

## Capítulo 50. La continuidad de la vida I: Reproducción

Existe una enorme diversidad en los patrones de reproducción y de ciclos de vida en el reino animal. La mayoría de los vertebrados -y todos los mamíferos- tienen reproducción sexual -que implica la meiosis y la fecundación -.

En la mayoría de las especies de peces y en los anfibios, y en muchos invertebrados, la fecundación es externa. Entre los organismos que depositan huevos amniotas, la fecundación es interna. La fecundación también es interna entre los mamíferos marsupiales y placentarios, en los cuales el embrión se desarrolla dentro de la madre y es nutrido por ella.

Los vertebrados se caracterizan por tener reproducción sexual e implica a dos progenitores. Los gametos masculinos y femeninos se forman por meiosis en las gónadas .

El sistema reproductor masculino consta de los órganos sexuales primarios y las estructuras sexuales secundarias. Los primeros son los testículos y las segundas incluyen a los conductos genitales y excretorios, a las glándulas anexas y al pene.

La producción de espermatozoides y el desarrollo de las características sexuales secundarias masculinas están bajo control de hormonas, incluyendo la hormona liberadora de gonadotropina, las gonadotropinas LH y FSH y la testosterona. El sistema reproductor femenino incluye a los ovarios, el útero, la vagina y los genitales externos.

Los ovarios son los órganos productores de gametos femeninos y los ovocitos primarios se desarrollan dentro los folículos.

La producción de ovocitos y la preparación del endometrio para la implantación del embrión son cíclicos. El ciclo reproductor, que se conoce en los seres humanos como ciclo menstrual, es controlado por hormonas que incluyen la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH), las hormonas gonadotróficas FSH y LH y los estrógenos y progesterona (las hormonas sexuales femeninas).

Para que ocurra la fertilización, se debe producir un encuentro entre un ovocito y un espermatozoide capacitado. Para fertilizar un ovocito, los espermatozoides deben sufrir un proceso denominado capacitación, atravesar las células de la granulosa, unirse a la zona pelúcida, penetrar esa zona y fusionarse con la membrana del ovocito. Como consecuencia, el ovocito se activa, se libera el segundo cuerpo polar y se forman los pronúcleos de ambos gametos. Finalmente, se produce una asociación de los cromosomas parentales, proceso denominado singamia .

Se dispone de una variedad de métodos anticonceptivos para las parejas que desean evitar o diferir el embarazo. Entre ellos, se cuentan los llamados métodos de barrera, como el diafragma y el condón. En las décadas de 1960 y 1970, muchas parejas abandonaron los métodos de barrera y se generalizó el uso de la "píldora". Sin embargo, en los últimos años, el diafragma y el condón se han vuelto a utilizar debido a su efectividad en la prevención de enfermedades de transmisión sexual.

En muchas ocasiones, se presentan tanto en el hombre como en la mujer, patologías que dificultan o impiden un embarazo natural. La reproducción asistida abarca un conjunto de procedimientos en los cuales el equipo médico colabora en el encuentro de los gametos femenino y masculino cuando éste no puede producirse naturalmente.

### El sistema reproductor masculino

El sistema reproductor masculino consta de los órganos sexuales primarios -los testículos- y las estructuras sexuales secundarias -los conductos genitales y excretorios, las glándulas anexas y el pene.

Los espermatozoides son producidos en los túbulos seminíferos de los testículos. Durante la formación del espermatozoide, las espermatogonias se transforman en espermatozoides primarios; luego,

después de la primera división meiótica, en espermatoцитos secundarios, y después de la segunda división meiótica, en espermátidas, que más tarde se diferenciarán en espermatozoides. Estos espermatozoides entran en el epidídimo, un tubo fuertemente enrollado que está sobre el testículo, donde adquieren movilidad progresiva y habilidad fertilizante potencial. Cada epidídimo se continúa en un vaso deferente, que corre a lo largo de la pared posterior de la cavidad abdominal, alrededor de la vejiga, y desemboca en la glándula próstata. Justo antes de entrar en la próstata, los dos vasos deferentes se fusionan con conductos de las vesículas seminales y luego, dentro de la próstata, con la uretra, que lleva al exterior a través del pene.

