Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
1955
CIENCIA • ARTE • LIBERTAD

RA RIÓ GUENDARUYUBI

UABJO

El espermatozoide

Gisela Fuentes-Mascorro

El acrosoma

Edith Arenas Ríos,
Juan Gabriel Rivera Martínez y
Lorena Ruiz Valderrama

El núcleo

Gisela Fuentes-Mascorro

La pieza intermedia

Gisela Fuentes-Mascorro

El flagelo

Ernesto Rodríguez Tobón,
Víctor Manuel Montesino Fuentes y
Edith Arenas Ríos

Publicación cuatrimestral de la Universidad Autónoma ¨Benito Juárez¨de Oaxaca

Volumen 1 Número 3 2018 Mayo - Agosto www.uabjo.mx

Dr. Eduardo Carlos Bautista Martínez
Rector de la UABJO

M.E. Leticia Eugenia Mendoza Toro
Secretaria General

Mtro. Javier Martínez Marín
Secretario Académico

Dr. Taurino Amilcar Sosa Velasco
Secretario Administrativo

C.P. Verónica Esther Jiménez Ochoa
Secretaria de Finanzas

Dr. Aristeo Segura Salvador
Secretario de Planeación

COMITÉ CIENTÍFICO

FÍSICO MATEMÁTICAS Y CIENCIAS DE LA TIERRA

Dra. Gloria Inés González López
Universidad Veracruzana, México

BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Dra. Gabriela Mellado Sánchez
Instituto Politécnico Nacional, México

Dr. Héctor Manuel Mora Montes
Universidad de Guanajuato, México

MEDICINA Y CIENCIAS DE LA SALUD

Dr. Arturo Becerril Vilchis
Asesor del Director de Programas Complementarios REPSS Oaxaca Secretaría de Salud Oaxaca, México

Dr. Álvaro Muñoz Toscano
Instituto de Investigaciones del Hospital Metodista de Houston, E.U.A.

Dra. Luz Eugenia Alcántara Quintana
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

HUMANIDADES Y CIENCIAS DE LA CONDUCTA

Dra. Graciela González Juárez
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Dr. Abraham Jahir Ortiz Nahón
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México

Dra. Olga Grijalva Martínez
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México

BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Dr. Julián Mario Peña Castro
Universidad del Papaloapan, México

Dr. José Francisco Rivera Benítez
Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México

Dr. Rogerio Rafael Sotelo Mundo
Centro de Investigaciones en Alimentación y Desarrollo. A.C., México

Directorio

COMITÉ EDITORIAL

Dra. María Leticia Briseño Maas
Dra. Rosa María Velázquez Sánchez
Dr. Abraham Jahir Ortiz Nahón
Dra. Olga Grijalva Martínez

DIRECTORA EDITORIAL

Dra. Gisela Fuentes-Mascorro

COORDINACIÓN DEL NÚMERO TEMÁTICO

Dra. Gisela Fuentes-Mascorro
Dra. Edith Arenas-Ríos

Ra rió guendaruyubi. Revista de Divulgación. No. 3, mayo-agosto 2018, es una publicación cuatrimestral editada, impresa y distribuida por la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, con domicilio en Edificio de Rectoría Planta Baja, Secretaría Académica, Dirección de Investigación, Ciudad Universitaria, Avenida Universidad s/n, colonia Cinco Señores, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, C. P. 68120, México. Teléfono 01-951-50-20-700 ext. 20148, Correo electrónico: publicacionesuabjo2016@gmail.com, dirección electrónica: www.uabjo.mx/publicaciones. Editora responsable: Dra. Gisela Fuentes Mascorro. Reserva al uso exclusivo 04- 2017-070614531000-203, para la difusión vía red de cómputo, ISSN 2594-0562, Expedidos por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Certificado de Licitud de Título y Contenido 17024, de la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

Índice

El espermatozoide	7
El acrosoma	12
El núcleo	17
La pieza intermedia	27
El flagelo	34

Editorial

El grupo de investigación Morfofisiología y Bioquímica del Espermatozoide de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Iztapalapa, y los miembros del Laboratorio de Investigación en Reproducción Animal (LIRA) de la Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca (UABJO) hemos hallado en las Jornadas de Reproducción el punto de encuentro para que los estudiantes de las dos instituciones –que cursan licenciatura, maestría o doctorado– tengan la seguridad de que pueden plantear preguntas básicas con la certeza de que les serán explicadas de manera satisfactoria y clara, que pueda haber entre ellos un intercambio de experiencias cotidianas relativas al desarrollo de sus experimentos, además, que tengan oportunidad de externar sus dudas y miedos al elegir un programa de posgrado, y en algunas ocasiones hasta compartan los sinsabores y éxitos de la vida diaria.

Algunos aspectos que las Jornadas de Reproducción han permitido fortalecer en nuestros estudiantes son la capacidad para desarrollar un tema, elaborar una presentación y exponerla en un foro de discusión con la confianza de que si existieran dudas aún, todos los presentes colaborarían para disiparlas. También les ha posibilitado comprender que un grupo de investigación se fortalece en un ambiente sano de autocrítica, la cual es bien recibida, porque se está seguro de que su objetivo es coadyuvar a la formación de investigadores.

Como parte de esta experiencia de formación, la escritura de textos es "la cereza del pastel". Por eso, el número 3 de *Ra Rió Guendaruyubi* tiene como finalidad presentar a estudiantes de bachillerato y al público en general una célula única: el espermatozoide. Los trabajos reunidos en este número pre-

tenden que los contenidos acerca de su estructura sean lo suficientemente claros de modo que, al concluir su lectura, los lectores y las lectoras queden satisfechas(os) con el conocimiento que adquirieron sobre esta importante célula de la reproducción.

Finalmente, es nuestro deseo que disfruten leyendo y conociendo las particularidades de esta célula tanto como nosotros(as) nos deleitamos al escribir y construir este número que fue pensado por ustedes y para ustedes.

Edith Arenas-Ríos
Gisela Fuentes-Mascorro

El espermatozoide

Gisela Fuentes-Mascorro[1*]

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2017
Fecha de aceptación: 16 de febrero de 2018

Palabras clave:
célula, macho, fertilización.

Origen de la palabra

La mayoría de los términos médicos son de origen griego y sufren una **transliteración** al latín, esto significa que las letras griegas son pasadas a caracteres latinos; algunos de estos términos están compuestos por un conjunto de palabras representando **neologismos** (palabras nuevas) (Cortés, 2000). Lo mismo sucede con el vocablo **espermatozoide**, que tiene su origen en el griego y corresponde a un conjunto de palabras que expresan una idea completa (Cuadro 1) (Cortés, 2000; deChile, 2001).

Cuadro 1. Etimología del vocablo **espermatozoide**

Griego	Latín	Español
σπέρ-μα/-ματος	espermat	Semilla
ζῷον	zoon	Ser vivo
ειδ-ής/-ές	eid (és), oide	Que tiene el aspecto de

1 Laboratorio de Investigación en Reproducción Animal (LIRA). Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca, UABJO. *Correo electrónico: lirauabjo@gmail.com

Al unirlas, la palabra espermatozoide significaría: "semilla que tiene forma de animal" y fue empleada por primera vez por Anton van Leeuwenhoek, nacido el 24 octubre 1632 en la población de Delft, **Países Bajos** (de los que forma parte Holanda). Leeuwenhoek trabajaba como comerciante de telas y como conserje del Ayuntamiento de su ciudad natal, era aficionado a tallar lentes, lo que le permitió construir su primer microscopio en 1660; a diferencia de los otros microscopios de la época, la finura en la talla de las lentes le brindaba una nitidez libre de **aberración cromática** (colores distorsionados). Combinado esto con su gran capacidad de observación (Pellini, 2014), le fue posible en 1667 describir a los **animálculos** (animales que sólo se pueden ver a través de un microscopio), que el estudiante de medicina Johan Ham le mencionó que había observado. A diferencia de Ham, quien pensó que eran producto de la putrefacción de la muestra, Leeuwenhoek supuso que eran la parte del semen que fertilizaba al óvulo.

A pesar de haber acuñado el término **espermatozoide**, describirlo (Figura 1) y proponer que era fundamental para fertilizar (Jiménez, 2016), la comunidad científica de esa época no fue capaz de comprender la importancia real de las propuestas, pues en ese tiempo aún no se conocía el ovocito, a pesar de que el ovario había sido descrito desde el siglo II antes de Cristo por Herófilo de Calcedonia (Campohermoso, Soliz & Campohermoso, 2009). Nicolaas Hartsoeker en 1694, después de observar en el microscopio espermatozoides, dijo haber visto dentro de ellos a una persona totalmente formada a la que se denominó homúnculo (hombre chiquito); desafortunadamente para la ciencia acompañó su descripción de un dibujo (Figura 2) que produjo un desvío importante en la historia de la concepción.

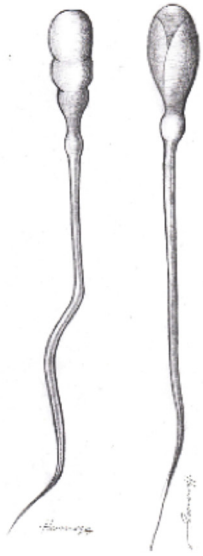


Figura 1. Representación de los espermatozoides observados por Leeuwenhoek. Dibujo elaborado por Ismael Hernández, tomando como base los que elaboró Leeuwenhoek.

