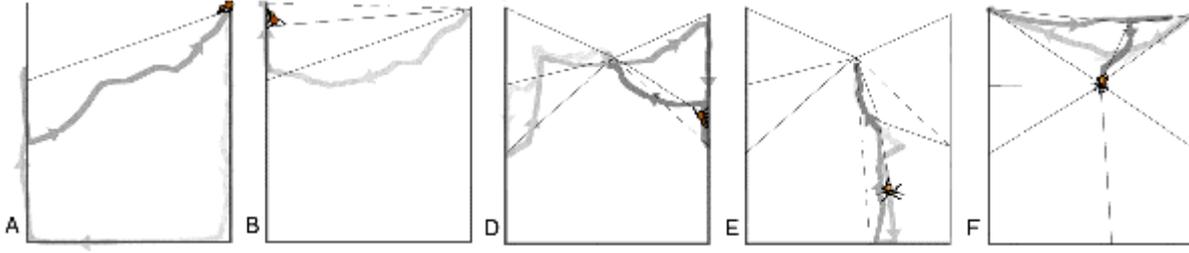


Fig. 15: Fase de exploración (Samuel Zschokke, University of Basel)

2) Disposición de los radios: En esta fase, se disponen los radios que unen la periferia con el centro. En *Nephila*, el centro de la red está desplazado hacia su parte superior (no mostrado en el dibujo). Este hecho se puede deber a que la araña tiene mayor facilidad para desplazarse en dirección al suelo que en sentido contrario, de forma que situándose en el centro de la red, alcanzará en un menor tiempo a un insecto que tope con la red si éste se encuentra desplazado hacia arriba. Otra posible explicación es que la araña no está de esta forma situada en el centro geométrico de la red, donde podría ser avistada por las presas con mayor facilidad (*fig. 19, amarillo*) (S. N. Gorb, 1998).

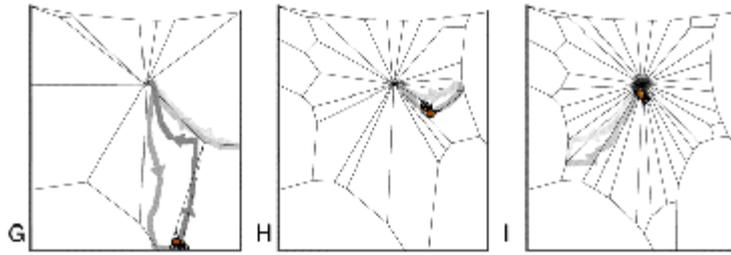


Fig. 16: Disposición de los radios (Samuel Zschokke, University of Basel).

3) Disposición de las fibras auxiliares: En esta fase no común a todas las arañas, se crean anillos concéntricos separados por 1-2 cm. desde los más periféricos se generaran nuevos radios auxiliares que no conectan con el centro de la red (no mostrado en el dibujo) (ver video 1). El motivo de estos radios es no dejar huecos demasiado grandes en las zonas distales de la red, a través de los cuales podrían pasar las presas (*fig. 19, blanco*).

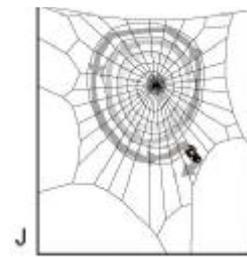


Fig. 17: Disposición de las fibras auxiliares

4) Construcción de la espiral pegajosa: La araña emplea para esto una seda más viscosa y elástica que la de soporte. Comienza por la periferia, y cuando topa con la fibra que delimita la red da la vuelta y continua en sentido contrario (ver video 2), formando una

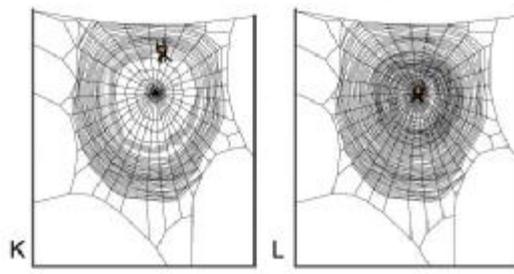


Fig. 18: Construcción de la espiral pegajosa. (Samuel Zschokke, University of Basel)

fibra paralela a la anterior. Así prosigue hasta llegar hasta el centro (*fig. 19, azul*)

5) Mantenimiento: Cada día *Nephila* destruye los radios pegajosos de la mitad de la red (izquierda y derecha alternativamente) y los vuelve a fabricar (ver video 3). Esto se debe a que la seda va perdiendo propiedades adhesivas cada día, además de enredarse con el viento, o llenarse de restos orgánicos que la harían visible a las presas. La seda retirada es ingerida por la araña, que recupera así los aminoácidos.