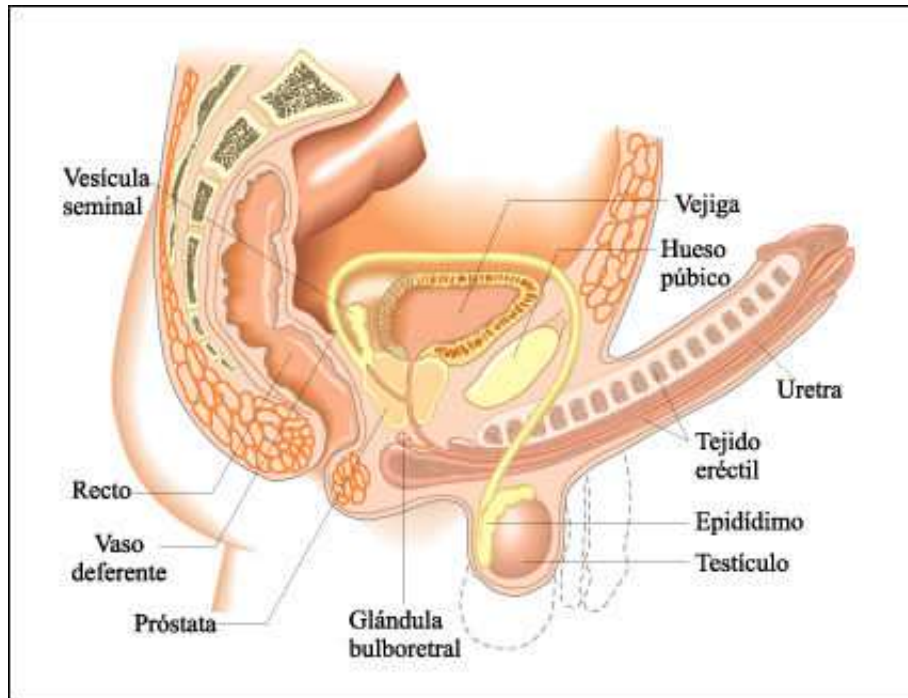
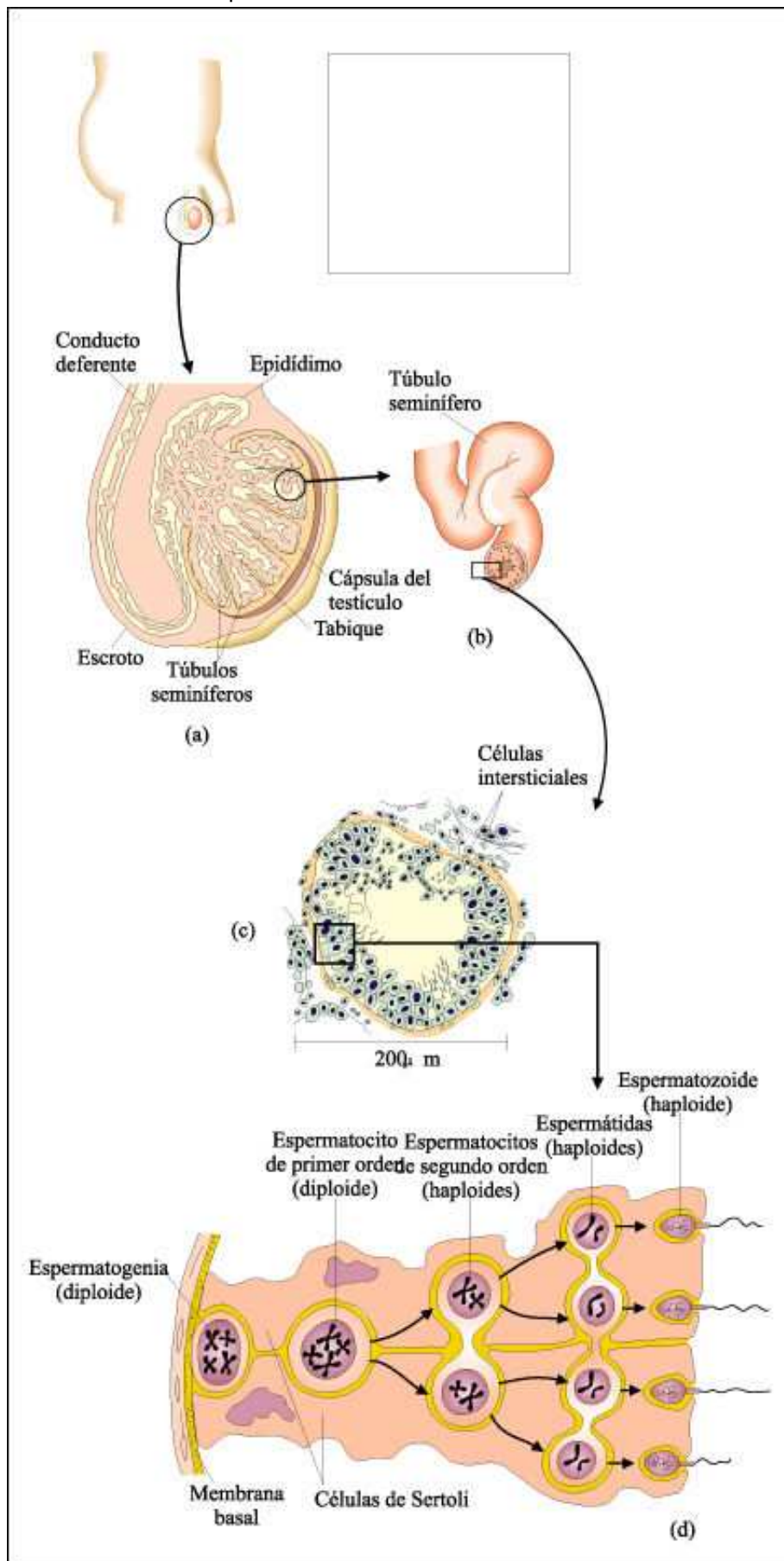


Diagrama del tracto reproductor masculino de los seres humanos

El diagrama anterior muestra el pene y el escroto antes (líneas punteadas) y durante la erección. Los espermatozoides formados en los túbulos seminíferos entran en el epidídimo. Desde allí pasan al vaso deferente, donde muchos se almacenan. El vaso deferente se fusiona con un conducto de la vesícula seminal y dentro de la próstata se une con la uretra. Los espermatozoides son mezclados con fluidos provenientes de la vesícula seminal y de la glándula próstata y se forma el semen que es liberado del pene a través de la uretra. La uretra también es un pasaje para la orina que se acumula en la vejiga.



Viaje por un túbulo seminífero.

- a) Corte de un testículo con los túbulos seminíferos densamente replegados -donde se forman los espermatozoides- y el epidídimo -donde los espermatozoides maduran y adquieren movimiento-. b) Micrografía electrónica y un esquema de un corte transversal de túbulo seminífero. c) Espermatozoides en distintas etapas de desarrollo. Las células intersticiales, que se encuentran en el tejido conectivo entre los túbulos son fuente de testosterona. d) Formación del esperma.