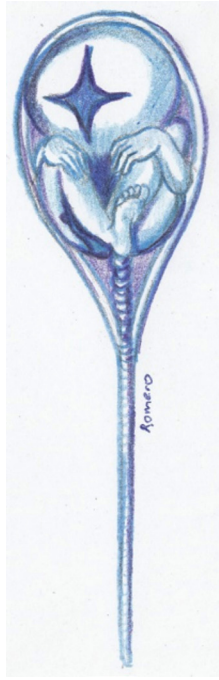
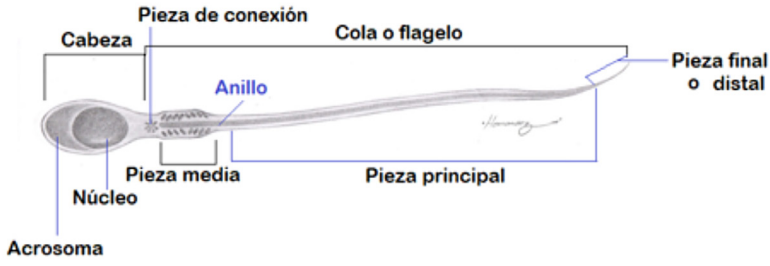


Figura 2. Dibujo del homúnculo que quizás contribuyó al retraso de la ciencia. Elaborado por José Romero, basado en el de Hartsoeker, en 1694.

Estructura

El espermatozoide es la célula germinal masculina en el reino animal y conserva una estructura básica; su descripción puede diferir un poco entre autores. Básicamente se acepta que un espermatozoide es una célula móvil constituida de cabeza y flagelo (Figura 3).

Figura 3. Partes de un espermatozoide



Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

En la cabeza de los espermatozoides se encuentra el núcleo, un poco de citoplasma y el acrosoma; en el flagelo se aprecian la pieza media, la pieza principal y la distal; en algunos esquemas al flagelo se le denomina cola.

Glosario

Animálculo: proviene del latín *animalculum*, donde animal indica un ente dotado de respiración y *culum/culus* implica el diminutivo del sufijo que lo precede, por lo que el término define a un animal pequeño.

Aberración cromática: se denomina así a la diferencia entre el color de la muestra y el observado.

Célula germinal: se llama así a las células que realizan meiosis y que, al fusionarse, pueden dar origen a un nuevo ser, por ejemplo el espermatozoide y el ovocito.

Etimología: disciplina que estudia el origen de las palabras, así como su incorporación y transformación en otras lenguas; permite conocer el significado de las palabras y los cambios que sufren al incorporarse a otros idiomas.

Homúnculo: proviene del latín *homuncŭlus*, constituida de *homo*= hombre y *culus*= diminutivo de la palabra que lo antecede, en este caso *homo*, por lo que se entiende como hombre pequeño.

Neologismos: palabras nuevas o significado nuevo para las palabras.

Países Bajos: conjunto de 12 provincias y las colonias de las islas de Aruba, Curazao y Sint Maarten, y los municipios especiales de Bonaire, Saba y San Eustaquio. Su nombre oficial es el de Países Bajos debido a que un tercio de su territorio está bajo el nivel del mar; se ha difundido erróneamente la costumbre de referirse a este país por el nombre de la provincia de Holanda.

Semen: se denomina así a la sustancia que contiene los productos de excreción del testículo, epidídimo y las glándulas accesorias. Cuando sale expelido del cuerpo del macho se le denomina eyaculado.

Transliteración: representación de los caracteres de una escritura por los de otra, como de las letras griegas a caracteres latinos.

Referencias

Campohermoso Rodríguez, O. F., Soliz S., R. & Campohermoso R., O. (2009). Herófilo y Erasístrato, padres de la Anatomía. *Cuadernos del Hospital de Clínicas, 54*(2),137-40.

Cortés Gabaudan, F. (2000). *Pequeño Diccionario Médico Etimológico*. Recuperado de http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2011/pec_dicmed.pdf

deChile.net. (2001). *Diccionario Etimológico*. Recuperado de http://etimologias.dechile.net/?espermatozoide

Jiménez, J. (2016). *"Animálculos" en el esperma y otras cosas diminutivas y maravillosas que descubrió Antonie Van Leeuwenhoek*. Recuperado de https://www.xataka.com/investigacion/animaculos-en-el-esperma-y-otras-cosas-diminutas-y-maravillosas-que-descubrio-antoni-van-leeuwenhoek

Pellini, C. (2014). *Historia y biografías*. Recuperado de https://historiaybiografias.com/leeuwenhoek/

El acrosoma

Edith Arenas-Ríos,[1]
Juan Gabriel Rivera-Martínez[1] y Lorena Ruiz-Valderrama[2*]

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2017
Fecha de aceptación: 16 de febrero de 2018

Palabras clave:
acrosoma,
espermiogénesis.

Origen del acrosoma

El acrosoma es una estructura parecida a una vesícula que se encuentra por encima del núcleo (Figura 1). En 1950 se habló por primera vez de la naturaleza química del acrosoma del espermatozoide de humano. Bowen (1923) fue la primera persona en decir que el aparato de Golgi estaba relacionado con el acrosoma (Leuchtenberg & Schrader, 1951).

Es importante recordar que el aparato de Golgi es una estructura membranosa en la célula, de muchos sacos pequeños; es decir, varias vesículas se apilan unas con otras cerca del núcleo celular. Este orgánulo es capaz de producir secreciones contenidas en vesículas pequeñas que viajan hasta la superficie de la célula y se funden con la membrana externa para verter su contenido al exterior o insertarse en la membrana o en otros organelos. También, esta estructura es capaz de producir enzimas digestivas (proteínas capaces de acelerar una reacción química, especialmente de degradar o digerir) (Figura 1).

1 Departamento en Biología de la Reproducción.
2 Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM-Iztapalapa Ciudad de México. * Autor de correspondencia, correo electrónico: ratachobbis28@gmail.com

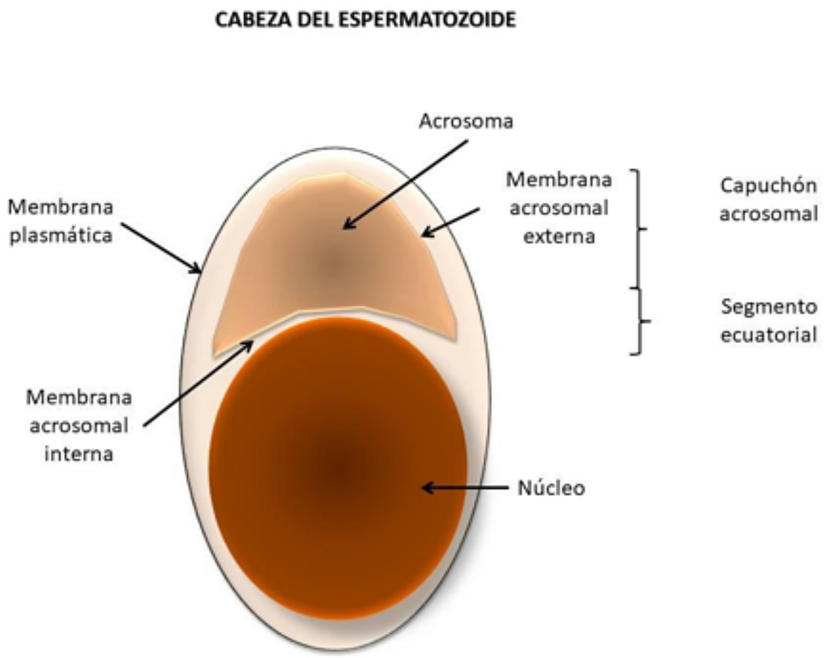
Así, el aparato de Golgi se describe como un organelo que actúa como mensajería o correo, distribuyendo a las proteínas de las células a los sitios donde deben cumplir su función (Peña, 1995).

El acrosoma se forma en el testículo durante el proceso de diferenciación del espermatozoide; pasa de ser una célula redonda a ser una alargada y obtiene finalmente la forma de un espermatozoide. En la etapa final de su formación, éste adquiere estructuras accesorias, incluyendo el acrosoma.

El acrosoma

El acrosoma es una estructura única, originada por vesículas que provienen del aparato de Golgi, que contiene enzimas necesarias para que el espermatozoide pueda penetrar al ovocito. Es una membrana vesicular, como capucha, sobre el núcleo en la parte frontal de la cabeza del espermatozoide (Figura 1). Es altamente conservado, a través de la evolución, y ha sido un indicador del espermatozoide en varios filos de animales (Eddy, 2006).

Figura 1. Estructura de la cabeza del espermatozoide en la que se pueden observar las diferentes membranas encontradas



Estructura del acrosoma

El acrosoma contiene una membrana acrosomal interna que rodea a la parte anterior de la membrana externa del núcleo. La membrana acrosomal externa está prácticamente muy cercana a la superficie interna de la membrana plasmática de la parte anterior o frontal de la cabeza del espermatozoide (Figura 1; Eddy, 2006; Fawcett, 1970).

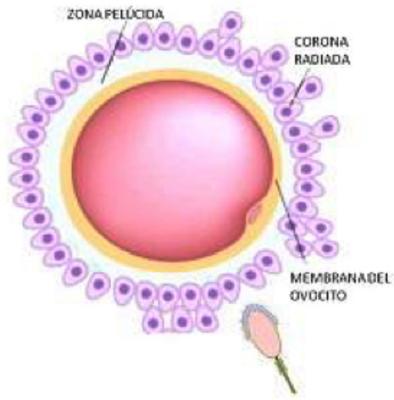
El acrosoma consiste en dos segmentos: la capucha (parte anterior del acrosoma) y el segmento ecuatorial (parte posterior). Su forma y tamaño son variables, dependiendo de la especie. La distribución de sus dos segmentos también puede variar (Figura 1; Eddy, 2006; Fawcett, 1970).

El espermatozoide, una vez eyaculado, tendrá que experimentar dos procesos que ocurren en el tracto reproductor femenino en especies de fertilización interna, llamados capacitación y reacción acrosomal (Chang, 1951; Austin, 1951 y 1952; Eddy, 2006).

La capacitación prepara al espermatozoide para penetrar al ovocito, cambiando su patrón de movilidad, y lo dispone también para la reacción acrosomal. Ésta, como bien dice su nombre, necesitará la participación del acrosoma para poder fertilizar al ovocito (Figura 2).