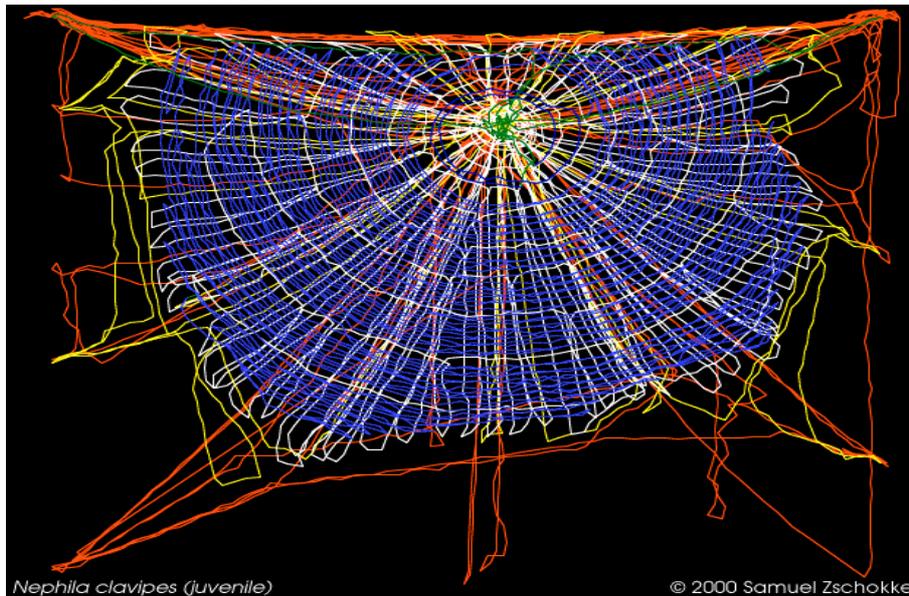


Fig. 19: Fases de construcción en una red real de *Nephila clavipes* (Samuel Zschokke, University of Basel). **Rojo**: parte final de la fase de exploración, **amarillo**: radios, **blanco**: fibras auxiliares, **azul**: fibras pegajosas.

Defensa

Nephila clavipes presenta una original respuesta de defensa. Cuando es perturbada la red con un estímulo fuerte o bien con ciertos estímulos tipificados, tales como el batir de las alas a 95 Hz. de *Poecilopompilus mixtus* y *Trypoxolon* sp, avispas predatoras (G. W. Uetz *et al*, 2002), la araña comienza un “baile” consistente en anclar las 8 patas a la red y mover el cuerpo de izquierda a derecha a alta frecuencia (15-30 Hz) si se trata de un juvenil (ver video 4) y a frecuencias algo menores en el caso de las hembras adultas (4-6 Hz), debido a su mayor masa (ver video 5). Este movimiento está acompañado con un desplazamiento lateral de la araña a lo largo de un hilo de la tela a gran velocidad cada cierto tiempo (2 ó 3 s.).

Este comportamiento ha sido observado en más ocasiones en especies de arañas coloniales y es conocido como el “efecto de aviso temprano” (“early warning effect”) por el cual las arañas amenazadas avisan a las demás de la presencia del predador transmitiendo la vibración a través de la red (G. W. Uetz *et al*, 2002).

Pero nuestra araña es una especie eminentemente solitaria, así que ¿cuál es la función de este comportamiento en arañas solitarias?. Ciertos investigadores (ente ellos Darwin, *texto 1*) opinan que es una estrategia para

confundir al predador de la localización de la araña, de forma que no sabe hacia donde atacar.

“Por el contrario, si el suelo está desnudo, la *Epeira* rara vez se deja caer, sino que pasa con rapidez de un lado al otro de la tela por un paso central que existe al efecto. Si se la vuelve a molestar, se entrega a una curiosa maniobra: puesta en el centro de la tela, que está sujeta a ramas elásticas, la agita con violencia hasta que adquiere un movimiento vibratorio tan rápido que llega a hacerse invisible el cuerpo de la araña.”

Texto 1: Extraído de “El viaje del Beagle”, Capítulo II, “Artificios de una *Epeira*”

Nephila clavipes además presenta otro comportamiento defensivo cuando el estímulo se aplica sobre su cuerpo en vez de sobre la tela (lo cual indica una amenaza mucho más inminente) que consiste en dejarse caer de la tela para buscar refugio en el suelo. En muchas de las ocasiones en que muestran este comportamiento, abandonan su red y comienzan a construir otra en una localización distinta (Linden Higgins, 1991).

Caza

Mientras ninguna presa impacte contra la red, la araña permanece en posición de espera, situándose en el centro de la red. Cuando permanece en esta postura, está fijada a la red en varios puntos por una fibra de seda de seguridad especial llamada en inglés “dragline”. La secuencia comportamental de *Nephila* durante la caza es la siguiente (ver video):

- 1) Reconocimiento y localización de la presa.
- 2) Giro y carrera hacia la presa.
- 3) Captura de la presa, picadura y extracción de la red.
- 4) Vuelta al centro de la red portando la presa.
- 5) Enrollamiento de la presa en un saco de seda y fijación a la red.
- 6) Rotación en el centro de la red generando nuevos puntos de seguridad.
- 7) La araña puede permanecer así o bien comenzar a masticar e ingerir la presa.



Fig 20: Fases en la caza: a) Captura y picadura de la presa. b) Envuelta en seda. c) Espera en el centro de la red, con la presa suspendida.

El tiempo de duración de todo el proceso es de aproximadamente 80 s., aunque la etapa de aproximación a la presa ocurre a alta velocidad (0,7 s. los primeros 10 cm.). La función de la seda “dragline” parece ser fundamental, ya que permite a la araña adoptar una postura correcta durante la espera y es usada como freno para finalizar la carrera. Para volver al centro de la red con la presa, trepan a lo largo de esta fibra (S. N. Gorb, 1998).

Nephila clavipes parece además poseer una memoria acerca de la localización, tamaño y frescura de las presas almacenadas (R. L. Rodríguez S., 2000).

En el caso de los machos, se alimentan de presas demasiado pequeñas como para ser consumidas por la hembra.