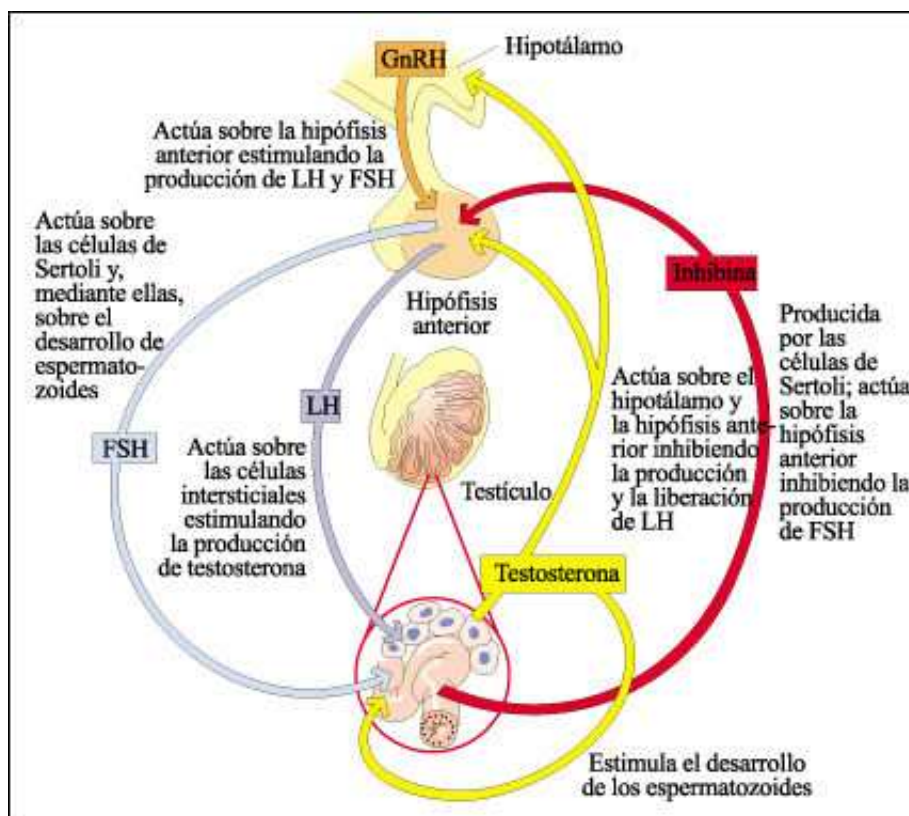
El pene está compuesto por tejido esponjoso eréctil que puede congestionarse con sangre, aumentando de tamaño y endureciéndose. En el momento de la eyaculación, los espermatozoides son expulsados a lo largo de los vasos deferentes por las contracciones de una cubierta envolvente de músculo liso. Cuando los espermatozoides se desplazan hacia la uretra, se le añaden secreciones provenientes de las vesículas seminales, la próstata y las glándulas bulbouretrales. La mezcla resultante, el semen, es expulsada de la uretra por contracciones musculares que implican, entre otras estructuras, la base del pene. Estas contracciones musculares también contribuyen a las sensaciones del orgasmo.

Los testículos son también la fuente principal de hormonas masculinas, conocidas colectivamente como andrógenos. El principal andrógeno, la testosterona, es necesario para la formación de los espermatozoides y es producido por las células intersticiales de los testículos y por la corteza suprarrenal.

Los andrógenos son producidos ya en el desarrollo embrionario temprano, haciendo que el feto masculino se desarrolle como macho. Después del nacimiento, la producción de andrógenos continúa en un nivel muy bajo hasta que el niño tiene aproximadamente 10 años. Ocurre luego un incremento en la testosterona, dando como resultado que comience la producción de espermatozoides (al comienzo de la pubertad) acompañado por el agrandamiento del pene y de los testículos, y también de la próstata y otros órganos accesorios. En el varón sano, un nivel elevado de producción de testosterona continúa hasta la cuarta década de vida, y luego comienza a declinar gradualmente.

La producción de testosterona es regulada por un sistema de retroalimentación negativa que implica, entre otros, a una hormona gonadotrófica, la hormona luteinizante (LH). La LH es producida en la hipófisis bajo la influencia del hipotálamo. En los tejidos intersticiales de los testículos estimula la salida de testosterona.

Los testículos están también bajo la influencia de otra hormona hipofisaria, la hormona foliculoestimulante (FSH) que actúa sobre las células de Sertoli de los testículos y, a través de ellos, sobre los espermatozoides en desarrollo. Existe una hormona proteica, la inhibina, secretada por las células de Sertoli que inhibe la producción de FSH.



La producción de hormonas que actúan sobre el testículo está regulada por un sistema de retroalimentación negativa.

muchos animales, la producción de hormona masculina es provocada por estímulos ambientales y cambios estacionales.