Durante dicho proceso, la membrana acrosomal externa y la membrana plasmática deben fusionarse y forman una vesícula, en donde la mayoría de su contenido se descarga al exterior. La membrana acrosomal interna y el segmento ecuatorial persisten después de la fusión con el gameto femenino en la mayoría de las especies (Honda, Siruntawineti & Baba, 2002; Yanagimachi, 2003).

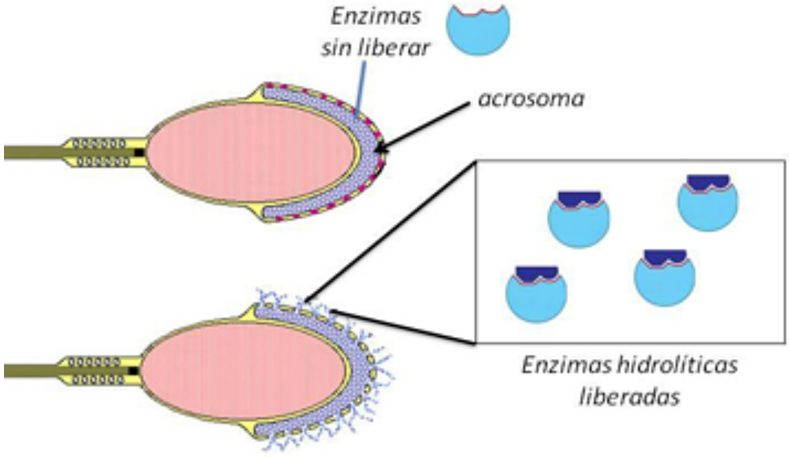
Figura 2. Reacción acrosomal



Contenido del acrosoma

Múltiples proteínas están presentes en el acrosoma, incluyendo hidrolasas ácidas comúnmente encontradas en los lisosomas, y otras proteínas específicas del espermatozoide. El acrosoma tiene características de una vesícula secretora; cuando ésta recibe una señal de estímulo (regularmente proveniente del ovocito), vierte su contenido al exterior, a manera de exocitosis. Después de la liberación y activación del contenido del acrosoma, el espermatozoide puede atravesar una capa que rodea al ovocito, llamada zona pelúcida; sin embargo, la penetración de ésta puede ser bloqueada, impidiendo que más de un espermatozoide se introduzca en el ovocito o que espermatozoides de otra especie cumplan con esa función (Figuras 2 y 3) (Yanagimachi, 1994; Hardy, 2002; Eddy, 2006).

Figura 3. El acrosoma y su contenido. En color azul se observa el contenido enzimático acrosomal y en rosa los puntos de fusión de la membrana acrosomal externa y membrana plasmática. Cuando éstas se fusionan, se liberan las enzimas hidrolíticas contenidas que permitirán al espermatozoide penetrar en el ovocito



Glosario (DRAE, 2014; Curtis, Barnes, Schek & Massarini, 2007).

Exocitosis: palabra compuesta de raíces griegas: *ex*, que significa hacia afuera; *kytos*, que significa célula, y la terminación *osis*, que significa impulso. Se denomina así al proceso mediante el cual la célula expulsa de su interior sustancias contenidas en vesículas; estas últimas se fusionan con la membrana, dejando en el exterior de la célula su contenido.

Filo: proviene del griego φῦλον phŷlon phylo (plural *phyla*), que significa raza, estirpe. En biología corresponde a la segunda categoría taxonómica debajo de reino, de manera que el filo es la agrupación de clases; está constituido por individuos de ascendencia común.

Hidrolasas: proteínas capaces de llevar a cabo la ruptura de una molécula, que emplean moléculas de agua para poder hacerlo.

Lisosomas: orgánulos que contienen enzimas que rompen moléculas y son los encargados de degradar material tanto interno como externo a la célula.

Referencias

Austin, C. R. (1951). Observations on the penetration of the sperm into the mammalian egg. *Australian Journal of Scientific Research,* 4, 581-596.

Austin, C. R. (1952). The 'capacitation' of the mammalian sperm. *Nature*, 170, 326.

Bowen, R. H. (1923). The origin of secretory granules. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 9(10), 349-352.

Curtis, H., Barnes, S., Schek, A. & Massarini, A. (2007). Glosario. *Biología. Buenos Aires:* Editorial Médica Panamericana.

Chang, M. C. (1951). Fertilizing capacity of spermatozoa deposited into fallopian tubes. *Nature,* 168, 697-698.

Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española*, 23a ed. (2014). Recuperado de
https://www.jstor.org/stable/pdf/88153.pdf?seq=1#page_scan_tab_contents

Eddy, E. M. (2006). The spermatozoon. En D. Neill J. (editor), *Knobil and Neill's physiology of reproduction*. EUA: Academic Press Elsevier.

Fawcett, D. W. (1970). A comparative view of sperm ultrastructure. B*iology of Reproduction.* Supplement, 2, 90-127.

Hardy, D. M. (2002). *Fertilization*. San Diego: Academic Press.

Honda, A., Siruntawineti, J. & Baba, T. (2002). Role of acrosomal matrix proteases in sperm-zona pellucida interactions. *Human Reproduction Update*, 8, 405-412.

Leuchtenberger, C. & Schrader, F. C. (1951). The citology and chemical nature of some constituents of the developing sperm. *Chromosoma*;4, 404-428.

Peña, A. (1995). *¿Cómo funciona una célula?*: Fisiología celular, México: FCE/SEP/CONACyT.

Yanagimachi, R. (1994). Mammalian fertilization. En E. Knobil & J. Neill (eds.), *The Physiology of Reproduction* (pp. 189-317). New York: Raven Press.

Yanagimachi, R. (2003). Fertilization and development initiation in orthodox and unorthodox ways: from normal fertilization to cloning. *Advances in Biophysics*, 37, 49-89.

El núcleo

Gisela Fuentes-Mascorro[1]

Fecha de recepción: 6 de febrero de 2018
Fecha de aceptación: 25 de febrero de 2018

Palabras clave:
espermatozoide, cabeza, cromatina.

Núcleo

Considerando la medida del ovocito de 135 µm y la del espermatozoide de 40 µm (Darszon, 2018), el siguiente esquema (Figura 1) muestra la diferencia de tamaño que existe entre las dos células.

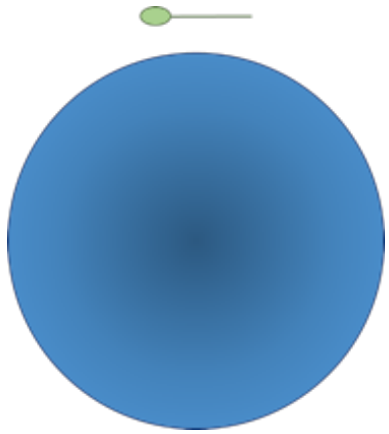


Figura 1. Esquema hecho escalando el tamaño real reportado para las células

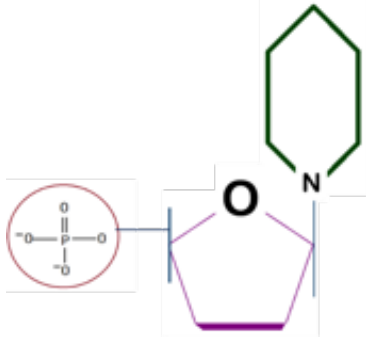
1 Laboratorio de Investigación en Reproducción Animal, LIRA. Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. *Correo electrónico: lirauabjo@gmail.com

Si ahora nos concentramos en el núcleo de las células, el de un ovocito humano varía de 22 a 24 µm (Hertig & Adams, 1967), mientras que el núcleo del espermatozoide mide de 5 a 8 µm (Salvador, 2017) (Figura 2).

Figura 2. Conservando la escala de la Figura 1, se presenta la diferencia en tamaño del núcleo del espermatozoide en verde y el núcleo del ovocito en crema

Dentro del núcleo de estas células se encuentra un gran número de proteínas, Ácido Ribonucleico (ARN) y Ácido Desoxirribonucleico (ADN). Este último está constituido de unidades denominadas nucleótidos, las cuales están integradas por un grupo fosfato (círculo café en la Figura 3); un azúcar, la desoxirribosa (de color lila), y una base nitrogenada (de verde). Estos nucleótidos se unen para formar un gran polímero de carga negativa.

Figura 3. Nucleótido. Se presentan de color café el grupo fosfato, de lila el azúcar y en verde la base nitrogenada

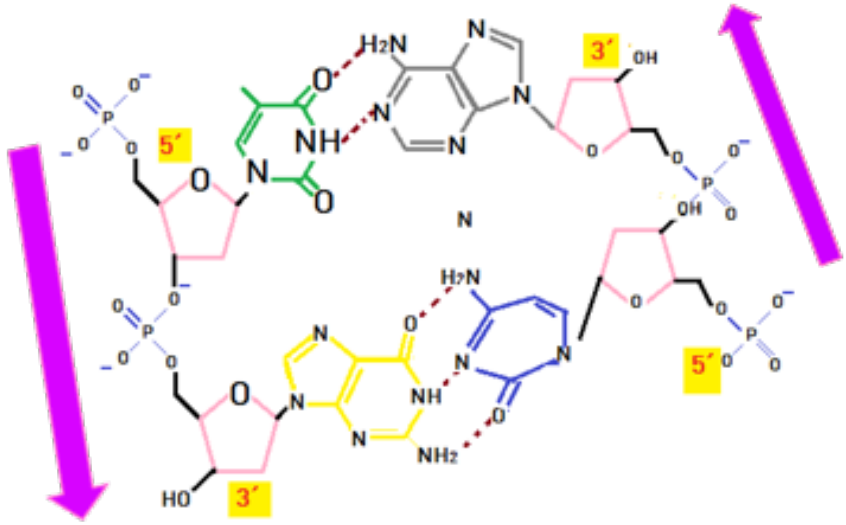


Las bases nitrogenadas son cuatro: adenina A, timina T, guanina G y citosina C; por su estructura la unión siempre será AT y GC (Figura 4).