Cópula

Al contrario de lo que ocurre en muchas otras arañas, la predación de la hembra sobre los machos es infrecuente en esta especie. En cualquier caso, la aproximación de los machos a la hembra es cauteloso: tratan de no pasar por la zona de caza de la red y procuran permanecer siempre por detrás de la hembra evitando el enfrentamiento frontal (*fig. 21.a1 y a2*).

Dos o tres días antes de la última muda, la hembra descuida el mantenimiento y limpieza de la red. La cópula se da durante las 48 h. después de la última muda, ya que la cutícula blanda le permite hacer movimientos rápidos. También se han observado cópulas después de la última muda, durante la etapa adulta de la hembra, mientras se está alimentando, esta fertilidad posterior se debe probablemente a la posibilidad de que la hembra llegue a la última muda sin la presencia de machos en la red, por lo que conviene que se mantenga fértil durante el resto de su etapa adulta. Se han observado también algunas cópulas durante la etapa juvenil de la hembra, aunque no son exitosas ya que las espermatecas no se encuentran desarrolladas (S.G. Brown, 1985).

La hembra suele copular varias veces con varios machos, aunque no se encuentra una explicación concluyente para esto, ya que con una sola cópula existen suficientes reservas de semen para fecundar todos los huevos, que además puede permanecer viable en las espermatecas durante meses. T. E. Christenson *et al* (1985) explican esto con la teoría de que el rechazo de la hembra a los machos supone un mayor gasto energético por su parte que permitir la cópula.

Por la estructura interna de las espermatecas, la descendencia en la mayoría de los casos procede del primer macho con el que la hembra copuló (T. E. Christenson *et al*, 1985).

El comportamiento copulativo comienza con la aproximación del macho por detrás de la hembra. Previamente el macho ha transferido el esperma desde los testículos en un paquete de seda hasta los pedipalpos, especializados para la cópula.

Cuando se aproxima para copular, produce ciertas vibraciones con el opistosoma. En otras especies se ha observado este comportamiento como ciertas señales por parte del macho para inhibir el ataque de la hembra. Cuando el macho alcanza a la hembra, tamborilea primero con el par I de patas y luego con los pedipalpos sobre el epiginio de la hembra para estimularla

(fig21.b). Cuando la hembra está excitada, se produce un cambio de forma en el epigino que permite al macho introducir los pedipalpos, depositando el esperma en las espermatotecas (fig21.c)..

El comportamiento del macho durante la cópula difiere ligeramente si esta se produce justo después de la muda o durante la alimentación de la hembra (en la etapa adulta). En el segundo caso esta es más prolongada. Este hecho se puede explicar por la mayor dureza de la cutícula en el caso de cópula durante la alimentación o por una posible ausencia de feromonas locales en el epiginio (S.G. Brown, 1985).

Al parecer el pequeño tamaño de los machos está seleccionado positivamente, ya que los machos de menor tamaño llevan a cabo la inseminación de una forma más efectiva (J. M. Schneider, *et all*, 2000).

