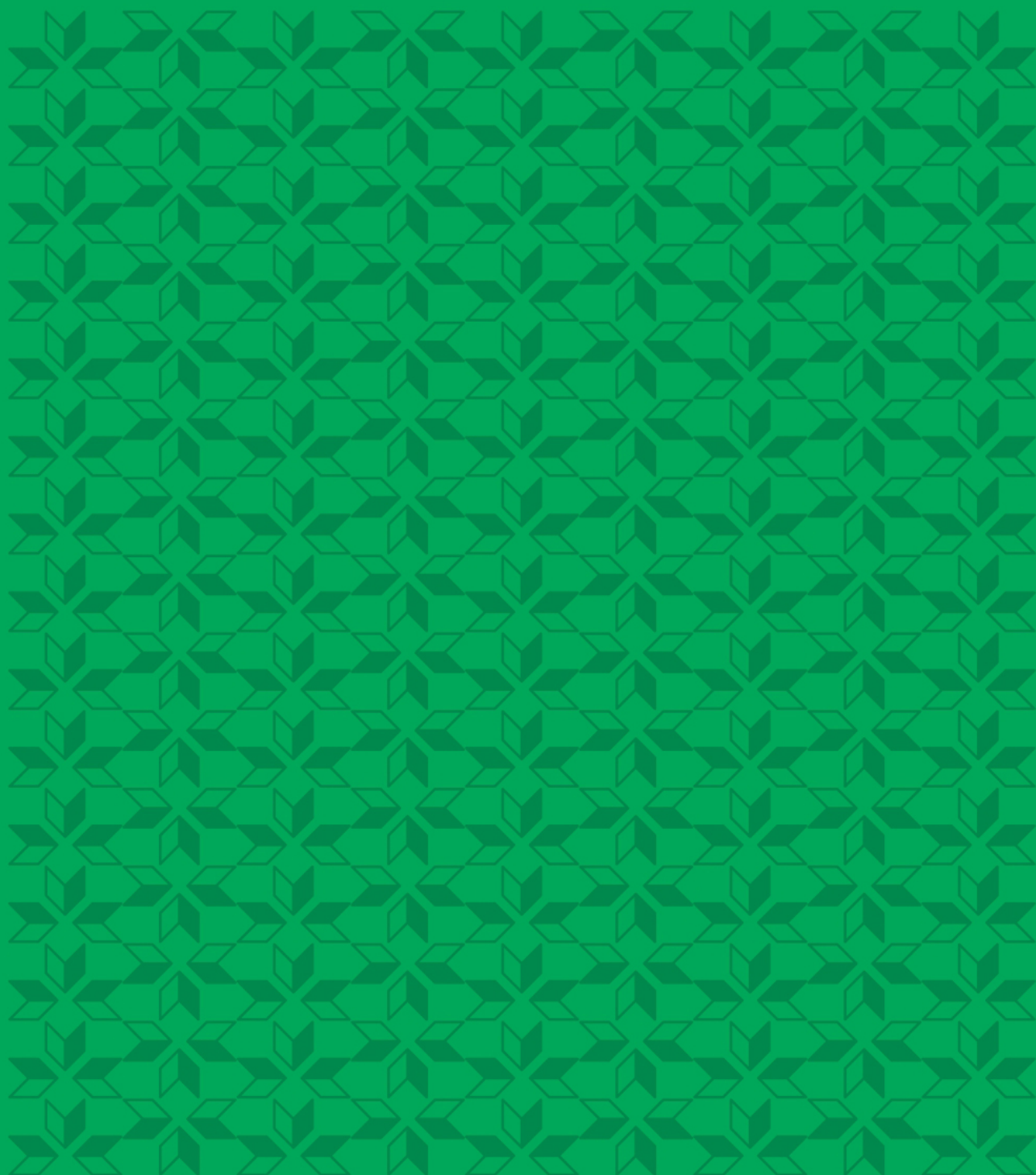


La biología en el aula

endem
libros de grado

Marcelo Basso | Adela Castro | Celia Iudica



La biología en el aula

Apuntes para la actualización y la práctica

Marcelo Basso – Adela Castro – Celia Iudica



Iudica, Celia

La biología en el aula : apuntes para la actualización y la práctica / Celia Iudica ; Marcelo Basso ; Adela V. Castro. - 1a ed. - Mar del Plata : EUDEM, 2020.

Libro Digital. PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4440-80-8

1. Material Auxiliar para la Enseñanza . I. Basso, Marcelo II. Castro, Adela V. III. Título
CDD 371.33

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723 de Propiedad Intelectual.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio o método, sin autorización previa de los autores.