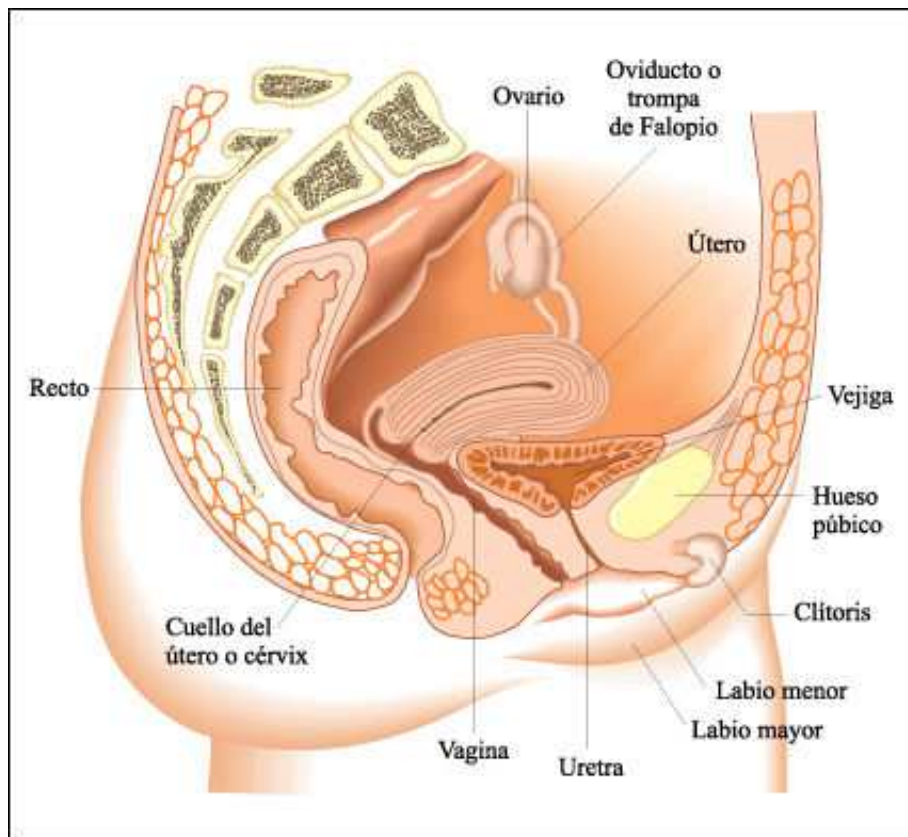
En el varón, la testosterona influye también en el desarrollo de las características sexuales secundarias. También es responsable de una variedad de patrones de comportamiento de cortejo de muchos animales machos y de varias formas de agresión hacia otros machos que se observan en muchísimas especies de vertebrados.

## El sistema reproductor femenino

El sistema reproductor femenino incluye a los órganos productores de gametos, los ovarios. Los ovocitos, a partir de los cuales se desarrollan los óvulos, se encuentran en la capa externa del ovario. Otras estructuras importantes son los oviductos, el útero, la vagina y la vulva. El útero es un órgano hueco, muscular, en forma de pera, de tamaño ligeramente inferior al puño y está tapizado por el endometrio. Tiene dos capas principales, una de las cuales es expulsada durante la menstruación, mientras la otra es aquella a partir de la que se regenera la capa eliminada. Los músculos lisos de las paredes del útero se mueven en ondas continuas. El esfínter muscular que cierra la abertura del útero es el cérvix (cuello), por donde pasan los espermatozoides en su camino hacia el ovocito. En el momento del nacimiento, el cuello se dilata y permite la salida del feto.

La vagina es un tubo muscular que comunica el cuello del útero con el exterior del cuerpo. Es el órgano receptivo para el pene y también el canal de parto y su interior es ligeramente ácido.

Los órganos genitales externos de la mujer, el clítoris, homólogo al pene del varón, y los labios, se conocen colectivamente como la vulva. Al igual que el pene, está compuesto principalmente por tejido eréctil. Los labios encierran y protegen las estructuras subyacentes más delicadas (embrionariamente son homólogos al escroto del macho).



Órganos reproductores femeninos.

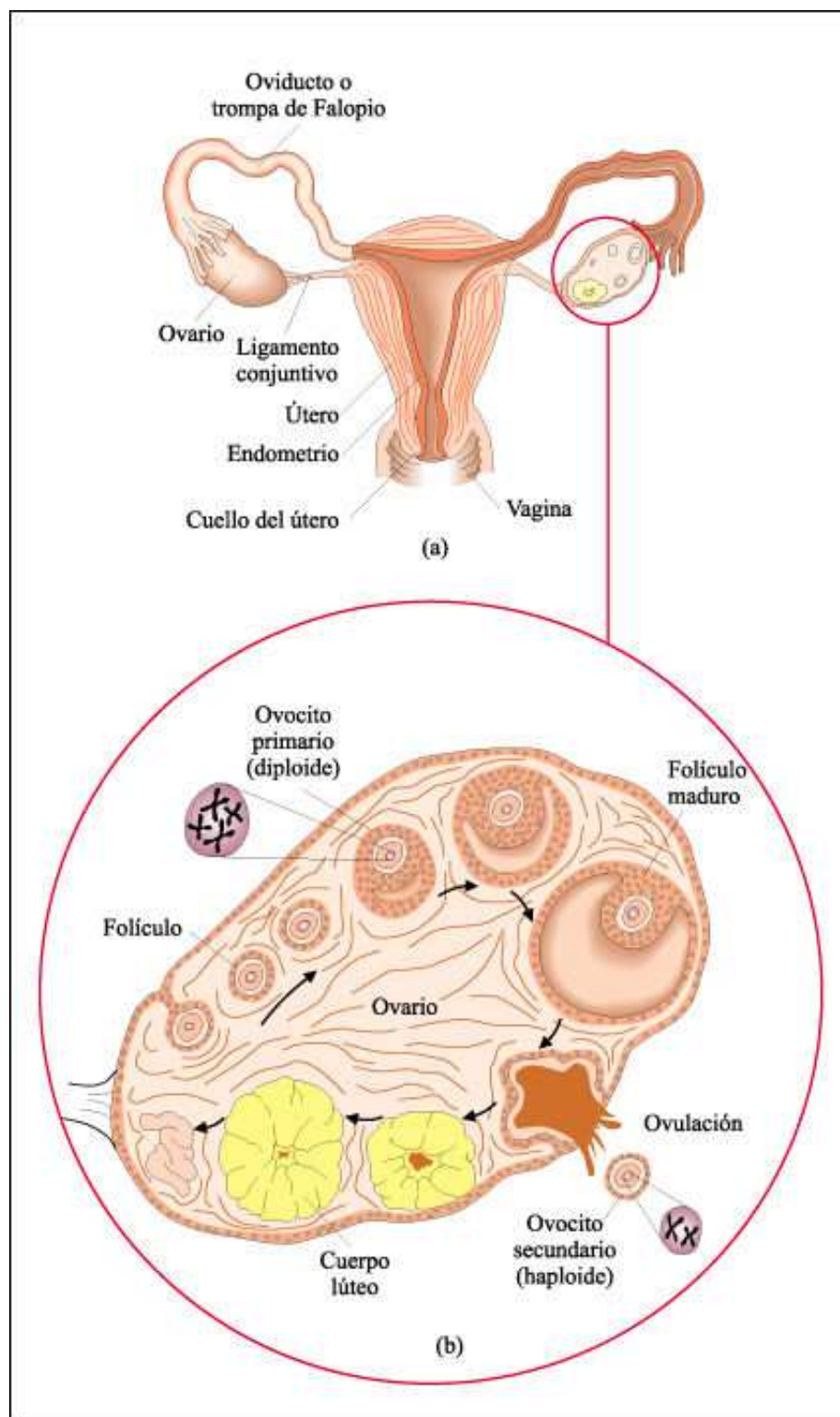
Nótese que el útero y la vagina forman ángulos rectos. Esta es una de las consecuencias del bipedalismo y de la postura erecta de *Homo sapiens* y una de las razones por las que el alumbramiento es más difícil en las mujeres que en otros mamíferos.