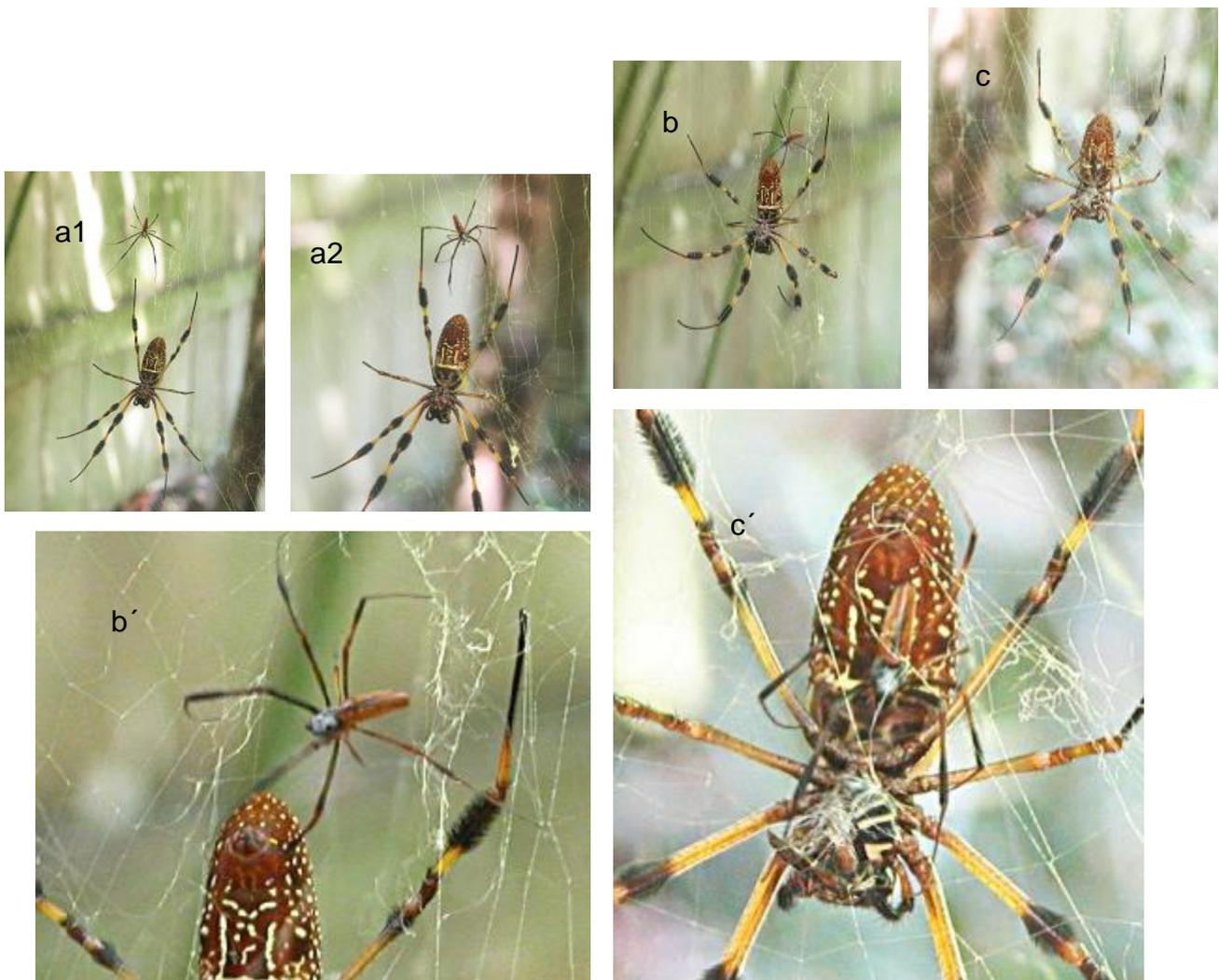


Fig. 21: Comportamiento de copula de *Nephila clavipes* mientras la hembra se está alimentando. a1 y a2) Aproximación del macho. b) Estimulación del macho a la hembra (b' detalle). c) cópula (c' detalle). (C. Frank Starmer).

INTERÉS PARA EL HOMBRE

Secreción de seda en arácnidos

La secreción de seda en arácnidos se da en un órgano situado en la zona ventral del opistosoma denominado compuesto por 3 pares de espinaretas y una vestigial (*fig. 22*). En su interior podemos encontrar 5 glándulas, especializada cada una en un tipo distinto de seda (*fig. 23*).

- Glándulas Ampulácea mayor y menor: Produce la seda “dragline” de la araña, la de mayor interés para el hombre debido a sus propiedades físicas. Esta seda es sobre la que se cuelga la araña y la utilizada para formar los radios y las fibras accesorias de la tela.
- Glándula piriforme: Es la que produce los hilos de conexión, para “atar” unas fibras a otras.
- Glándula Aciniforme: Produce la seda utilizada para envolver e inmovilizar a la presa.
- Glándula tubuliforme: Su seda se utiliza para envolver los huevos.

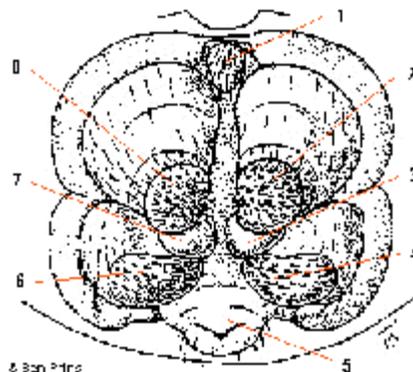


Fig. 22: 1) Colulus, espinareta vestigial. 2-4) y 6-7) Pares de espinaretas. 5) Ano. (Bill Amos, 1971)

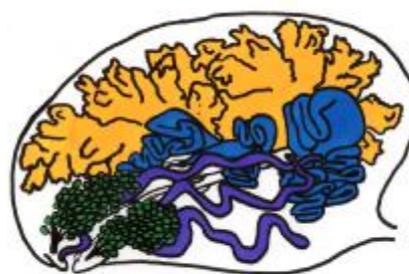


Fig. 23: Naranja: Glándula piriforme. Azul: Glándulas Ampuláceas mayor y menor. Morado: Glándula tubuliforme. Verde: Glándulas Aciniformes.

La secreción de estas glándulas es una sustancia viscosa, ya que las proteínas de la seda (epidroina I y II) se encuentran en estado globular, disueltas en un medio acuoso. A medida que salen del conducto de la glándula, van polimerizando con enlaces no covalentes, adoptando un estado semicristalino en forma de hojas β . Cuando la seda sale por las espinaretas ya ha perdido todo el agua, y las proteínas están asociadas entre ellas.

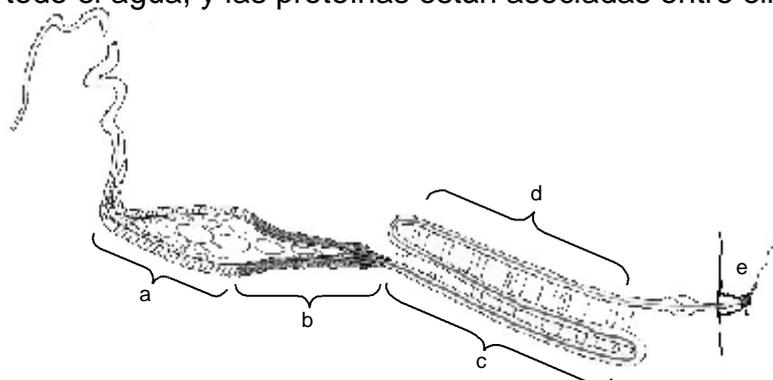


Fig. 24: Esquema interno de la glándula Ampulácea mayor. a) Zona de secreción de espidroina I y II, que constituyen el corazón de la fibra. b) zona de secreción de proteínas ácidas que disparan la polimerización de espidroina. También se secretan aquí carbohidratos y peroxidasa que cubren la fibra. c) Este bucle en el túbulo está para retirar agua, de un modo similar a la nefrona, potenciando la polimerización. d) La parte proximal de este túbulo secreta H^+ ; la parte distal está dedicada a la secreción de una cobertura de lípidos. e) Salida a la espinareta: seda “drawline” perfectamente ensamblada. (BAM: Biomimetic Advanced Materials)