ISBN 978-987-4440-80-8

Este libro fue evaluado por la Esp. Mariel Boquet

Fecha de edición: Mayo 2020

© 2020 EUDEM

Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata
EUDEM / 3 de Febrero 2538 / Mar del Plata / Argentina

© 2020 Marcelo Basso, Adela Castro y Celia Idudica

Arte y Diagramación: Luciano Alem y Agustina Cosulich



Libro
Universitario
Argentino

CiN REUN

Red de Editoriales
de las Universidades Nacionales
de la Argentina

Índice

Prefacio, o acerca del por qué de este libro	5
SECCION 1:	7
Evolución	
Capítulo 1:	9
La evolución es cambio	
<i>La Evolución en la escuela secundaria</i>	
Capítulo 2:	47
Reproducción sexual: enigmas, mitos y certezas	
SECCION 2:	95
Percibir, entender, responder y transformar	
Capítulo 3:	97
Información, integración y respuesta	
Capítulo 4:	143
La expresión del genoma en el proteoma	
SECCIÓN 3:	163
Energía y materia en movimiento	
Capítulo 5:	167
La ecología en acción: el modelo agroexportador bajo la lupa	
Juego: Síntesis de proteínas	211

Prefacio, o acerca del por qué de este libro

La experiencia es un peine que te dan cuando te quedaste pelado, dijo una vez el campeón de boxeo Oscar Natalio “Ringo” Bonavena. Y la verdad es que tenía razón. Cosechar experiencia en la vida y en la docencia lleva tiempo, dedicación y esfuerzos. Y a veces llega tarde.

Este libro intenta ser un pequeño peine que algunos viejos pelados ponen en la mano de jóvenes e hirsutos docentes en formación, para que sea utilizado como herramienta para la construcción de su quehacer docente.

Aunque en realidad ninguno de nosotros es viejo ni calvo, es casi seguro que los tres tenemos algunos años más, y hemos pasado ya por el trayecto formativo que están atravesando los lectores a quienes están dirigidas estas páginas, estudiantes del profesorado en Ciencias Biológicas (o profes novatos).

Con este libro, pensamos en ayudarlos en su formación, contándoles qué es lo que hemos considerado a lo largo de nuestra experiencia como biólogos y docentes que es importante para ser enseñado a nuestros estudiantes.

Las secciones y capítulos que aborda están ajustadas al diseño curricular para la enseñanza de la biología en el nivel secundario, pero cada uno de los temas está tratado desde una perspectiva que comprende y respeta las problemáticas regionales y las circunstancias sociohistóricas de las aulas de hoy. Éste no pretende ser un libro de didáctica de la biología, sino que es un relato de los argumentos que justifican la forma en la que enseñamos esta disciplina, que todos los días nos sigue resultando sorprendente y maravillosa. Nosotros hemos construido estos criterios cuando, como actores sociopolíticos que somos, interactuamos con el diseño curricular que el sistema educativo prescribe.

Como nuestro conocimiento en muchas ocasiones se vuelve frágil, cada capítulo ofrece un resumen actualizado de los conceptos que consideramos fundamentales para el *archivo* del profesor de biología. Este contenido disciplinar seguramente resultará más profundo que lo que debe ser enseñado, pero por eso servirá para que el lector pueda tener una visión abarcativa, que lo ayude a lograr un recorte apropiado en el momento de preparar sus clases. Será lo que en nuestro vocabulario cotidiano solemos referir como “*lo que debe sobrar*” al profesor. Si quiere que *le sobre* más, al final de cada capítulo hay un listado bibliográfico para la profundización.

Pero además, en cada capítulo se propone un modo posible y probado en el aula de transferir esos conocimientos a los estudiantes de nivel secundario. Se comparten textos y actividades, materiales secuenciados didácticamente, o sugerencias que el docente podrá tomar como guía para elaborar lo que finalmente llevará al aula, seguramente adornado con elementos de su impronta personal y del contexto áulico en el que se encuentre.

Adicionalmente, hay una razón personal y egoísta para haber escrito estas páginas. Escribir es un modo sublime del pensar. Permite acomodar las ideas, repasarlas y perfeccionarlas hasta que quedan plasmadas del mejor modo posible. El oficio de escribir hace que el que escribe se transforme en la mejor versión de sí mismo, como persona y, en este caso, también como docente. Es así que los autores de estas páginas, egoístamente, nos hemos mejorado en nuestros defectos y exacerbado en nuestras virtudes al escribirlas. Muchas gracias por la oportunidad a todos los que lo han hecho posible.