Figura 4. Bases nitrogenadas. A = adenina, T= timina, G = guanina y C = citosina

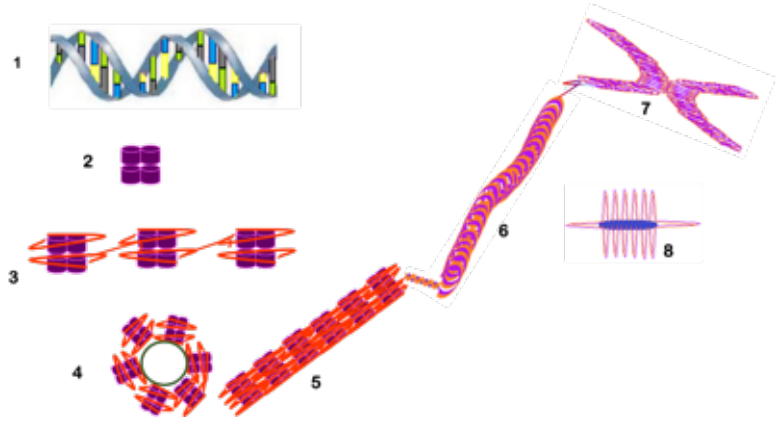
Los nucleótidos se unen de forma complementaria adenina (en verde) con timina (en gris), a través de dos puentes de hidrógeno (marcados con café oscuro y líneas punteadas en la Figura 5), guanina (en amarillo) con citosina (en azul) a través de tres puentes de hidrógeno; al hacerlo constituyen la doble hélice del ADN (Figura 5) que fuera descrita en 1953 por Francis Crick y James Watson.

Figura 5. A esta estructura se le denomina doble hélice; la hélice de la izquierda tiene las desoxirribosas (rosas) hacia arriba y la hélice de la derecha las tiene hacia abajo; a esto se le llama antiparalelismo; 3´y 5´corresponden al carbono de la desoxirribosa que se une al grupo fosfato



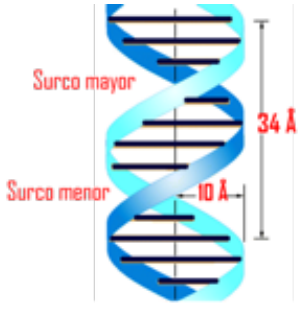
El ADN permanece en el interior del núcleo de la célula, empaquetado en proteínas, las cuales se denominan histonas, que se caracterizan por ser de carga positiva, de manera que se unen fácilmente al ADN de carga negativa, formando un nucleosoma base. Entre un nucleosoma y otro se mantiene la unión por la histona H1, para formar una estructura conocida como collar de perlas, las cuales se siguen arrollando sobre sí mismas, hasta constituir los cromosomas; esto se conoce como niveles de empaquetamiento de la cromatina, que se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Niveles de empaquetamiento del ADN en una célula somática: 1. Doble hélice de ADN. 2. Enrollamiento del ADN sobre un octámero de histonas, estructura que se denomina nucleosoma base. 3. Estructura de collar de perlas, donde los nucleosomas base se unen entre sí, teniendo a la histona H1 como punto de unión entre un nucleosoma base y otro. Al conjunto del ADN con las proteínas que lo arrollan sobre ellas se le denomina cromatina. 4. Vista superior del enrollamiento que se va haciendo en la cromatina, es parecido a lo que le ocurre a una liga cuando la tomas entre tus manos y giras sus extremos en sentido opuesto, ¿te has fijado que llega un punto en que parece que sola se superenrolla?, esto mismo ocurre a la cromatina. 5. Solenoide es el nombre de esta estructura que se sigue superenrollando. 6. Este superenrollamiento tiene dos formas de estar en la célula (7 y 8). 7. Estructurando cromosomas, cuando la célula se va a reproducir. 8. Anclado a la matriz nuclear (en azul), formando asas o bucles



Estas formaciones (Figura 6, número 6) se repiten un gran número de veces, formando hebras de aproximadamente dos metros de largo (Vicente, 2011) en una célula somática humana, considerando que el ovocito y el espermatozoide son células haploides; entonces queda un metro de ADN con un ancho de 3.4 nm (Figura 7), para empaquetar tanto en el núcleo del ovocito como en el del espermatozoide.

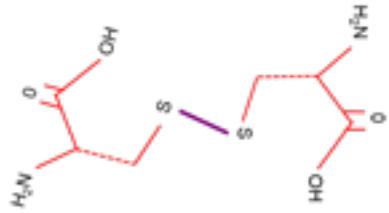
Figura 7. Debido a la estructura tridimensional de la molécula, los espacios denominados surcos no presentan el mismo tamaño



El empaquetamiento del ADN en histonas lo presentan las células somáticas y los ovocitos, pues poseen el espacio suficiente en su núcleo para acomodar la cromatina de esta manera; debemos considerar ahora que el núcleo del espermatozoide contiene la misma cantidad de ADN que el núcleo del ovocito. La pregunta inmediata es: ¿cómo puede hacerlo?, si el núcleo de un espermatozoide es menos de la tercera parte del núcleo del ovocito (Figura 2).

La solución que la naturaleza dio fue permitir que el espermatozoide tenga un tipo de histonas específicas de él, unas proteínas denominadas de transición y un grupo de proteínas aún más básicas que las histonas, a las que se les llama protaminas. Estas últimas fueron descubiertas por Miesher en 1869, en el espermatozoide del salmón, son ricas en arginina y cisteína, este aminoácido contiene un átomo de azufre cuyo símbolo químico es una "S", lo que permite que se formen enlaces disulfuro S-S entre cisteínas (Figura 8) (Fuentes-Mascorro, 2000).

Figura 8. Enlace disulfuro S-S entre dos cisteínas



Las protaminas se adhieren al surco mayor de la doble hélice (Figura 9) (Balhorn, 2007).

Figura 9. Esquema de la doble hélice y la unión de las protaminas en verde en el surco mayor del ADN

Esta estructura básica de unión de protaminas ADN se empieza a asociar a través de enlaces disulfuro y fuerzas de Van der Waals; se estrecha la atracción entre moléculas cercanas, formando una estructura conocida como "lado a lado" o "empalizado", similar a la de una palanqueta de cacahuate, sólo que flexible (Figura 10).

Figura 10. Se muestra la conformación denominada lado a lado o empalizado; la cercanía entre protaminas permite la formación de enlaces disulfuro, reforzándose la unión con las fuerzas de Van der Waals

Estos empalizados flexibles empiezan a agruparse, formando círculos concéntricos, configurando una estructura similar a una dona o toroide, que integran un continuo, como si estuvieras enrollando la cuerda de un trompo (núm. 8 de la Figura 6); se fija en los extremos a la matriz nuclear, en puntos de anclaje denominados "MAR", por sus siglas en inglés, por lo que esta matriz los puede cerrar, como el juego de resorte de plástico que puedes extender y reducir de tamaño (Figura 11). Este empaquetamiento disminuye impresionantemente el espacio que emplea el ADN al interior del núcleo y permite acomodar el mismo ADN que tiene un ovocito en un pequeño espacio (Figura 2).

Figura 11. Juego de resorte que puede extender y reducir su tamaño

Una vez estructurada la cromatina del espermatozoide en su núcleo, aún queda por definir la forma de la cabeza del espermatozoide. Existen algunas teorías de cómo es que adquiere su presentación final, las primeras suponían que la manera en que se empaquetaba la cromatina definía la forma que la cabeza tomaba finalmente; sin embargo, se ha observado que los espermatozoides de las diferentes especies contienen protaminas y proporción de histonas diferentes, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Contenido de protaminas e histonas espermáticas en diversos mamíferos

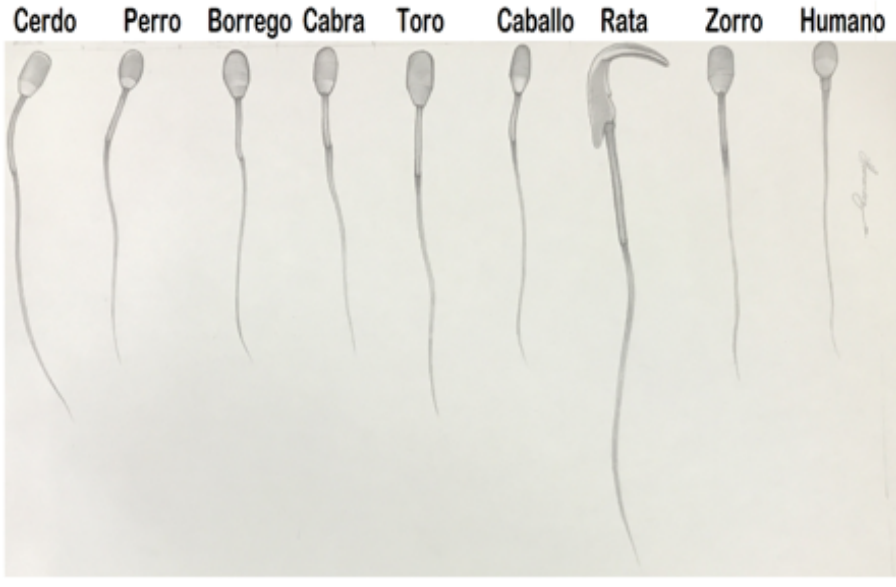
Animal	Tipo de protamina	Tiene ADN empaquetado en histonas espermáticas
Toro	P1	No
Borrego	P1	No
Caballo	P1 y P2	No
Conejo	P1 y P2	No
Hombre	P1 y P2 (mucha)	Sí, 10% a 30% de su ADN
Ratón	P1 y P2	Sí, 10% de su ADN
Rata	P1 y P2 (muy poca)	Es probable

Se han identificado en salmones 15 genes de protaminas que codifican para seis proteínas (Dixon *et al.*, 1985); las aves presentan dos copias (Oliva & Dixon, 1989) y en mamíferos sólo se ha detectado una copia para el gen que codifica para protamina 1 y una copia para el que codifica para protamina 2 (Reeves *et al.*, 1989); cabe recordar que el producto se forma del genoma paterno y materno, por lo que la palabra copia se refiere a que el gen paterno presenta un gen y el materno otro gen igual.