Estructura molecular y propiedades mecánicas de la seda

Los estudios acerca de las propiedades físicas de la seda la colocan a la cabeza de los materiales fibrosos de resistencia, ya que es cuatro veces más dura que el acero con relación a su densidad y absorbe los impactos cuatro veces mejor que el Kevlar. La seda "dragline" es capaz de deformarse hasta un 30% de su longitud, cosa imposible con ningún material de su misma capacidad para soportar tensiones (*fig 24*). Según Vivienne Li, de la Universidad de Bristol, un hilo de seda de este tipo del grosor de un lápiz podría detener a un Boeing 747 en pleno vuelo.

Estructuralmente, la seda de araña es un material relativamente simple. Está formado por dos proteínas, análogas a la fibroína (familia de proteínas descubierta en la seda de los gusanos), la fibroína I y II. Ambas son de gran peso molecular (en torno a los 250 kDa), y están compuestas fundamentalmente por Glicina (42%) y Alanina (25%), además de otros aminoácidos como Glutamina, Leucina, Serina, Valina, Prolina, Tirosina y Arginina. La principal diferencia entre ambas isoproteínas es su contenido en Prolina y Tirosina.

Las especiales características de elasticidad y resistencia de la seda se la aporta la disposición de sus aminoácidos.

La espidroína contiene muchas repeticiones en tandem de secuencias de 5 aminoácidos ricas en Glicina, seguidas de un giro de 180°. Esto provoca que se agrupen en motivos de hojas β separadas por regiones de polialanina, formando entre ellas una espiral. Mientras más motivos β se encuentren en la fibra, mayor es su elasticidad, siendo llamativo el caso de la seda viscosa (de captura), que puede llegar a estirarse hasta 4 veces su tamaño original (frente al 30% de extensibilidad de la fibra "dragline").

Cuando la seda está solubilizada, las moléculas de espidroína están en libre movimiento, pero mantienen entre ellas cierto orden permaneciendo paralelas con respecto al eje mayor. Cuando este fluido baja a través de la glándula, la fibroína es activada, estableciéndose puentes de hidrógeno entre las regiones de polialanina, dando lugar a una estructura pseudocristalina muy estable. Esta asociación en paralelo de las largas subunidades que forman la fibra es la que le confiere alta resistencia a tensiones. No es casualidad que la mayor parte de la proteína esté formada por alanina y glicina, aminoácidos muy simples que no presentan impedimentos estéricos para la polimerización. Al establecerse estas uniones, la proteína se vuelve hidrofóbica, expulsando el agua que contenía y protegiendo así los motivos en hoja β .

De esta forma, se podría decir que la seda de la araña es un material formado por una estructura cristalina (los enlaces entre polialaninas) en una

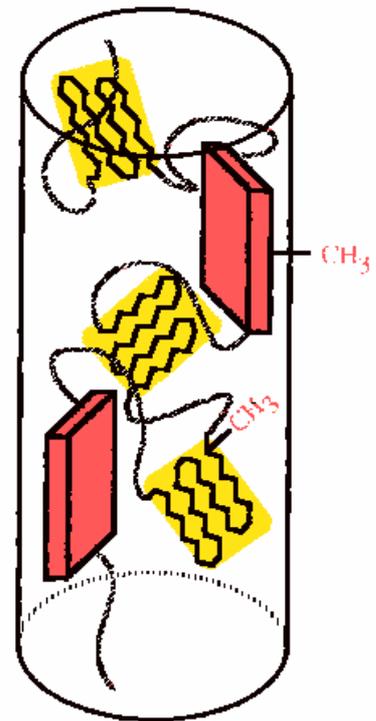


Fig: Estructura de la fibroína agregada(Simmons, A.H, 1996).

matriz amorfa (las hojas β ricas en glicina que se asocian entre ellas). Curiosamente el Kevlar presenta una estructura similar... (Simmons, A.H, 1996)

Aunque no se conoce el mecanismo exacto por el que las proteínas se fusionan, se cree que está mediado por una bajada en el pH del conducto de la glándula y una pérdida de agua (fig. 24).

Explotación y biotecnología de la seda

Es posible obtener artificialmente la seda a partir de las arañas “ordeñándolas”. En la mayoría de los casos esto se hace en laboratorio para obtener muestras experimentales, ya que no es recomendable sacar más de 25 m. por araña, siendo muy poco rentable este procedimiento para un uso industrial.

Para ello hay que sedar a la araña (normalmente poniéndola a bajas temperaturas) y fijarla a un sustrato. Posteriormente se saca con unas pinzas la fibra de las espinaretas y se atan a una bobina, que ha de ir girando a una velocidad tal para obtener de 1 a 15 cm/s. de seda. Para sacar la seda “drawline”, diferenciable por ser algo más gruesa que las y de un color típicamente dorado, Hay que separar los distintos tipos de seda manualmente, cortando las demás (Witt, P., 1971).