SECCION 1:

Evolución

CAPÍTULO 1:

La evolución es cambio

La Evolución en la escuela secundaria

1.1 Introducción

“Nada en biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución”, dijo Theodosius Dobzhansky en 1937, en el libro con el que sentaba las bases de la que sería la Teoría Sintética de la Evolución, continuación del trabajo iniciado por Darwin. “El Origen de las Especies” impactó a tal punto la sociedad europea de 1859, que inmediatamente repercutió en la política y la religión, generando asambleas públicas para debatirlo, mucho más allá de las ciencias naturales, impregnando rápidamente nuevos campos de estudio como la sociología. Aquellos primeros debates no han cesado hoy, y aunque menos encendidos y asumidos sus fundamentos generales, los mecanismos más precisos siguen ocupando importantes espacios en foros de diversas disciplinas.

Pasados más de 150 años de la publicación de Darwin y a la luz de los conocimientos actuales, aquella afirmación de Dobzhansky se ha visto confirmada y ha multiplicado la fuerza de su sentido. De un modo similar al lugar central que tiene la teoría de la relatividad para la física, el amplio cuerpo de conocimientos que hacen a la evolución, constituye para las ciencias biológicas el eje fundamental de la totalidad de las investigaciones biotecnológicas, médicas, farmacológicas o ambientales.

Tal como sucede con la ciencia, para la educación también es fundamental, sin embargo, depende de las políticas pedagógicas que la evolución sea eje de la enseñanza y punto de partida de las ciencias naturales:

- es eje estructurante del modelo pedagógico y curricular de las ciencias naturales,

- es herramienta didáctica imprescindible para la comprensión de los fenómenos biológicos,
- y es herramienta formativa: el debate y la reflexión sobre el origen y evolución del planeta y de los seres vivos, y el sitio que ocupa el ser humano en este universo, son ideas fundantes en la construcción del pensamiento abstracto de preadolescentes y adolescentes, y punto de partida del pensamiento filosófico, sociológico y científico.

Queda aún otro aspecto tan importante como los anteriores, respecto de las oportunidades formativas de la teoría de la evolución para el trabajo en el aula, y es el de su trascendencia epistémica hacia otras disciplinas como la cultura y la ideología política de nuestras sociedades occidentales:

- Para entender a las ciencias es imprescindible plantear un análisis crítico sobre los intereses socio-políticos y su relación de dependencia en torno a los que se construyen.
- Brinda una importante oportunidad para el trabajo institucional transdisciplinar y articulado, (con la Historia, la Sociología y la Psicología y hasta con las Artes) rompiendo los falsos tabiques que hacen del conocimiento compartimientos estancos sin relación coherente.

La gran importancia educativa de la evolución queda claramente reconocida en el diseño curricular de Biología para la escuela secundaria, de la provincia de Buenos Aires, que bajo el título “La enseñanza de la Biología 2do año”, explicita:

“Se dice, con frecuencia, que la evolución es la idea organizadora más fuerte de la biología. La fuerza de su poder explicativo reside en que da cuenta de la enorme diversidad de estructuras y comportamientos biológicos -a través de la diversificación histórica a partir de un ancestro común- y de la adaptación de estas estructuras y comportamientos al medio -a través de la selección natural-. Esto permite darle coherencia a una infinidad de datos y fenómenos observables que, en apariencia, no tendrían relación entre sí; e ir más allá de una mirada meramente descriptiva de la vida sobre la tierra hacia una visión explicativa que pone en evidencia sus relaciones causales e históricas. ”

En éste diseño se propone que la evolución biológica es uno de los modos de pensamientos en el que se debe iniciar al estudiante, junto con el pensamiento fisiológico y ecológico. Por lo tanto estos deben ser ejes de trabajo a lo largo de los tres años (segundo, tercero y cuarto de la escuela secundaria) en los que se dicta la materia, recuperando y redimensionando cada año lo visto en el anterior, un currículum en espiral, tal como propone J. Brunner. En las escuelas con orientación en Ciencias Naturales, el estudio de la evolución vuelve a ser eje central durante el 5to año, esta vez enfocando al ser humano como objeto de estudio.

Es necesario recordar que estos diversos ejes y sentidos mencionados son las partes de un objetivo general del diseño curricular que es la **Alfabetización Científica**, a la que nos referiremos al final del capítulo.

Si bien debería ser eje en los tres años de la materia, es en el segundo año cuando la evolución biológica se aborda de un modo sistemático como tema específico acompañado por la biodiversidad, la herencia genética y la reproducción sexual, unidades que le dan continuidad.

El presente capítulo intenta aportar material de utilidad para el abordaje de ese trayecto pedagógico.