Se sabe que si no existe la adecuada proporción de protaminas o hay algún error en los genes y por tanto las protaminas o las histonas espermáticas no pueden arrollar adecuadamente el ADN, los machos presentan problemas de fertilidad y son incapaces de engendrar un producto a pesar de haber fecundado el ovocito.

En la Figura 12 se muestra la forma y tamaño que presentan espermatozoides de diferentes animales, por lo que para explicar la diversidad en la apariencia de la cabeza del espermatozoide, algunos estudios han profundizado en cómo los microtúbulos se acomodan para integrar el flagelo y de manera indirecta participar en la forma de la cabeza del espermatozoide. Sin embargo, en la actualidad no existen aún evidencias suficientes que expliquen por qué las cabezas de los espermatozoides tienen tamaños y formas tan diferentes.

Figura 12. Dibujos de espermatozoides de mamíferos; se puede apreciar que el tamaño y la forma de la cabeza son distintas entre ellos



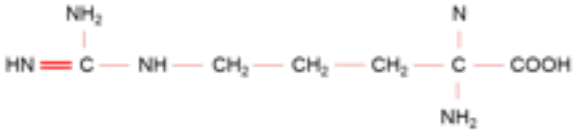
Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

Glosario

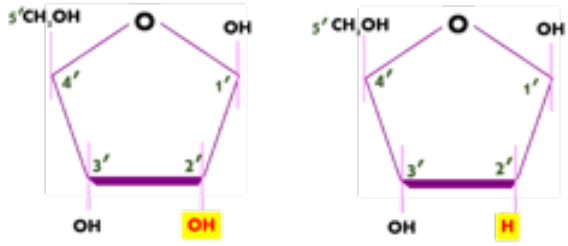
***Å*:** Armstrong, unidad de medida. Diez Armstrong equivalen a un nanómetro.

***Antiparalelismo*:** término aplicado a dos partes que se mantienen siempre a la misma distancia una de otra, en el que una de las partes va en un sentido y la otra en sentido opuesto.

***Arginina*:** aminoácido no esencial que puede ser sintetizado por los humanos.



***ARN*:** está constituido por un grupo fosfato, un azúcar que es la ribosa y una base nitrogenada que puede ser adenina, guanina, citosina y uracilo.

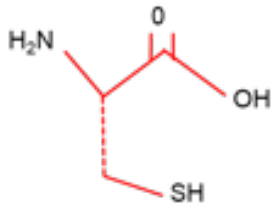


A la izquierda vemos a la ribosa, a la derecha desoxirribosa; la única diferencia es que en el carbono 2' la ribosa tiene un grupo OH y la desoxirribosa un H.

***Arrollar*:** envolver en forma de rollo.

***Célula somática*:** nombre que se da a todas las células de un organismo que contienen el complemento cromosómico de la especie, conocidas también como células diploides; se abrevia 2n, lo que en humanos corresponde a 46 cromosomas.

***Cisteína*:** aminoácido no esencial que puede ser sintetizado por los humanos.



***Cromatina*:** se denomina así al conjunto de proteínas y ADN que se encuentra dentro del núcleo celular.

***Fuerzas de Van der Waals*:** fuerzas que se crean entre moléculas muy cercanas, independientemente de que tengan carga o no; pueden ser de atracción o de repulsión y su importancia radica en el gran número de ellas que se presenta.

***Genes*:** secuencias de ADN que permiten fabricar un ARN mensajero, que al salir del núcleo sirve de plantilla para sintetizar una proteína específica.

***Haploide*:** término que se aplica a una célula que contiene la mitad de cromosomas de la especie. En humanos, el ovocito y el espermatozoide se reproducen por un proceso denominado meiosis, que permite que al final de su formación tengan 23 cromosomas (n), para que al unirse se duplique el número de cromosomas a 46 (2n), que son el complemento cromosómico de una célula somática humana.

***Histonas*:** proteínas altamente básicas que forman un octámero para enrollar sobre ésta al ADN.

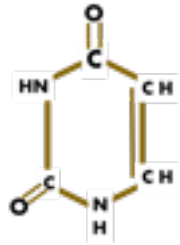
***Matriz nuclear*:** estructura proteica que proporciona soporte físico a los componentes nucleares.

***nm*:** nanómetro, unidad de medida que corresponde a la milésima parte de una micra, una millonésima de metro o 1 x 10-9 m o 0.000,000,001 m. Imagina el espacio que existe en una regla entre un milímetro y el siguiente; ahora divídelo en mil partes iguales, con lo que tienes una micra. Toma el espacio entre una micra y la siguiente y vuelve a dividirla en mil partes, ahora tienes un nanómetro.

***Polímero*:** proviene de *poli*, muchos, y *mero*, que puede entenderse como unidades o partes; es una estructura constituida por una unidad base que se repite muchas veces.

***Toroide*:** superficie de una curva que gira en un eje en su mismo plano y que no la corta.

***Uracilo*:** base nitrogenada que se encuentra en el ARN.



Referencias

Balhorn, D. (2007). The protamine family of sperm nuclear proteins. *Genoma Biology*, 8, 227. Recuperado de http://genomebiology.com/8/9/227

Darszon, A. (2018). Viaje al centro del óvulo. *UNA Mirada a la ciencia*. Recuperado de http://www.unamiradaalaciencia.unam.mx/download/pdf_prensa/unamirada_156.pdf

Dixon, G. H., Aiken, J. M., Jankowski, J. M., McKenzie, D. I. *et al.* (1985). Organization and evolution of the protamine genes of salmonid fishes. En Reeck, G., Goodwin, G. & Puigdomenech, P. (eds.), *Chromosomal proteins and gene expression* (pp. 287-314). NY, EUA: Plenum.

Fuentes-Mascorro, G. (2000). *Mecanismos de estructuración de la cromatina del espermatozoide de toro*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hertig, A. T. & Adams, E. C. (1967). Studies on the human oocyte and its follicle. *The Journal of Cell Biology*, 34, 674-5.

Oliva, R. & Dixon, G. H. (1989). Chicken protamine genes are intronless. *Journal Biological Chemistry*, 264,12472-81.

Reeves, R. H., Gearhart, J. D., Hecht, N. B., Yelick, P. C. *et al.* (1989). The gene encoding protamine I is near proximal end of mouse chromosome 16 where it is tightly linked to the gene encoding protamine 2. *Journal Heredity*, 80, 442-446.

Salazar Montes, A., Sandoval Rodríguez, A. & Armendáriz Borunda, J. (2013). Biología molecular. *Fundamentos y aplicaciones en las ciencias de la salud*. Recuperado de http://dipsa.com/ClanDunant/Textos/TUM%20-%20Biolog%C3%ADa%20molecular%20Fundamentos%20y%20aplicaciones%20en%20las%20ciencias%20de%20la%20salud%20-%20Salazar.pdf

Salvador, Z. (2017). *¿Cómo es el espermatozoide? Formación, partes y función*. Recuperado de https://www.reproduccionasistida.org/espermatozoide/

Vicente, R. C. (2011). *Biocuriosidades. ¿Cuánto mide un cromosoma humano?* Recuperado de http://candidoweb-biocuriosidades.blogspot.mx/2011/06/cuanto-mide-un-cromosoma-humano.html

La pieza intermedia

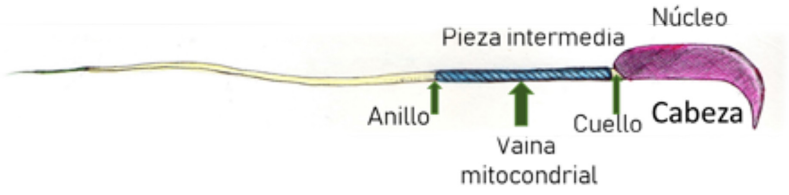
Gisela Fuentes-Mascorro[1*]

Fecha de recepción: 16 diciembre de 2017
Fecha de aceptación: 16 de febrero de 2018

La pieza intermedia, también conocida como pieza media, corresponde a la región del espermatozoide que se localiza posterior al núcleo (Figura 1). Se forma durante la espermiogénesis, que consiste en la transformación de una célula haploide redonda denominada espermátida en una célula con forma diferente, alargada, diseñada para llevar la información genética del padre hasta el ovocito materno, viajando por medios líquidos con diferente viscosidad (Figura 2).

Palabras clave: Mitocondrias espermáticas, fosa de implantación.