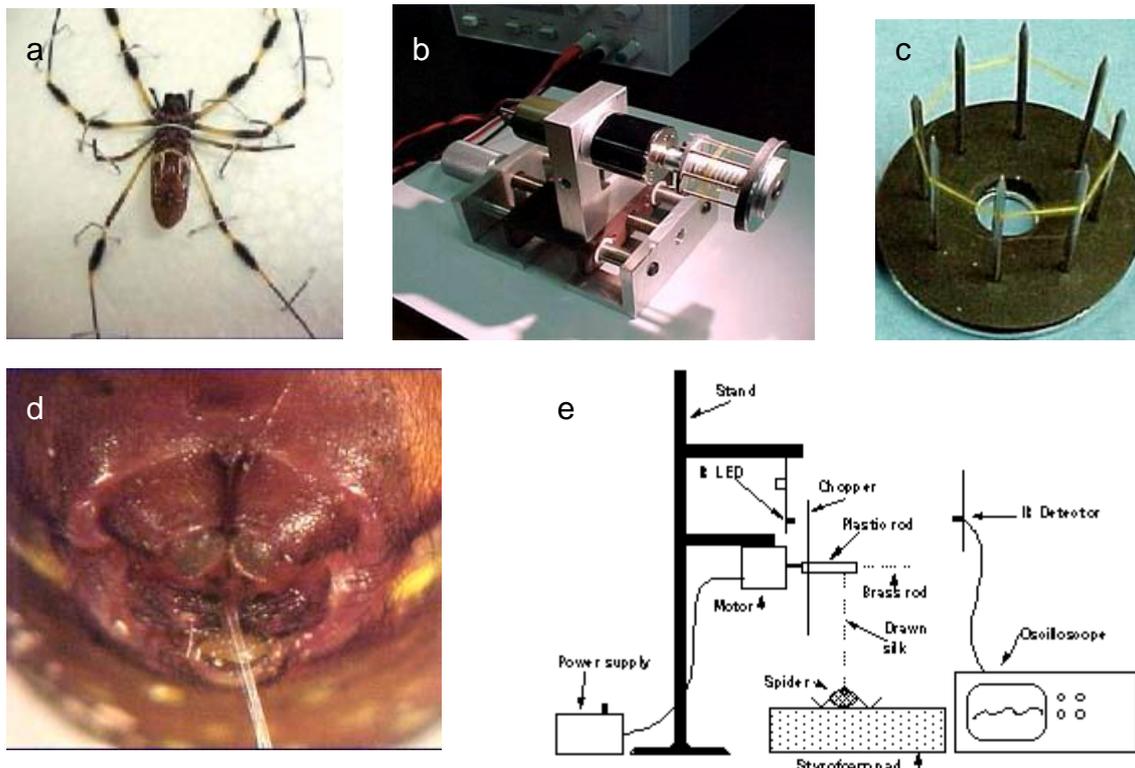


Fig 25: Obtención de seda de *Nephila clavipes*: a) Inmovilización. b) Aparato para la obtención de seda. c) Muestra de bobina con seda “dragline” (Dr. Mike Ellison *et al*, Clemson University). d) Vista de la salida de seda de las espinaretas. e) Esquema de la instalación para obtener seda (Silk Protein Project, University of Washington).

Al no ser rentables estos sistemas, la multinacional DuPont, líder mundial en la fabricación de fibras (es la que desarrolló el Kevlar), consiguió expresar el gen de la fibroína de la araña en bacterias (S. R. Fahnestock, 1997)

y levaduras (M. S. Ellison *et al*, 2002). Aunque los resultados hasta ahora no son muy productivos, ya que la maquinaria enzimática tanto de las bacterias como de las levaduras digieren en parte la proteína producida, obteniéndose fibras de un peso molecular menor al esperado, esperan mejorar la técnica en los próximos años. De esta forma esperan producir entre 35 y 350 Kg de seda por lote de cultivo, frente a los 3 Kg que se producen ahora.

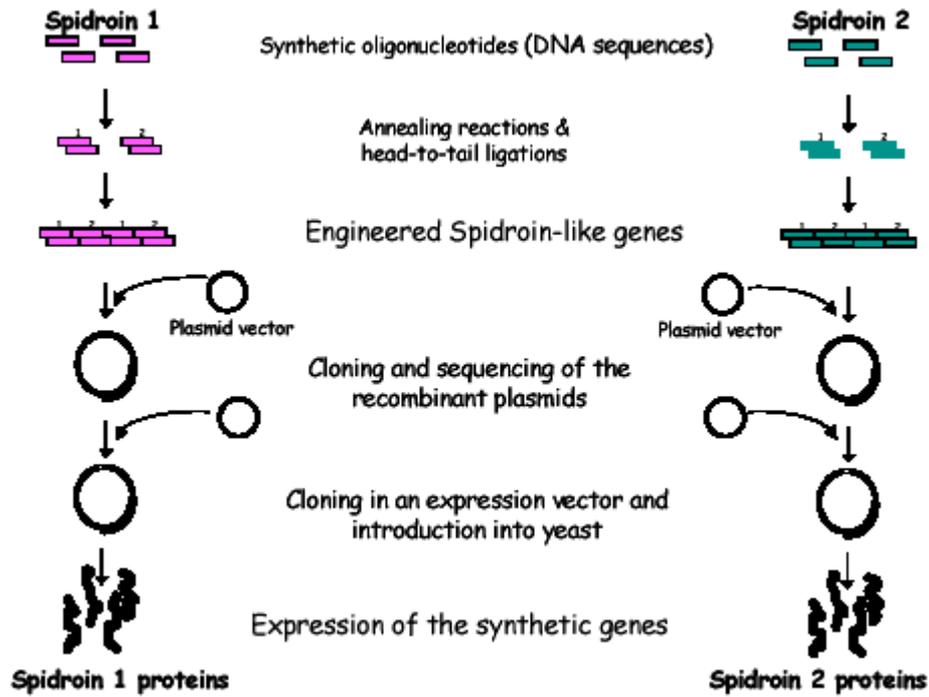


Fig 26: Estrategias de clonación y expresión de las preteínas de la seda (M. S. Ellison *et al*, 2002).