En las hembras humanas, los ovocitos primarios comienzan a formarse en el feto. En el momento del nacimiento, los ovarios contienen ovocitos primarios que han alcanzado la profase de la primera división meiótica y permanecen así hasta la madurez sexual. Luego, por influencia de las hormonas, se reanuda la primera división meiótica lo que da como resultado un ovocito secundario y un cuerpo polar. La primera división meiótica se completa alrededor del momento de la ovulación.

La maduración del ovocito implica también un gran incremento de tamaño debido a la acumulación de reservas alimenticias almacenadas y de la maquinaria metabólica (RNA mensajero y enzimas requeridos para las etapas tempranas del desarrollo).

Cuando un ovocito primario está listo para completar la meiosis, la primera división meiótica se completa pocas horas antes de la ovulación dando un ovocito secundario grande y un cuerpo polar. La segunda división meiótica no ocurre hasta después de la fecundación y produce el óvulo y otro pequeño cuerpo polar. Así, la mayoría de las reservas alimenticias pasan a un óvulo único. Todos los cuerpos polares mueren.



a) Visión frontal de la anatomía interna del aparato reproductor femenino. b) Los ovocitos se desarrollan dentro de los folículos que se sitúan cercanos a la pared del ovario.

Las distintas etapas de desarrollo del ovocito y su folículo se ordenan aquí siguiendo las agujas del reloj, por toda la periferia del ovario (en realidad, el folículo permanece siempre en el mismo lugar). Después que el ovocito secundario es expulsado del folículo (ovulación) las células foliculares restantes dan origen al cuerpo lúteo, que secreta estrógenos y progesterona. Si el óvulo no es fecundado, el cuerpo lúteo se reabsorbe. Si el óvulo es fecundado, el cuerpo lúteo continúa fabricando estrógenos y progesterona. Estas hormonas luego son producidas en grandes cantidades por la placenta y hacen que el útero esté en condiciones para el desarrollo del embarazo.

Los ovocitos, junto con las células foliculares que los rodean, se desarrollan cerca de la superficie del ovario. Las células del folículo suministran nutrientes al ovocito en crecimiento y también secretan estrógenos, las hormonas que apoyan el crecimiento sostenido del folículo e inician la formación del endometrio. Durante las etapas finales de su crecimiento, el folículo madura y se convierte en folículo de de Graaf que por último estalla liberando al ovocito.

Cuando el ovocito es liberado es captado por el oviducto contiguo. Luego, desciende por la trompa. El recorrido del ovario al útero toma aproximadamente 3 días. El ovocito es capaz de ser fecundado en las siguientes 24 horas después de su expulsión. Así, la fecundación debería ocurrir en la ampolla del oviducto. Si la célula huevo es fecundada, el embrión joven se implanta en el endometrio 2 o 3 días después de alcanzar el útero, 5 o 6 días después que la célula huevo fue fecundada. Si el ovocito no es fecundado, muere, y el endometrio que tapiza el útero se elimina durante la menstruación.

Aproximadamente una vez por mes en la mujer en edad reproductiva y no embarazada, un ovocito es expulsado de un ovario y es barrido hacia la trompa contigua. La fecundación, cuando ocurre, normalmente tiene lugar dentro de una de las trompas. Posteriormente, el embrión joven desciende por las trompas y se implanta en el tapiz uterino. Los movimientos musculares de la trompa, unidos al batir de los cilios que lo tapizan, impulsan al embrión por la trompa hacia el útero.

Bajo la influencia de una variedad de estímulos, el clítoris y sus bulbos se congestionan y distienden con sangre, como lo hace el pene del varón. La distensión de los tejidos se acompaña por la secreción en la vagina de un fluido que lubrica sus paredes y neutraliza su ambiente ácido y, por lo tanto, espermicida.