1.2 El problema del origen de los seres vivos

1.2.1 El problema

Está ampliamente aceptado que uno de los primeros en enunciar una teoría con estricto fundamento científico sobre el origen de los seres vivos, fue el ruso Aleksandr Oparín en su libro "El origen de la vida" publicado en 1923. Este bioquímico y botánico, docente en la universidad de Moscú, tuvo muy en cuenta al libro de Darwin, de 1859, para elaborar su teoría a la que consideró como una continuidad del proceso de transformación de la materia. Pero a pesar de que para ese entonces era mucho el conocimiento biológico y bioquímico, el tema afectaba demasiados intereses tanto religiosos como políticos (ya planteada la guerra fría entre la URSS y Occidente) y no produjo demasiado impacto. Una segunda edición revisada de su libro, fue traducida en 1938 y cobra mayor trascendencia en el ámbito científico, llegando a manos del norteamericano Harold Urey, ganador del Nobel de química

en 1934, más interesado en la cuestión bioquímica que en el problema filosófico y religioso.

Pero recién en 1951 esta teoría es puesta a prueba, por iniciativa de Stanley Miller quien le pide a Urey que sea su director de tesis doctoral. Basado en el libro de Oparín y los conocimientos de entonces, propone un sencillo e ingenioso experimento que demuestra, 28 años después de enunciada, que la teoría Abiogénica del ruso era correcta.

En un sistema cerrado con agua, algunos gases y minerales, y suficiente energía, (calor, luz UV y rayos eléctricos), que intentaban reproducir las condiciones de la atmósfera primitiva, bastaron algunos pocos días para que se formaran aminoácidos, hidrocarburos y azúcares. Así es como Miller, además de demostrar que en determinadas condiciones las sustancias inorgánicas simples pueden formar sustancias orgánicas de forma espontánea, inició toda una línea de investigación que aún da trabajo a muchos investigadores.

En lo que hace a la teoría, la ciencia acepta que en la Tierra primitiva con una atmósfera sin oxígeno, un gran flujo de diversas formas de energía, un inmenso océano y sin apuro ni límites de tiempo, pudieron formarse suficientes sustancias orgánicas que interactuaron una y otra vez hasta conseguir, hace 3.800 millones de años, la formación de los primeros seres vivos. Está claro que resultaría imposible reproducir en el laboratorio un experimento durante cientos de miles de años esperando la formación de un ser vivo. Por lo tanto la teoría de Oparín queda solo parcialmente demostrada, lo que de ningún modo la desacredita, por el contrario diversos experimentos aún siguen analizando diversas posibilidades, como los surgentes de aguas termales y sustratos de arcillas y espumas que mejoran aún más las condiciones, aportando datos más completos a la teoría.

Respecto de la historia de esta teoría, nos ofrece un excelente ejemplo para analizar cómo la ciencia, lejos de ser ese espacio académico, neutral y aséptico que construye conocimientos para el bien común, responde como cualquier otra actividad humana a las presiones e intereses políticos e ideológicos, actuando las más de las veces como herramienta de los poderes hegemónicos. Desde "El origen de las Especies" hasta el experimento de Miller, pasaron casi 100 años, durante los que, a pesar de todas las evidencias acumuladas, la ciencia occidental se negó a aceptar que los seres vivos sean un emergente natural de la evolución de la materia. Cuando la evidencia fue irrefutable, se intentaron argumentos o alternativas para generar dudas como la Panspermia, que propone que los seres vivos pudieron llegar como semillas en meteoritos desde el espacio; o que solo pudo

ser posible tal conjunto de “coincidencias azarosas”, si un ser omnipresente dirige dicho proceso.

1.2.2 El origen

Pero la teoría sostiene que no hay azar. Siempre que se den el conjunto de condiciones particulares que se dieron en la formación de nuestro planeta, se formarán sustancias orgánicas tanto más complejas cuanto mayor sea el tiempo. Simples en un inicio, como hidrocarburos y aminoácidos, estas cadenas de carbono se fueron acumulando y recombina-ndo en nuevas moléculas cada vez más grandes y complejas que se deshacían, se reha-cían y se acumulaban gracias a la ausencia de oxígeno, que de existir, las hubiera inutiliza-do como moléculas bioactivas. El oxígeno es tan reactivo, que se combina rápidamente con otras sustancias formando óxidos, por lo que no permanece en la atmósfera como gas, y así también debió ser en nuestra atmósfera primitiva, una atmósfera reductora. Esta ca-rencia, o bajísimos niveles de oxígeno supone además la ausencia de una “capa de ozono” (O_3), por lo que el ingreso de la luz ultravioleta debió ser una más de las muchas fuentes de energía.

En un proceso caótico y continuado, aunque restringido a las precisas reglas de la fí-sico-química, las moléculas inorgánicas simples se combinaron en moléculas carbonadas más y más complejas que aumentaron sus niveles de organización formando polímeros o macromoléculas como proteínas, hidratos de carbono, lípidos y hasta ácidos nucleicos que, se especula, debieron amontonarse en espumas y gelatinas de aquel mar primitivo que el propio Oparín nos ayuda a imaginar como un inmenso “caldo primordial”.