Sin embargo, los científicos de Nexia (empresa biotecnológica asociada al ejército de EEUU) intentaron una idea mucho más ambiciosa basándose en las semejanzas que existen entre las células productoras de seda de las arañas y las células productoras de leche de los mamíferos. Ambas son células glandulares procedentes del tejido embriogénico epitelial y ambas secretan grandes cantidades de proteínas hidrosolubles. Las células epiteliales de cabra, adecuadamente modificadas, son capaces de fabricar la proteína de la seda.

Para ello, tomaron una estirpe de cabra de crecimiento rápido (BELE Breed Early - Lactate Early), que alcanzan la madurez sexual a los 3 meses de edad, obtenidas para la síntesis de diversas proteínas en la leche (tales como insulina, colágeno, hormona del crecimiento, factores de coagulación sanguínea, etc.). Este proceso de producción de proteínas a partir de la leche de cabra lo han patentado como MAC-T (Mammary Cell Lines).

Tras filtrar y purificar la leche obtenida, se obtiene una harina formada por proteínas puras de la seda, que una vez polimerizadas *in Vitro*, dan lugar a fibras de seda. Las fibras obtenidas así han sido patentadas como *Biosteel*.

Jeffery Turner, presidente de Nexia, opina que cuando el método de producción esté a pleno rendimiento, obtendrán un material "más duro que el Kevlar de DuPont pero a un precio competitivo", que estima en 50\$/Kg (Rita L. D'Aquino, 1999).



Fig 27: Webster y Pete, primeras cabras productoras de seda (BBC News)

Algunas aplicaciones de la seda

Las primeras aplicaciones en cuanto al uso de la seda de las arañas se remontan a 1709, cuando el gobierno francés encomendó al naturista René-Antoine Ferchault de Réaumur que le encontrara usos a la seda de arañas. René-Antoine se entregó diligentemente a la tarea de fabricar guantes y medias con la seda de los huevos de araña (*fig. 10*), llegando a la conclusión de que no era rentable debido a la dificultad en la crianza de las arañas.

Durante la segunda guerra mundial, aprovechando su delgadez, se usaron fibras de seda de araña como marcadores en los objetivos de microscopios, telescopios rifles de largo alcance y guías para bombas (de hecho existía la tradición en los cuarteles de mantener una araña para tomar la seda para las guías telescópicas de los rifles, normalmente una viuda negra, *Latrodectus mactans*).

En pueblos aborígenes de Australia se utiliza tradicionalmente la tela de una araña gigante como red de pesca y los nativos de Nueva Guinea la utilizan también para hacer bolsas y otros útiles rudimentarios.

Hoy en día, la mayoría de los usos que se le podrían dar a la seda todavía no se conocen, ya que es un material tan asombrosamente nuevo que no se conocen demasiadas aplicaciones inmediatas.

En medicina, por ejemplo, existen numerosos procedimientos que podrían avanzar mucho con un material tan resistente y biocompatible. Podría tener múltiples aplicaciones en cirugía óptica, restauración de tendones y ligamentos y neurocirugía.

También en el campo de la robótica requieren este nuevo material, utilizable en la tecnología de los nanorobots.

En la industria textil podría tener múltiples usos para el diseño de nuevos tejidos deportivos ligeros y altamente resistentes y para la manufactura de velámenes de los barcos.

El ejército de los EEUU ha encontrado ya una aplicación de este nuevo material en los nuevos chalecos antibalas que han diseñado, mucho más ligeros y seguros que los que se han venido utilizando (R. Lewis, 2002).

VÍDEOS

En este CD-Rom se incluyen algunos vídeos de comportamiento de *Nephila clavipes* grabados por C. Frank Starmer en observaciones de arañas en su medio natural.

Están codificados en formato .mpg y .mov, por lo que es indispensable tener instalado el QuickMedia Player.

AGRADECIMIENTOS

A C. Frank Starmer, profesor de la Medical University of South Carolina por su gran ayuda vía email, enviándome artículos de interés y permitiéndome utilizar sus fotos y videos de Natasha, Susan, Vadim y Laura, ejemplares de *Nephila clavipes* que habitan en su jardín y a los cuales estudia con autentico talento en sus ratos libres. Por supuesto, también les estoy profundamente agradecido a ellos, que posaron admirablemente.