Figura 1. Ubicación de la pieza intermedia

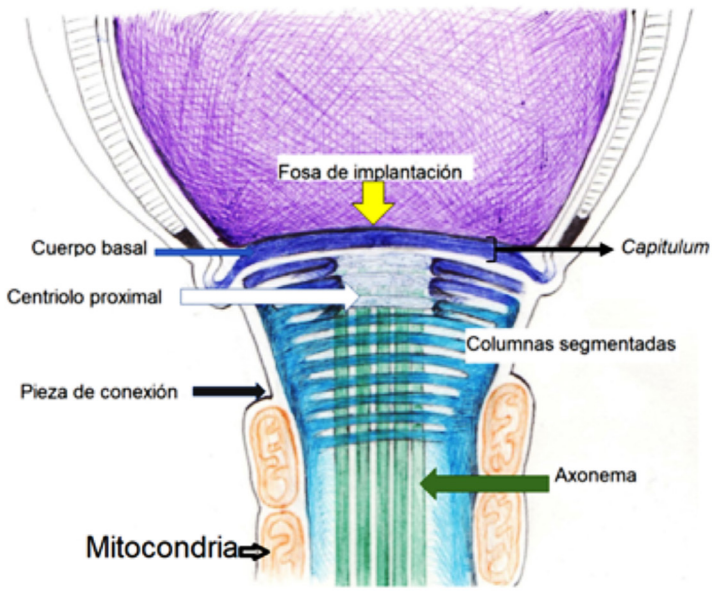


Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

1 Laboratorio de Investigación en Reproducción Animal (LIRA), Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca. *Correo electrónico: lirauabjo@gmail.com

En esta región se puede identificar el cuello, la vaina mitocondrial y el anillo. En la parte posterior del núcleo se ubica la fosa de implantación, una invaginación en la membrana nuclear, enseguida se localiza el cuerpo o plato basal, que recubre la membrana nuclear exterior (Yuan *et al.*, 2015), y el centriolo proximal que queda rodeado por las columnas segmentadas, que son nueve estructuras cilíndricas formadas a partir del material pericentriolar las cuales se fusionan cranealmente para formar el capitulum, manteniéndose unidos a la membrana basal. Hacia el final de cada columna segmentada se continúa con una de las nueve fibras densas externas, que se asocian con los dobletes microtubulares del axonema en crecimiento (Cosson, 2013; Yuan *et al.*, 2015), quedando unidos el núcleo y el axonema en lo que se denomina "pieza de conexión", que por su rigidez reduce el movimiento en esta zona y permite que se origine la curvatura flagelar (De Calvo, 2008) (Figura 2).

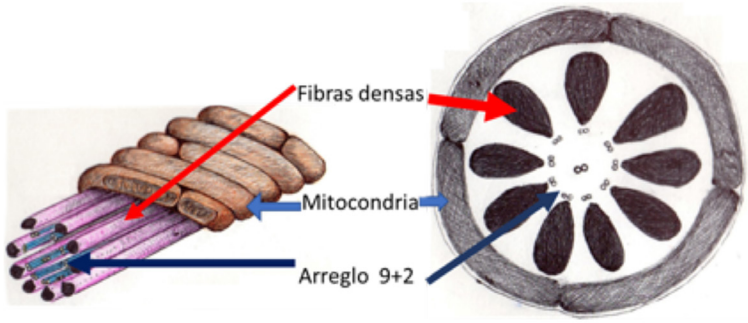
Figura 2. Esquematización de las estructuras del cuello



Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

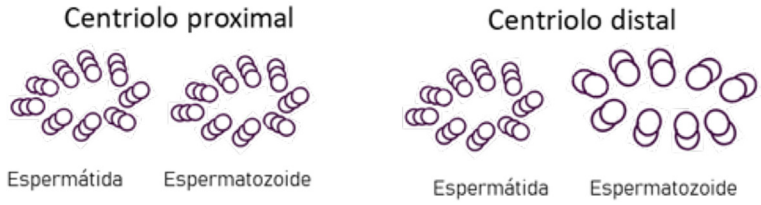
Del centriolo distal se forman los dobletes microtubulares con la formación 9 + 2, que se conoce como axonema (Avidor-Reiss, 2018), y se ubica en el centro de la estructura flagelar, así como las fibras densas que los rodean. Toda esta estructura es cubierta por la hélice de mitocondrias (Figuras 3 y 4) (Piomboni, Focarelli, Stendardi, Ferramosca & Zara, 2012; Yuan *et al.*, 2015).

Figura 3. Ubicación de los componentes de la pieza intermedia



Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

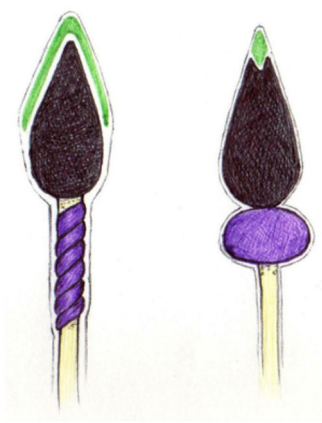
Figura 4. Composición de microtúbulos, el centriolo proximal conserva conjuntos de tres microtúbulos y el centriolo distal en el espermatozoide conjuntos de 2 microtúbulos



Fuente: Gisela Fuentes-Mascorro.

Vaina mitocondrial. En el punto en que las columnas segmentadas se continúan con la fibra densa externa da inicio la vaina mitocondrial, constituida por la fuerte unión entre las mitocondrias y el material citoplásmico que las rodea, constituida en el caso del espermatozoide de erizo por una sola mitocondria (Figura 5) (Cosson, 2013); cuando el número es mayor se forma una hélice mitocondrial, que en humanos tiene de 12 a 15 vueltas y dos mitocondrias por vuelta (De Calvo, 2008). Estas mitocondrias están sumergidas en unas fibras de proteínas llamadas retículo submitocondrial, que en conjunto están rodeadas por otra estructura proteínica llamada cápsula mitocondrial (Olson & Winfrey, 1990; Hu *et al*, 2017). Ambas le dan protección y mantienen aisladas a las mitocondrias en la pieza media.

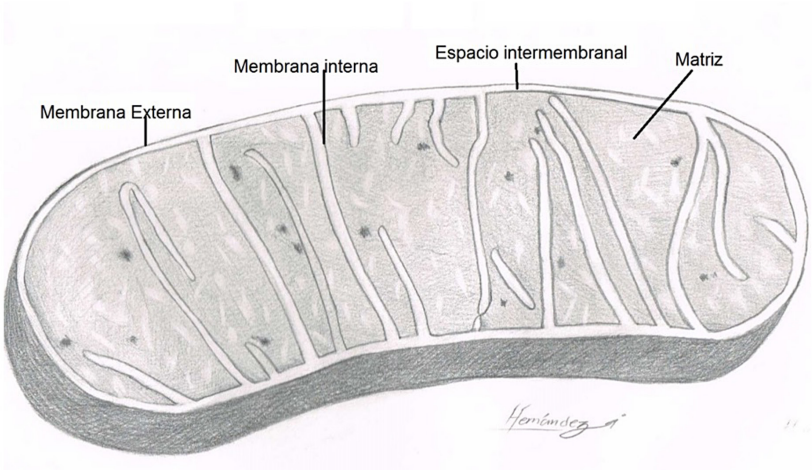
Figura 5. A la izquierda se aprecia la vaina mitocondrial en hélice del espermatozoide de humano y a la derecha la mitocondria del espermatozoide de erizo de mar



Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

Estructuralmente, la mitocondria está constituida por cuatro compartimentos: la membrana externa, la membrana interna, un espacio intermembranas y la matriz (Figura 6), es el único organelo que incluye su propio ácido desoxirribonucleico ADNm, que presenta los genes de proteínas empleadas en su interior. Dentro de la mitocondria se realiza un gran número de procesos metabólicos, como la fosforilación oxidativa y el ciclo de Krebs, entre otros. Las mitocondrias participan en la diferenciación celular, la apoptosis, señalización con calcio, la producción de especies reactivas de oxígeno, además, algunas de las enzimas tienen isoformas que sólo se encuentran en las mitocondrias del espermatozoide (Piomboni *et al.*, 2012).

Figura 6. Compartimentos mitocondriales



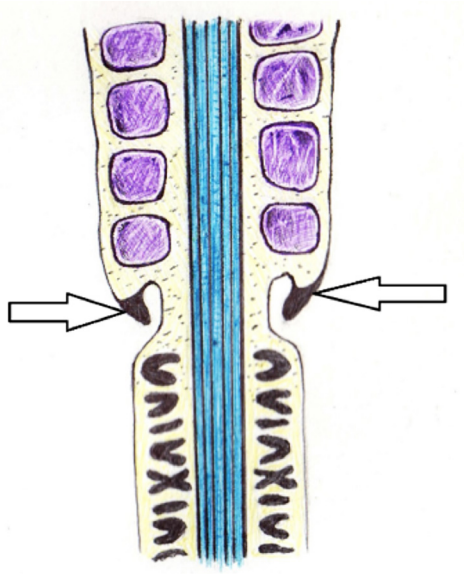
Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

Los procesos de mayor trascendencia para el espermatozoide que se llevan a cabo en la mitocondria son:

a). Respiración celular, que implica tres etapas: la oxidación del piruvato, el ciclo de Krebs y la fosforilación oxidativa, que producen Adenosín trifosfato (ATP).
b). Producción de especies reactivas de oxígeno, como consecuencia de la respiración; el equilibrio que guardan estas sustancias con las enzimas antioxidantes es clave en los procesos del espermatozoide.
c). Reservas de calcio y la regulación de su salida o ingreso a la célula, que permitirán al espermatozoide completar procesos indispensables para la fertilización del ovocito.

Anillo. Esta estructura se compone de septinas, que son proteínas que se unen a la membrana espermática y el citoesqueleto (Palander, El-Zeiry y Trimble, 2017), por lo que conforme el flagelo va creciendo, se desplaza para finalmente delimitar la pieza media de la pieza principal, sirve como barrera para evitar el desplazamiento de proteínas del dominio membranal de la pieza media hacia la principal (Kwitny, Klaus y Hunnicutt, 2010), previene el desplazamiento caudal de la cubierta mitocondrial. También, a nivel del anillo terminan dos de las nueve fibras densas; las siete restantes se continúan hacia la pieza principal (Figura 7).

Figura 7. Las flechas indican la posición de las septinas que forman el anillo



Fuente: Ilustración de Ismael Hernández Hernández (LIRA-UABJO).

Glosario

Capitulum: también se encuentra como *capitolium*, palabra en latín *capitolĭum*, nombre de una de las colinas de la antigua Roma donde se ubicaba el centro religioso y político. Este término se relaciona con *caput* y *capitis*, por lo que se puede entender como encabezamiento o encabezado en una página y para el espermatozoide se asigna al final de la cabeza y el inicio del flagelo.