Las investigaciones al respecto son numerosas:

“Un grupo de científicos en el Scripps Research Institute y el Instituto Salk para es-tudios biológicos ha informado de una posible respuesta a la cuestión de cómo se formaron los primeros primeros péptidos. Los péptidos y las proteínas son políme-ros cuyos bloques constitutivos son los aminoácidos. En la revista Science, Leman, Ghadiri, y Orgel sugieren que la respuesta sería un componente del gas volcánico, conocido como sulfuro de carbonilo. Dado que estos fenómenos geológicos eran habituales en la Tierra primitiva, es razonable asumir que el gas estaba presente. En

su informe, los científicos demuestran que el gas puede desencadenar una vigorosa reacción química que bajo condiciones acuosas templadas forma péptidos. En el plazo de minutos después de introducir el gas en un recipiente de reacción que contiene aminoácidos, observaron una alta producción de di, tri y tetrapéptidos. Llevaron a cabo la reacción en presencia de aire, en ausencia de éste, con o sin otros ingredientes como iones de metales, observando que los péptidos se formaban fácilmente bajo todas esas condiciones.”

Conjuntos de macromoléculas pudieron lograr un cierto nivel de equilibrio, atrapadas dentro de una burbuja de aceite, o membrana de lípidos que tal como en cualquier célula actual, separa el medio externo del medio interno, límite a través del cual algunas sustancias pasan y otras no. Estas gotas de sustancia orgánica, también llamados por Oparín **coacervados**, se formaban y se desintegraban espontáneamente en grandes cantidades, incluso podían dividirse llegados a un límite de tamaño, de un modo más o menos estable. Hasta aquí, todo esto es posible de ser demostrado y reproducido en el laboratorio, pero esas gotitas aún están lejos de ser seres vivos. Para ello es necesario una verdadera replicación molecular de modo tal que la división produzca dos nuevos seres con idénticas organizaciones metabólicas internas, capaces de responder ante los cambios externos para mantener su homeostasis, y su identidad.

Impulsados por el constante torrente de energía, estos primitivos agregados moleculares se fueron multiplicando, reconstruyendo y destruyéndose incesantemente, hasta que alguno de estos tuvo la suficiente estabilidad para controlar su equilibrio interno mediante un metabolismo que podía dar respuestas efectivas a los cambios externos e internos y reproducirse eficientemente.

Varios investigadores proponen al ARN como el primer material genético: una molécula capaz de autocatalizar la construcción de otra molécula idéntica, y a la vez de controlar la actividad y síntesis de otras moléculas; un conjunto de estas moléculas autorreplicativas lograrían mantener un sistema organizado de moléculas durante más tiempo, obteniendo del medio externo, ese gran caldo, las moléculas orgánicas necesarias para sostenerse y duplicarse. Así debieron aparecer sistemas organizados autorreplicantes en los que las moléculas de ARN sintetizan y a su vez son sintetizadas por proteínas que las estabilizan en complejas secuencias de reacciones.

La teoría de sistemas demuestra cómo, ante el desorden producido por un gran flujo de energía, las moléculas tienden a formar sistemas de macromoléculas que producen complejas reacciones encadenadas, disipando esa energía en forma controlada, lo cual también ha podido ser verificado en condiciones de laboratorio.

Solo pudieron sobrevivir aquellas células que lograron mayor estabilidad, por lo que se supone que el ARN autorreplicante, mas inestable, debió ser gradualmente reemplazado por el ADN más estable, que si bien no puede autorreplicarse y depende de las polimerasas para su duplicación, logra mayor perdurabilidad en condiciones más exigentes por su estructura de doble hélice pudiendo almacenar mayor cantidad de información.

Estos primeros seres, o alguno en particular, debió ser el **Ancestro Común Universal**, origen de todos los seres vivos existentes en nuestro planeta, lo cual se evidencia en que todos compartimos un orden molecular básico idéntico, un código genético universal (con algunas variaciones entre procariontas y eucariontas), y una estructura general idéntica de proteínas y membranas.

No hay azar, cada combinación atómica, cada interacción molecular, cada conjunto organizado de macromoléculas, suceden según reglas estrictas, electromagnéticas, físico-químicas y biológicas; y siempre que se repitan las condiciones volvería a formarse aquel caldo primigenio. Los seres vivos no son una condición excepcional de la casualidad, solo posible con la intervención de fuerzas sobrenaturales; siempre que se den las condiciones adecuadas, la materia orgánica y luego los seres vivos surgirán espontáneamente como los cristales de hielo cuando el agua baja su temperatura de cero grado centígrado. Es el resultado natural de los distintos niveles de organización de la materia, que comienza por las partículas subatómicas que se ordenan para formar átomos, luego estos se ordenan para formar moléculas, que a su vez se ordenan para formar macromoléculas, sustancias orgánicas, células, pluricelulares, y ecosistemas.