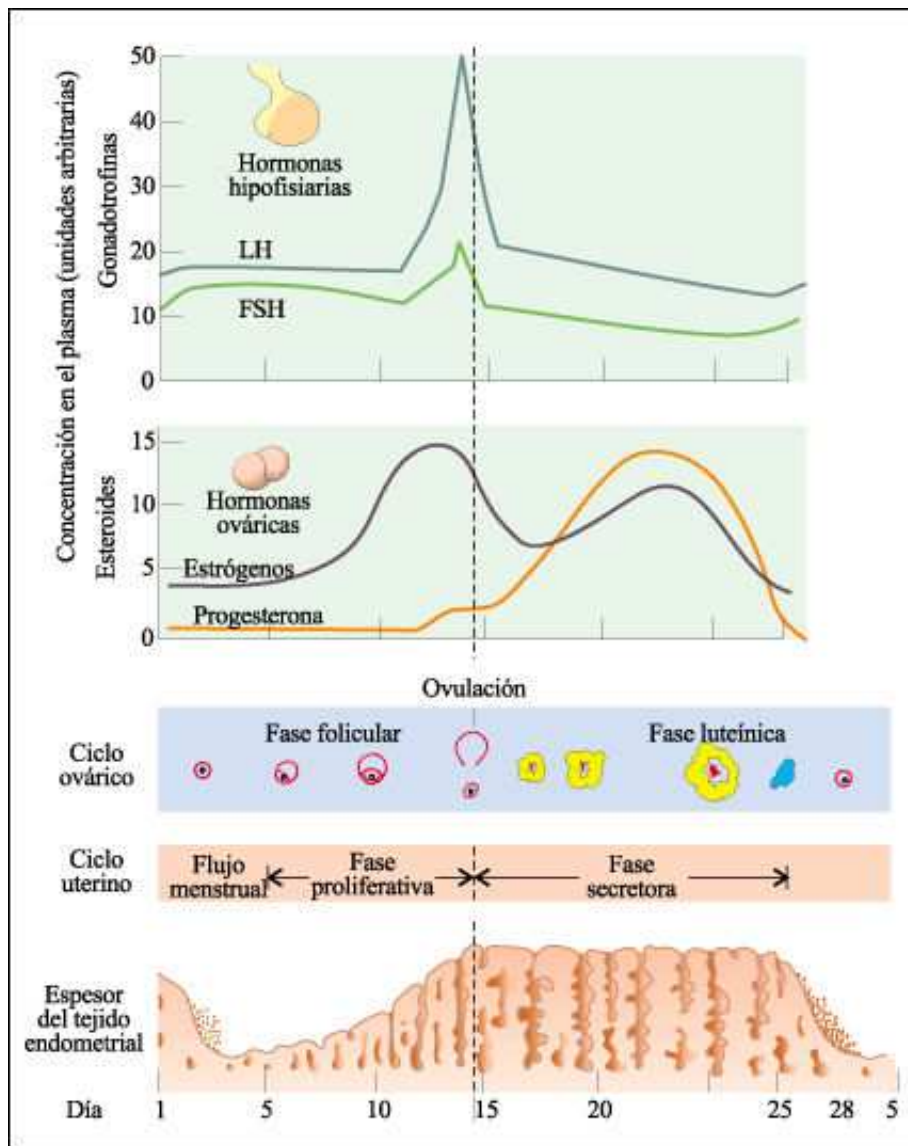
El orgasmo en la mujer, como en el varón, está marcado por contracciones musculares rítmicas, seguidas por la expulsión hacia las venas de la sangre atrapada en los tejidos congestionados. Músculos homólogos producen el orgasmo en los dos sexos, pero en las mujeres no hay eyaculación de fluido a través de la uretra o de la vagina. En el orgasmo, el cuello desciende a la porción superior de la vagina, donde el semen tiende a formar una laguna. El orgasmo femenino puede producir también contracciones en las trompas, que impulsan a los espermatozoides hacia arriba. Sin embargo, el orgasmo en las mujeres no es necesario para la concepción.

Las hembras de casi todas las especies de mamíferos, excepto *Homo sapiens*, se aparean sólo durante el estro. La hembra humana parece ser uno de los pocos animales receptivos al apareamiento durante períodos no fértiles.

La producción de ovocitos en las hembras de vertebrados es cíclica. Implica tanto la interacción de hormonas como los cambios en las células foliculares y en el tapiz uterino y se conoce como al ciclo menstrual. Su producción y control están a cargo del hipotálamo. Las hormonas involucradas incluyen los estrógenos y la progesterona, las gonadotropinas hipofisarias FSH y LH y la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH) del hipotálamo.

En concentraciones reducidas los estrógenos actúan por medio de retroalimentación negativa inhibiendo la producción de FSH y GnRH (y de esta forma, de LH). En concentraciones elevadas los estrógenos actúan a través de retroalimentación positiva aumentando la sensibilidad de la hipófisis a la GnRH y también pueden estimular la secreción de GnRH; el resultado es un incremento en la

síntesis de LH y FSH por la hipófisis. En concentraciones altas, la progesterona, en presencia de estrógenos, inhibe la secreción de GnRH y, así, la producción de LH y FSH.



El ciclo menstrual.

Todos los acontecimientos que se producen en un ciclo menstrual implican cambios de concentración hormonal y anatómicos en el ovario y en la pared interna del útero (endometrio). El ciclo comienza con el primer día de flujo menstrual, causado por el desprendimiento del endometrio. El aumento de la concentración de FSH y LH al comenzar el ciclo estimula un folículo ovárico que crece y secreta estrógenos bajo cuya influencia el endometrio se regenera. El brusco aumento de la concentración de estrógenos antes de alcanzar la mitad del ciclo dispara un incremento súbito de LH desde la hipófisis, lo que produce la ovulación. Después de la ovulación, la concentración tanto de LH como de FSH cae. El folículo se convierte en el cuerpo lúteo, que produce progesterona y estrógenos. La progesterona continúa estimulando el endometrio, preparándolo para la implantación del óvulo fecundado. Si la fecundación no se produce, el cuerpo lúteo degenera, la producción de progesterona entonces se detiene y el endometrio comienza a desprenderse, las concentraciones de LH y de FSH vuelven a subir, y comienza un nuevo ciclo.