A M. A. Martín Adán y J. Martín Diaz, por permitirme valerme de sus ordenadores cuando el mío espontáneamente dejó de funcionar en el momento más crítico.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos:

- Frank K. Ko y Jovan Jovicic, 2004. Modeling of Mechanical Properties and Structural Design of Spider Web. *Biomacromol.* 5, 780-785.
- G. W. Uetz *et al*, 2002 . Antipredator benefits of single- and mixed-species grouping by *Nephila clavipes* (L.) (Araneae, Tetragnathidae). 1992 . *J. Arachnol*, 20 :212–216.
- Gonzaga, M., 1998 . Web Invasion And Araneophagy In *Peucetia Tranquillini* (Araneae, Oxyopidae *J. Arachnol*, 26 :249-250.
- J. M. Schneider, *et all*, 2000. Sperm competition and small size advantage for males of the golden orb-web spider *Nephila edulis*. *J. Evol. Biol.* 13: 939-946.
- K. Tanaka, 1984 . Rate of Predation by a Kleptoparasitic Spider, *Argyrodes Fissifrons*, upon a Large Host Spider, a *Gelena Limbata* (Araneae). *J. Arachnol*, 12:363-367.
- Linden Higgins, 1991. Response of *Nephila clavipes* to mock predation changes with the proximity of the molt. *J. Arachnol*, 19 :231–232.
- M. S. Ellison *et al*, 2002 . A Biomimetic Manufacturing of Fibers. *National Textile Center Research Briefs – Materials Competency: June 2002*.
- Pan Hong-Chun *et al*, 2004. Philogenetic placement of the spider genus *Nephila* (Aranae: Araneoidea) inferred from rRNA and MaSp1 gene secuencias. *Zool. Sci.* 21:343-351.
- R. L. Rodríguez S., 2000. Memory of captured prey in three web spiders (Araneae: Araneidae, Linyphiidae, Tetragnathidae). *Anim Cogn* (2000) 3 :91–97.
- Rita L. D'Aquino, 1999 . Spinning Spider Silk in the Lab. *Chemical Engineering*. Vol.106, Iss. 2; pg. 56.

- Rypstra, A. L., 1985 . Aggregations of *Nephila clavipes* (L .) (Araneae, Araneidae) in relation to prey availability . *J . Arachnol*, 13 :71-78 .
- S. N. Gorb, 1998. Dragline-associated behaviour of the orb web spider *Nephila clavipes* (Araneoidea, Tetragnathidae). *J. Zool., Lond.* 244: 323-330.
- S. R. Fahnestock, 1997. Synthetic spider dragline silk proteins and their production in *Escherichia coli*. *Appl Microbiol Biotechnol* 47 : 23-32
- S.G. Brown, 1985. Mating Behavior of the Golden-Orb-Weaving Spider, *Nephila clavipes* II. Sperm Capacitation, Sperm Competition, and Fecundity. *J. Comp. Psychol.* Vol. 99, No. 2: 167-175.
- Simmons, A.H., Michal, C.A. and Jelenski, L.W. 1996, Molecular Orientation and Two-Component Nature of the Crystalline Fraction of Spider Dragline Silk. *Science* 271 84-87.
- T. E. Christenson *et all* (1985). Mating Behavior of the Golden-Orb-Weaving Spider, *Nephila clavipes*: I. Female Receptivity and Male Courtship. *J. Comp. Psychol.* Vol. 99, No. 2: 160-166.
- Vargas, A. J., 1997 . Geographic Distribution of *Nephila clavipes* (Araneae: Tetragnathidae) in Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 33, No. 1–2, 114–115.
- Witt, P.1971. Instructions for Working with Web-building Spiders in the Laboratory, *Bioscience* 21,1: 23-25.
- Zschokke S., 2000. Form and function of the orb-web. *Eur. Arachnol.* (S. Toft & N. Scharff eds.), pp. 99-106.

Libros:

- C. Darwin, 1860. El viaje del Beagle. Alianza Editorial, 1969.

Páginas web:

- American Arachnology Society (AAS) website.
<http://www.americanarachnology.org>
- Animal diversity web. Universty of Michigan. Museum of Zoology.
<http://animaldiversity.ummz.umich.edu/site/index.html>
- BBC News. <http://news.bbc.co.uk>
- BAM: Biomimetic Advanced Matherials, Clemson Univesity.
<http://hubcap.clemson.edu/~ellisom/biomimeticmaterials/index.htm>
- Bill Amos, 1998. Spider´s web, Part I y II. University of Cambridge.
<http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artdec98/baspid4.html>

- C. Frank Starmer: Natasha, the Golden Silk Spider (*Nephila clavipes*).
http://monitor.admin.musc.edu/~cfs/spider_2002/
- Dr. Mike Ellison *et al*, Clemson University.
<http://people.clemson.edu/~ellisom/web%20projects/spiderfarming/index.htm>
- Featured creatures. University of florida.
<http://creatures.ifas.ufl.edu/index.htm>
- Florida Nature. <http://www.floridanature.org/>
- International Society of Arachnology (ISA) website.
<http://www.arachnology.org/>
- NCBI Taxonomy Browser.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=Taxonomy&cmd=search&term>
- Norman I. Platnick *et al*, 2000. The World Spider Catalog, Version 5.5
<http://research.amnh.org/entomology/spiders/catalog/INTRO1.html>
- R. Lewis, 2002. Unraveling the Weave of Spider Silk. Mac Graw Hill Articles. <http://www.mhhe.com/biosci/genbio/life/articles/article1.mhtml>
- Silk Protein Project, University of Washington.
<http://faculty.washington.edu/yagerp/silkprojecthome.html>
- Spider silk and venom project. Vivienne Li
<http://www.chm.bris.ac.uk/motm/spider/projecth.htm>.
- Spider's web construction gallery (Zschokke S, University of Basel).
<http://pages.unibas.ch/dib/nlu/staff/sz/webconstruct.html>

Sevilla, 20 de Mayo 2005

Luis Fernández de Castro Díaz