Luego de Miller, muchos otros científicos siguieron acumulando evidencias sobre la capacidad de las moléculas orgánicas para formarse a partir de las sustancias simples, y de las macromoléculas para autoorganizarse. Esto incluye a las moléculas autorreplicativas de ARN que en las condiciones adecuadas se autoduplican produciendo incluso variantes capaces de interactuar diferencialmente.

1.2.3 La vida

La vida es un concepto abstracto con diversos usos e interpretaciones, a veces idealizada. Pero para la biología la vida es una cualidad de los organismos vivos, por lo tanto es una propiedad de la materia: un organismo tiene vida siempre que pueda mantener el equilibrio físico y químico interno mediante la actividad metabólica. Como este, muchos conceptos ambiguos instalados en el sentido común, se convierten en obstáculos invisibles para una concepción científica de la naturaleza.

En el pensamiento occidental tradicional, solemos tomar el concepto vida como una entidad supra natural, algún tipo de sustancia, o “energía” que puede darse o quitarse a un organismo, lo que conduce a pensar en la muerte como otra entidad que se opone a la vida. El estudio sobre el origen de los seres vivos nos permite reinterpretar estos conceptos para poner a la vida y a la muerte, no como entidades opuestas y sobrenaturales, sino como propiedades necesarias y complementarias para la circulación de la materia, y la continuidad de los seres vivos.

Solo materia y energía conforman el universo en nuestra dimensión cotidiana. La energía permitió la combinación de los elementos en niveles crecientes de organización hasta la formación de organismos vivos. En un principio los anaerobios fueron heterótrofos dado que obtenían directamente del medio acuático externo la materia orgánica que necesitaban como nutrientes. Pero la rápida multiplicación de estos primeros organismos a lo largo de millones de años, debieron agotar aquel inmenso “caldo”.

Sin embargo los organismos no desaparecieron. Algunos adquirieron, mediante nuevas enzimas, la capacidad de fabricar azúcar a partir del abundante dióxido de carbono atmosférico, utilizando para ello la energía del sol, lo que conocemos como la reacción de fotosíntesis. El gran éxito de estos organismos autótrofos ha quedado registrado en estromatolitos fósiles (formaciones producidas por la sucesiva superposición de capas de carbonato de calcio) formados por colonias de bacterias autótrofas y heterótrofas relacionadas en un microambiente que datan de más de 3000 millones de años. Probablemente la variedad de organismos bacterianos haya llegado a ser inmensa, pero también comenzó a llenar el aire de un desecho muy tóxico: el oxígeno. Estas cianobacterias se multiplicaron durante 1500 millones de años logrando que la atmósfera llegara a tener altos niveles de

este gas modificando profundamente tanto la composición química como el aspecto de la hidrósfera, la litósfera y la atmósfera.

Es muy frecuente que se piense al oxígeno como uno de los elementos esenciales para la existencia de los seres vivos, sin embargo queda claro que no es así. Si bien en las actuales condiciones atmosféricas con una concentración del 20 % de este gas, la mayoría de los seres vivos estamos adaptados al oxígeno que además nos resulta imprescindible, no fue necesario para la formación y desarrollo de los organismos bacterianos durante los primeros 1.000 millones de años. El oxígeno producido por los seres vivos transformó el planeta, su forma y su clima, cambió el color al cielo, que de un rojizo oscuro como en Marte, se fue tornando azul celeste; las rocas y minerales se oxidaron adquiriendo los tonos térreos actuales, rojizos, marrones y ocres.

Aquí hay otro concepto de importancia. Los seres vivos modifican el planeta, influyen decididamente degradando rocas, acumulando oxígeno, depositando minerales, regulando la humedad ambiente, produciendo nuevas sustancias y modificándolo climática y geográficamente en una clara relación dialéctica. Es lógico que así sea, dado que el planeta es todo uno integrado, en el que su materia evoluciona a partir de sus permanentes cambios de un modo profundamente interactivo. Sin embargo las concepciones dualistas y creacionistas han ido conformando la imagen de un mundo escindido entre “lo vivo”, la biósfera, y lo no vivo, “lo inorgánico” escenario para el desarrollo de la vida.

A medida que el oxígeno se fue acumulando en la atmósfera, debieron extinguirse muchísimas especies de organismos que no pudieron tolerarlo. Pero algunos lograron que éste se combine con otras moléculas antes que afecte a las de importancia vital. Estas bacterias aerobias debieron aparecer hace más de 2.000 millones de años, e incluso algunos pudieron aprovechar la gran reactividad del oxígeno para optimizar la oxidación de azúcares, aprovechando la energía liberada para sintetizar ATP, multiplicando de ese modo el rendimiento energético de los nutrientes.