Centriolos: organelos celulares que están compuestos de nueve fibras triples, que forman un tubo hueco de 27 microtúbulos unidos entre sí; se encuentran en pareja, en forma perpendicular.

Espermiogénesis: proceso mediante el cual la espermátida redonda y haploide se transforma en espermatozoide.

Haploide: células que sólo tienen un conjunto completo de cromosomas, corresponden al ovocito y al espermatozoide. Por ejemplo: los humanos presentan 23 pares de cromosomas, el ovocito y el espermatozoide únicamente tienen 23 cromosomas.

Retículo submitocondrial: red formada por la unión existente entre las mitocondrias de la pieza media, para mantenerse unidas.

Viscosidad: propiedad de los líquidos que consiste en la resistencia natural a fluir debido a la distancia que existe entre sus moléculas.

Referencias

Avidor-Reiss, T. (2018). Rapid evolution of sperm produces diverse centriole structure that reveal the most rudimentary structure needed for function. *Cells*, 7(7), E67.

Cosson, J.J. (2013). The sperm movement energizer. En *Adenosine triphosphate: chemical properties, biosynthesis and functions in cells* (pp 1-46). Recuperado de frov.jcu.cz/files/recentni_publikace/Cosson_Book_Chapter.pdf

De Calvo, P.L. (2008). Fisiopatología endocrina. El Espermatozoide: de *Sertoli al ovocito*, 16(5), 1-15.

Holstein, A. F., Schulze W. & Davidoff, M. (2003). Understanding spermatogenesis is a prerequisite for treatment. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 1-17

Hu, J. L, Sun, J., Chen, W., Yang, Y., Xu, Y., Wu, Y., Sun, X. W. & Li, Z. (2017). Capsule enhances sperm mitochondrial membrane potential in asthenozoospermia patients. *Zhonghua Nan Ke Xue, 23*(12), 1116-1120.

Kwitny, S., Klaus, A. V. & Hunnicutt, G. R. (2010). The Annulus of the Mouse Sperm Tail Is Required to Establish a Membrane Diffusion Barrier That Is Engaged During the Late Steps of Spermiogenesis. *Biology of Reproduction,* (82), 669-678.

Olson, G. E & Winfrey, V. P. (1990). Mitochondria-cytoskeleton interactions in the sperm midpiece. *HYPERLINK "https://www.sciencedirect.com/science/journal/10478477" Journal of Structural Biology, 103*(1),13-22.

Palander, O., El-Zeiry M & Trimble, W. S. (2017). Uncovering the roles of septins in cilia. *Frontiers in cell and developmental Biology*, 5, 1-7.

Piomboni, P., Focarelli, R., Stendardi, A., Ferramosca, A. & Zara V. (2012). The role of mitocondria in energy production for human sperm motility. I*nternational Journal of Andrology*, 35, 109-124.

El flagelo

Ernesto Rodríguez-Tobón,[1]
Víctor Manuel Montesino-Fuentes[1] y Edith Arenas-Ríos[1]*

Fecha de recepción: 25 de noviembre de 2017
Fecha de aceptación: 16 de febrero de 2018

Palabras clave:
espermatozoide, cola, movimiento.

Estructura y función
Generalidades

El espermatozoide humano tiene una longitud aproximada de 60 micrómetros (µm), de la cual el flagelo abarca 50 µm; el diámetro es de 1 µm. Durante su formación, unos microtúbulos llamados centriolos (por su semejanza a cilindros huecos) van a originar al flagelo durante el proceso de diferenciación, que consiste en la modificación de una célula redonda a la célula que conocemos como el espermatozoide *per se* (Toshimori & Eddy, 2015).

El flagelo del espermatozoide es una estructura que le otorga capacidad de desplazamiento, a través de movimientos ondulatorios que generan propulsión. Para comprender mejor la función del flagelo es necesario poner atención en las diferentes secciones en las que éste se encuentra dividido (Toshimori & Eddy, 2015), que principalmente son cuatro segmentos: pieza de conexión o cuello, pieza media, pieza principal y pieza final (Figura 1) (Toshimori & Eddy, 2015).

1 Departamento de Biología de la Reproducción UAM- Iztapalapa, Ciudad de México. *Autora de correspondencia, correo electrónico: editharenas2000@yahoo.com.mx

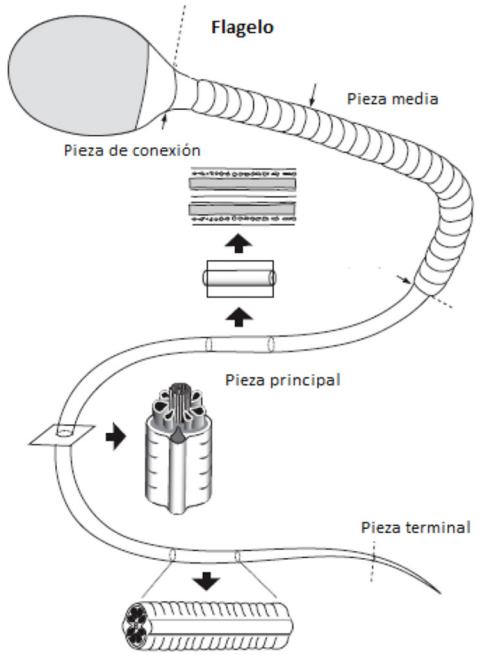


Figura 1. Estructura del espermatozoide. La imagen muestra de forma general sus distintas partes: cabeza, pieza de conexión o cuello, flagelo, pieza media, pieza principal y pieza final

Fuente: Adaptado de Toshimori & Eddy, 2015.

El axonema

El axonema es la estructura central y motora que propicia el movimiento del flagelo. El axonema se extiende desde la pieza de conexión hasta la pieza terminal; su composición está dada por microtúbulos, los cuales están constituidos por proteínas llamadas tubulinas. Los microtúbulos tienen una conformación nueve más dos (9 + 2), es decir, nueve pares de microtúbulos (A y B) rodean un par central. Cada par de microtúbulos se une entre sí, anclándose a cada microtúbulo A, a partir de una proteína que le proporciona soporte y elasticidad llamada nexina (Inaba, 2011).

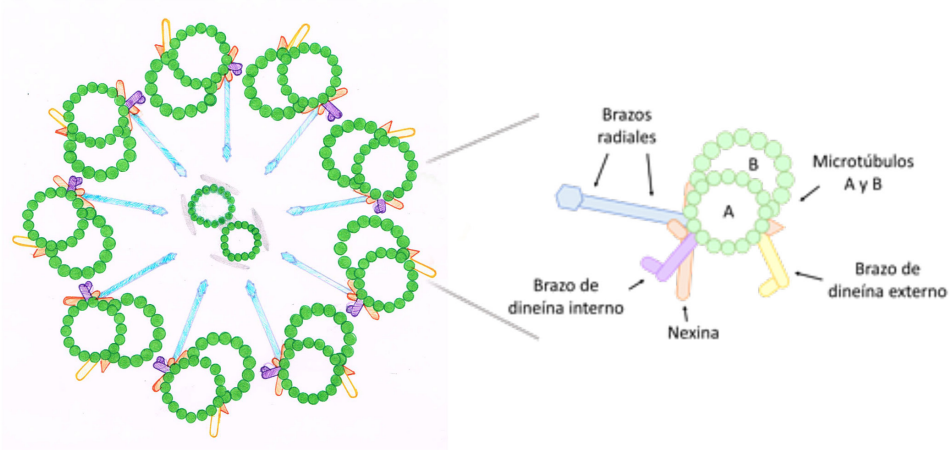
Otros componentes que brindan soporte al axonema son los brazos radiales, los cuales son puentes en forma de "T" que están unidos al microtúbulo A en cada par; apuntan hacia el par central del axonema, anclándose en la vaina proteica que lo rodea (Inaba, 2011).

La estructura del axonema tiene un complejo de 10 cadenas de proteínas, de las cuales se diferencian un brazo de dineína externo y un brazo de dineína interno (Gagnon & De Lamirande, 2006).

La dineína se encuentra anclada en los microtúbulos A; la dineína externa se encarga de determinar la velocidad máxima de desplazamiento, mientras que

la interna proporciona la forma de la onda flagelar, regula la simetría y, además, aporta la fuerza adicional para mantener la velocidad del espermatozoide. Por lo tanto, la dineína tiene un papel fundamental en el movimiento flagelar, ya que es la responsable de la conversión de energía química (ATP) en mecánica para la movilidad (Figura 2) (Gagnon & De Lamirande, 2006).

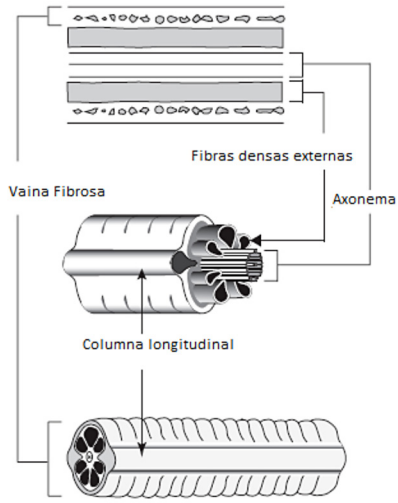
Figura 2. Axonema. Conformación estructural del axonema, compuesta por nueve pares de microtúbulos y uno central (9 + 2), conexiones de nexina entre cada microtúbulo A y brazos radiales, conectando el par central y de brazos de dineínas para generar movimiento flagelar



Fuente: Tomado y modificado de Gagnon & De Lamirande, 2006.

El axonema está rodeado por unas proteínas llamadas fibras densas externas y por la vaina fibrosa; sin embargo, no cubren al axonema en todo el flagelo, sino que se limitan a determinadas regiones, por lo que la pieza final carece tanto de fibras densas externas como de vaina fibrosa (Figura 3) (Gaffney, Gadêlha, Smith, Blake & Kirkman-Brown, 2011).