El inicio de la primera menstruación marca el comienzo de la pubertad en las hembras de los seres humanos. La mayor producción de hormonas sexuales femeninas antes de la pubertad induce el desarrollo de las características sexuales secundarias.

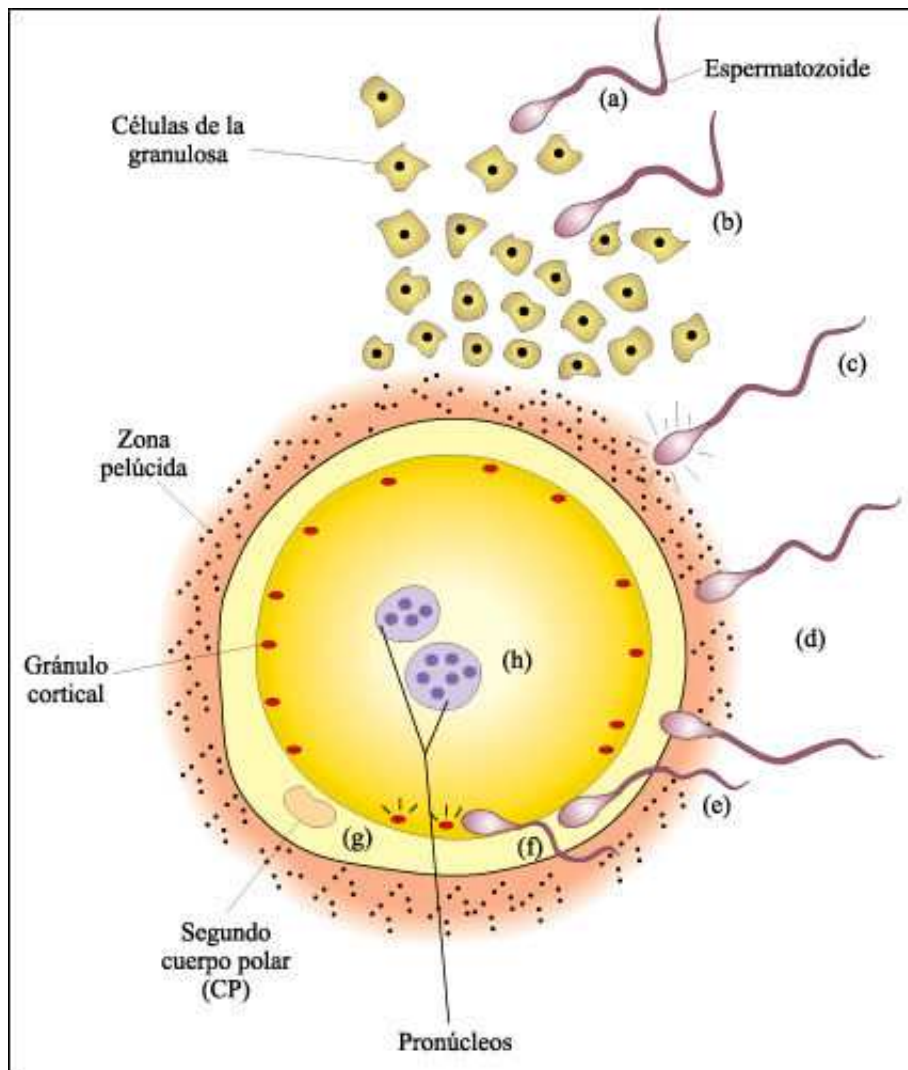
## Pasos necesarios para que se produzca la fertilización

Para que ocurra la fertilización debe producirse el encuentro entre el ovocito expulsado en la ovulación y un espermatozoide proveniente del semen que fue depositado en la vagina durante la



eyaculación.

Para poder fertilizar al ovocito, los espermatozoides deben experimentar una "capacitación", proceso reversible en el que se agregan y remueven componentes de la membrana plasmática que fueron adquiridos durante el contacto con el fluido del epidídimo y de la vesícula seminal. La capacitación permite que se produzca la reacción acrosomal en los espermatozoides, que permitirá la penetración de la zona pelúcida, y la hiperactivación de estos gametos.



Secuencia de pasos de la fertilización.

a) Capacitación. b) Pasaje a través de las células de la granulosa que rodean el ovocito. c) Unión del espermatozoide a la zona pelúcida. d) Penetración de la zona pelúcida. e) Fusión espermatozoide-ovocito. f) Activación del ovocito. g) Liberación del segundo cuerpo polar. h) Formación de los pronúcleos.

Una vez producida la fusión del espermatozoide y del ovocito, ocurre la activación del ovocito; entonces se reanuda y completa la segunda división meiótica, y se libera el segundo cuerpo polar.

Finalmente se produce la asociación de los cromosomas parentales, o singamia, que culminará en la formación del núcleo diploide.

## Técnicas anticonceptivas

Existe una variedad de métodos anticonceptivos para evitar o diferir un embarazo. Durante muchos años, los métodos anticonceptivos más utilizados fueron los métodos de barrera, como el diafragma y el condón. En las décadas de 1960 y 1970, se generalizó el uso de la "píldora", una combinación de estrógenos y progesterona sintéticos. Cuando se toma diariamente, la píldora mantiene el nivel de estas hormonas en sangre lo suficientemente elevado como para bloquear la

producción de hormonas hipofisarias FSH y LH. Sin FSH, los folículos ováricos no maduran y, en ausencia de LH, no hay ovulación, de manera que no es posible el embarazo.