Otra forma de sobrevivir al oxígeno fue la de asociarse a estos modernos aerobios. Ese fue el momento de un nuevo gran salto en los niveles de organización de la materia. La aparición de las células eucariotas tuvo lugar cuando algunas células procariotas se asociaron por un mecanismo que Lynn Margulis llamó Endosimbiosis. Ella fue quien lo propone por primera vez aunque muchos años tardó en ser escuchada, por su condición de mujer. Según esa teoría, hoy aceptada por el mundo científico, que procariotas de gran tama-

ño, probablemente del grupo de las arqueas, brindaron protección en su interior a aquellas pequeñas aerobias, las mitocondrias, beneficiándose mutuamente. Otras además incorporaron también a las cianobacterias, obteniendo de ellas los azúcares que luego oxidarían las mitocondrias para producir ATP, apareciendo así las primeras algas eucariotas unicelulares. Aparentemente, las eucariotas aparecen como una respuesta adaptativa a la crisis del oxígeno.

El origen de estos protozoos es otro ejemplo de cómo un modelo responde más a posturas ideológicas que científicas: los saltos evolutivos de los seres vivos hacia una mayor complejidad se producen por asociación cooperativa para la optimización de los recursos, más que por la competencia a muerte por ellos. Cooperación vs. Competencia; en la formación educativa estos conceptos de la biología se hacen ideas, por lo tanto no podemos pensar que sea una mera casualidad que se priorice la enseñanza de la competencia como motor de la evolución.

El hecho de que tanto mitocondrias como cloroplastos cuenten con su propio ADN de tipo bacteriano y sigan aún hoy reproduciéndose de forma autónoma dentro de las células de las que forman parte, son las evidencias más claras de su origen bacteriano.

Lo que sigue de aquí en más es la diversificación y el aprovechamiento de nuevos recursos y nichos, hasta un nuevo salto en el nivel de organización que, también por asociación cooperativa, da lugar a los pluricelulares. Los primeros pluricelulares debieron formarse entre 700 y 1000 millones de años atrás, según el registro fósil como los de Ediacara. Según estos fósiles, la pluricelularidad habría surgido en distintos momentos de la evolución, y no tendría un único origen común.

2. 1 Los mecanismos de la evolución

Basado en minuciosos estudios y observaciones biológicas y geológicas, con grandes cantidades de material recolectado, consultados y debatidos sus muestras y sus datos con otros especialistas, comparados y contrastados sus resultados durante 20 años, Darwin fundamentó con gran precisión y claridad una teoría sobre cómo sucede la diversidad observable. A lo largo de los tiempos geológicos, con base en la **variabilidad** que se produce incesantemente como parte del proceso de reproducción y mutaciones, la **selección natural**

ejercida por un entorno biogeográfico en permanente cambio, permitirá que unos seres sobrevivan y prosperen, y otros se extingan.

De ahí en más, buscando refutar o confirmar esa teoría, innumerables investigaciones fueron alimentando con nuevos fundamentos un cuerpo de conocimientos que con el aporte de la genética, la bioquímica, la paleontología y la sistemática, resultó, durante la década del 1940 en la Teoría Sintética de la Evolución. Pero los debates no concluyeron y continúan aún hoy buscando desentrañar los ritmos y los mecanismos de la producción de la variabilidad y la aparición de nuevos caracteres, y el alcance de la selección natural para actuar sobre esa variabilidad y producir nuevas especies. Otros debates además se suman para cuestionar las tendencias ideológicas que le dan forma a la teoría de la evolución, dado un contexto político.

Básicamente, la Teoría Sintética postula que:

- Los rasgos, comportamientos y fisiología de los seres vivos, dependen directa y linealmente de sus genes nucleares, mayoritariamente independientes, según la secuencia: GENES → PROTEÍNAS → FENOTIPO
- La variabilidad entre individuos se fundamenta en la recombinación de genes durante la gametogénesis y la fecundación
- Los caracteres se heredan según los modelos formulados por Mendel y completados por la genética de Morgan y otros.
- Las variantes alélicas se deben a mutaciones discretas producidas al azar. Las mutaciones cromosómicas son inviables y sin implicaciones evolutivas.
- La variabilidad implica diferencias de “aptitud” o “fitness”, lo que determina una mayor o menor descendencia fértil, todo lo cual depende solo de la selección natural.
- El sujeto de la evolución es la comunidad, es decir, el conjunto de individuos que pueden cruzarse entre sí dejando descendencia fértil. El acervo génico es el conjunto de alelos que comparten el total de esa comunidad.
- La selección natural es el proceso y el resultado de la competencia intra e interespecífica, debido a la sobreproducción de individuos en un ambiente de recursos limitados. Paulatinamente los linajes con mayor aptitud se volverán mayoritarios en la población.