Figura 3. Componentes estructurales dentro del flagelo. Las principales estructuras son el axonema, la vaina mitocondrial, las fibras densas externas y la vaina fibrosa



Fuente: Adaptado de Toshimori & Eddy, 2015.

Principales secciones del flagelo

La pieza de conexión o cuello, como su nombre lo indica, conecta la parte posterior de la cabeza con la pieza media del flagelo. En esta sección el axonema está rodeado por las fibras densas externas.

La pieza media del flagelo se caracteriza por la presencia de mitocondrias, cada espermatozoide contiene aproximadamente de 75 a 100 de ellas; estos organelos son los encargados de la generación de energía o –en el caso particular del espermatozoide– pudieran tener como función principal la producción de las especies reactivas de oxígeno, que sirven como señalizadores para activar procesos importantes del espermatozoide, incluyendo la movilidad.

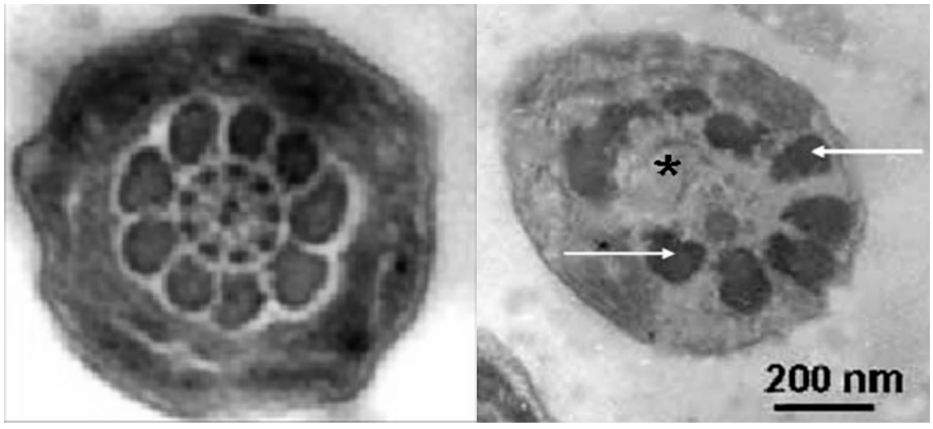
Las mitocondrias, en el espermatozoide, adquieren una conformación helicoidal, necesaria para la movilidad del flagelo; sin embargo, durante la fertilización, las mitocondrias del espermatozoide (con ADN mitocondrial paterno) son eliminadas por proteínas que las degradan dentro del ovocito. El espermatozoide tiene una estructura que permite separar la pieza media de la principal, llamado anillo de Jensen. La pieza principal del flagelo está rodeada por fibras densas externas y vaina fibrosa que le proporcionan protección, soporte y flexibilidad (Sutovsky & Manandhar, 2006).

Además, las proteínas dentro de la vaina fibrosa aportan proteínas cinasas necesarias para el buen funcionamiento de los espermatozoides. La pieza final del flagelo solo está compuesta por el axonema; las fibras densas externas y la vaina fibrosa están ausentes en esta parte (Sutovsky & Manandhar, 2006).

Anormalidades

La formación de axonema es un proceso de diferenciación complejo; debido a esto, es importante mencionar que existen defectos en su estructura y función, como ausencia o exceso de microtúbulos externos o centrales, la falta o un número reducido de brazos de dineína (interna y/o externa), así como la ausencia de brazos radiales o enlaces de nexina, lo que trae como consecuencia un movimiento del flagelo anormal o nulo, conocido como discinesia primaria flagelar o síndrome de Kartagener, lo cual provoca infertilidad en el individuo (Figura 4) (Jurado, Stornelli, Peralta & Stornelli, 2009; Lee, 2011).

Figura 4. Malformación de axonema. La imagen muestra dos cortes transversales de flagelo; En la izquierda se aprecia un axonema normal; a la derecha aparee un axonema anormal con ausencia de flagelo (*) y disminución en el número de fibras densas externas (flechas)



Fuente: Adaptado de Jurel *et al.*, 2009.

Función

Los espermatozoides experimentan dos tipos de movilidad: progresiva e hiperactiva, esta última capacidad es adquirida después de que abandonan el testículo, pero no se moverán sino hasta que son eyaculados (Eddy, 2006).

Ahora bien, la movilidad progresiva se caracteriza por un movimiento flagelar vigoroso y relativamente simétrico, dando como resultado un avance rápido y hacia adelante; sin embargo, después de un periodo (el cual puede variar entre especies) en el tracto reproductivo femenino, los espermatozoides muestran

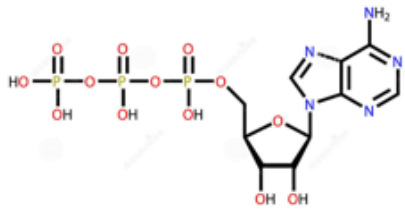
una movilidad hiperactivada, la cual se distingue por una gran amplitud del batido flagelar, curvaturas asimétricas del flagelo y una trayectoria circular y errática (Eddy, 2006).

El motivo de la hiperactivación es que el espermatozoide debe tener la fuerza para penetrar una capa de células que rodean al ovocito, así como una capa de proteínas que lo recubren, hasta que su membrana toque la del óvulo (Tulsiani, 2006). Para inducir la hiperactivación se requiere Ca^{2+} (como el que contiene la leche), ya que este comportamiento del flagelo se debe a que el Ca^{2+} se une a proteínas fijadoras en el brazo externo de la dineína, la cual se encuentra en la parte interna del flagelo (Inaba, 2003). La dineína, como se explicó anteriormente, es la responsable de la conversión de energía química a partir de la hidrólisis de ATP en energía mecánica para la movilidad (Gagnon & De Lamirande, 2006)

Glosario

ADN: Ácido desoxirribonucleico; contiene la información genética y es lo que forma los cromosomas.

ATP: molécula básica de energía celular, como la gasolina para los autos. Los enlaces entre los grupos fosfatos son de alta energía, por lo que se consideran almacenes energéticos. Para hacer uso de la energía del enlace se requiere la ayuda de enzimas, que acceden a estas cantidades de energía.



Fuente: Tomada de Andronov, 2017.

Dineína: proteína que, por su flexibilidad, permite que se realice la curvatura del flagelo.

Microtúbulo: estructura tubular de la célula, cuya longitud máxima son los micrómetros.

Proteínas cinasas: también llamadas quinasas, son proteínas que adicionan grupos fosfatos a otras moléculas, por lo que las cinasas catalizan reacciones de fosforilación.

µm: el micrómetro es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro.

Referencias

Andronov, L. ATP no. 28237747. Dreamstime.com. Recuperado de https://es.dreamstime.com/fotograf%C3%ADa-de-archivo-libre-de-regal%C3%ADas-f%C3%B3rmula-estructural-del-trifosfato-de-adenosina-atp-image28237747

Eddy, E. M. (2006). The spermatozoon. En J. D. Neill (ed.), *Knobil and Neill's physiology of reproduction*, (pp. 3-54). St. Louis: Elselvier Academic Press.

Gaffney, E., Gadêlha, H., Smith, D., Blake, J. & Kirkman-Brown, J C. (2011). nMammalian sperm motility: observation and theory. *Annual Review of Fluid Mechanics,* 43, 501-28. Recuperado de http://eprints.maths.ox.ac.uk/1355/1/mammalian_sperm_motility.pdf

Gagnon, C. & De Lamirande, E. (2006). Controls of sperm motility. En C. J. De Jonge & C. L. R. Barratt (eds.), *The sperm cell, Production, Maduration, Fetilization, Regulation.* Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Inaba, K. (2003). Molecular architecture of the sperm flagella: molecules for motility and signaling. *Zoological Science*, 20, 1043-1056. Recuperado de 9/zsj.20.1043/Molecular-Architecture-of-the-Sperm-Flagella--Molecules-forMotility/10.2108/zsj.20.1043.full

Inaba, K. (2011). Sperm flagella: comparative and phylogenetic perspectives of protein components. *MHR: Basic Science of Reproductive Medicine, 17*(8), 524-38. Recuperado de: https://academic.oup.com/molehr/article/17/8/524/1073668

Jurado, S., Stornelli, M., Peralta, R. & Stornelli, M. (2009). Impact of cyclophosphamide, vincristine and doxorubicin administration on the spermatic morphology in a dog. *Acta Microscópica, 18*(3), 269-277. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/287296702_Impact_of_cyclophosphamide_vincristine_and_doxorubicin_administration_on_the_spermatic_morphology_in_a_dog

Lee, L. (2011). Mechanisms of mammalian ciliary motility: Insights from primary ciliary dyskinesia genetics. *Gene, 473*(2), 57-66. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378111910004324?via%3Dihub

Sutovsky, P. & Manandhar, G. (2006). Mammalian spermatogenesis and sperm structure: anatomical and compartmental analysis. T*he sperm cell: production, maturation, fertilization, regeneration*, 1-30. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286156060_Mammalian_spermatogenesis_and_sperm_structure_Anatomical_and_compartmental_analysis

Toshimori, K. & Eddy, E. M. (2015). The permatozoon. En K*nobil and Neill's physiology of reproduction* (pp. 99-148). Lugar: editorial.

Tulsiani, D. R. P. (2006). Glycan-modifying enzymes in luminal fluid of the mammalian epididymis: An overview of their potential role in sperm maturation. M*olecular and Cellular Endocrinology, 250*(1-2), 58-65. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303720705004715?via%3Dihub

Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca
1955
CIENCIA·ARTE·LIBERTAD

www.uabjo.com.mx

Universidad Autónoma ¨Benito Juarez¨ de Oaxaca
Av. Universidad S/N, Cinco Señores, Oaxaca, Méx.
C.P. 68120, Tels. 01 (951) 502 0700 ext. 20148