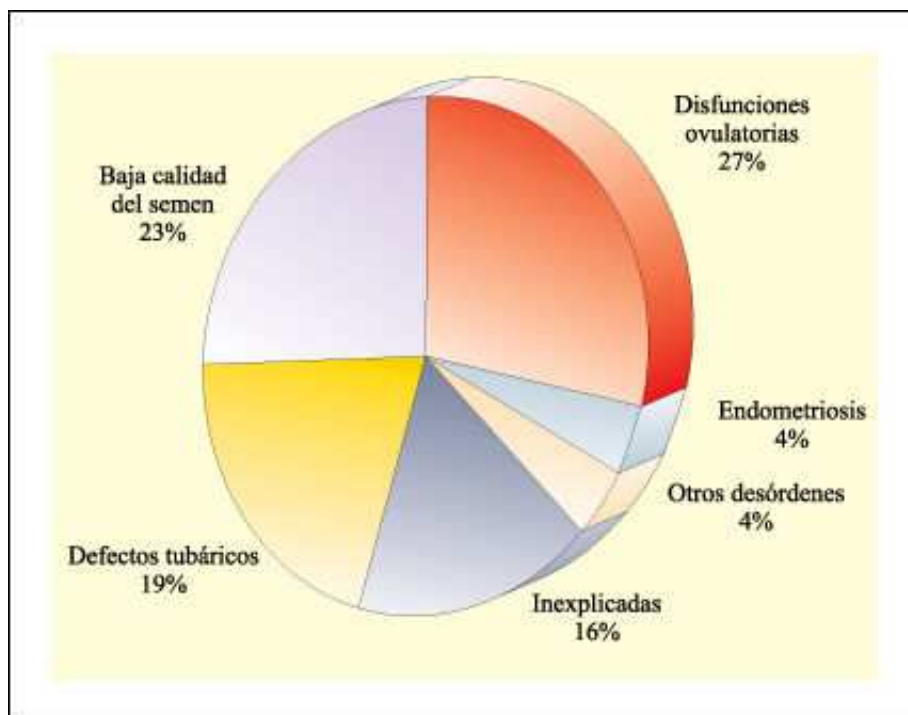
En los últimos años, el diafragma y el condón se han vuelto a utilizar. Una adquisición relativamente reciente es la del condón femenino, que presenta una nueva opción para el control de la natalidad y de la transmisión de las enfermedades infecciosas, si bien su empleo demostró poca practicidad. En combinación con gelatinas espermicidas, estos dos métodos, y particularmente el condón, suministran una barrera no sólo contra los espermatozoides, sino también contra muchos agentes infecciosos.

## Esterilidad e infertilidad

Cuando los pasos requeridos para lograr la fertilización se desarrollan normalmente, y existe una integridad anatómica y funcional del sistema reproductor del hombre y de la mujer, se produce una fertilización exitosa. Sin embargo, en muchas ocasiones se presentan patologías, tanto en el hombre como en la mujer, que dificultan o impiden un embarazo natural. La infertilidad de una pareja se define como la incapacidad de concebir un hijo vivo a pesar de mantener un ritmo normal de relaciones sexuales sin métodos anticonceptivos durante un período de un año y puede deberse a la infertilidad en uno o ambos de sus miembros.

En la mujer, la edad condiciona en forma fundamental la capacidad reproductiva. Se observa claramente una disminución de la capacidad reproductiva a partir de los 35 años, que se acentúa desde los 40. Tanto la calidad de los ovocitos como la capacidad del útero para llevar un embarazo a término se ven afectadas, aunque la primera causa es la principal responsable de la disminución de la función reproductiva.

Las patologías asociadas a las variables endocrinas son en general disfunciones ovulatorias. Las patologías asociadas a variables anatómicas son, en general, defectos tubáricos. Otras patologías anatómicas incluyen la presencia de tejido endometrial fuera de la cavidad uterina, la presencia de miomas y malformaciones que dificultan la implantación embrionaria. Otros defectos están asociados a la baja calidad del semen y muchos otros permanecen inexplicados.



Porcentaje de diferentes causas de infertilidad.

En el hombre, las causas de infertilidad están relacionadas con una baja calidad del semen. Por otra parte, la penetración del espermatozoides a través del moco cervical es un paso indispensable en el largo camino hacia el ovocito. La penetración depende directamente de la capacidad de movimiento de los espermatozoides; por lo tanto, anomalías a ese nivel dificultan esta etapa.

Existen casos de inmunidad, caracterizada por la presencia de anticuerpos contra los espermatozoides. En estos casos, la penetración se ve seriamente dificultada ya que los espermatozoides quedan "atados" al moco cervical y son incapaces de liberarse. Otras patologías están relacionadas con la unión de los espermatozoides a los receptores de la zona pelúcida, a fallas en la reacción acrosómica y a la presencia de microorganismos o anticuerpos.

La reproducción asistida abarca un conjunto de procedimientos en los cuales un equipo médico colabora en el encuentro de los gametos femeninos y masculinos cuando éste no puede producirse naturalmente. Los procedimientos pueden clasificarse en técnicas de baja y de alta complejidad.

Dentro de los procedimientos de baja complejidad se puede mencionar la inseminación artificial, que consiste en la introducción de espermatozoides en el tracto reproductivo de la mujer en forma no natural con el fin de lograr la fertilización.

Entre las técnicas de inseminación artificial, la más utilizada es la intrauterina, en la que se coloca el semen capacitado lo más cerca posible de la trompa, reduciendo así la distancia que los espermatozoides deben recorrer para alcanzar el ovocito.

Los procedimientos de alta complejidad involucran la estimulación hormonal de la ovulación, la punción y aspiración folicular y la capacitación y selección de espermatozoides móviles y morfológicamente normales. Incluyen la transferencia intratubaria de gametos (GIFT), la fertilización in vitro (FIV) y la inyección de un espermatozoide en el citoplasma ovocitario (ICSI).



---

**El cuarto Blanco - Biblioteca Web**