- La especiación es resultado del aislamiento reproductivo, producido por acumulación de mutaciones genéticas y otros procesos adaptativos graduales.

Si bien es reconocido que estos preceptos son insuficientes a la luz de los actuales conocimientos, para describir el complejo proceso de la evolución biológica, la comunidad científica aún no se pone de acuerdo en incorporar nuevos datos y correcciones.

Con todo, desde Darwin a la actualidad la variabilidad sigue siendo una de las cuestiones centrales, y se discute con intensidad sobre los mecanismos, que la producen y en que medida de ellas pueden provocar la aparición de novedades y diferencias que en algún momento generen aislamiento reproductivo, y una nueva especie. Otros aportes a la variabilidad son menos considerados pero cobran cada vez mayor importancia como la trasposición de genes interespecífica, o herencia horizontal, o las mutaciones cromosómicas que pueden generar cambios abruptos. Recordemos algunos datos de cada una.

2.1.1 Mutaciones

Llamamos mutaciones a las modificaciones que se producen en la secuencia del ADN, que pueden ser discretas, en una o unas cuantas bases, o macromutaciones, cuando todo un fragmento y hasta un cromosoma completo se modifica, se duplica, se pierde o se trasloca. Cuando esta mutación se produce en una célula somática afectará solo a esa célula y sus inmediatas descendientes, y a través de ellas al tejido del que forma parte pudiendo incluso afectar la vida del organismo como en el caso de las células tumorales. Pero las que tienen interés evolutivo son las mutaciones que suceden durante la producción de las gametas, o en los primeros estadios del embrión, dado que dicha mutación afectará a la totalidad o a la mayoría del organismo, pudiendo pasar a las siguientes generaciones, agregando variabilidad al acervo genético de la especie.

Las **mutaciones puntuales**, producidas durante la gametogénesis, según una tasa definida de errores durante la duplicación del ADN, genera cambios en uno o unos pocos pares de bases. A pesar de una muy baja tasa de errores, y un eficiente mecanismo de reparación, esta tasa de mutación se han podido calcular directamente, gracias a la secuenciación de genomas completos de los padres y de uno o más hijos. Los estudios realizados hasta el momento indican que, en condiciones normales, cada hijo lleva entre 40 y 70 mu-

taciones nuevas en la línea germinal, lo que equivale a una tasa de mutación entre $0,9-1,2 \times 10^{-8}$ por nucleótido por cada generación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no todas las sustituciones tendrán el mismo efecto a nivel funcional. Muchas mutaciones serán silenciosas porque el código genético es ambiguo (el tercer nucleótido del triplete puede ser sustituido sin modificaciones sustanciales), porque no afectan al ADN codificante o a regiones reguladoras del genoma; otras, las más dañinas, sufrirán una fuerte presión selectiva, siendo inviable, y su frecuencia alélica será muy baja en la población o desaparecerán. En definitiva, la presencia de polimorfismos y mutaciones en las poblaciones es el resultado del **equilibrio entre mutación-reparación-selección**. Es decir, las mutaciones puntuales generan una porción de la variabilidad, y aunque su acumulación puede generar cambios a lo largo de las generaciones, se cuestiona su capacidad para producir la aparición de caracteres novedosos por sí solas.

Las **mutaciones cromosómicas**, también denominadas aberraciones cromosómicas, son una fuente importante de variabilidad hereditaria. Sin embargo en general se asume que las translocaciones, inversiones, deleciones, translocaciones robertsonianas y duplicaciones, usualmente ocasionan malformaciones, la mayoría inviables, y raramente producen variantes fenotípicas que se transmiten a la descendencia. Lógicamente, es mucho más frecuente que una mutación provoque problemas, y las cromosómicas en particular, son el mejor ejemplo.

Pero también hay pruebas de sus aportes a la variabilidad y la evolución. Un ejemplo típico es el de los propios homínidos, cuyo cromosoma 2 es producto de la fusión de dos cromosomas de un simio ancestral, que se supone tendría 24 pares de cromosomas, tal como los actuales chimpancés.

La poliploidía es también una forma de variaciones cromosómicas en plantas y aunque menos común en animales, hay ejemplos notables. En el 2006 se nombraron tres nuevas especies de lémur saltador basándose en su cariotipo. De los lémures estudiados hasta ahora, el número diploide de cromosomas varía entre $2n=20$ y $2n=66$. En el caso de los lémures marrones, el número diploide se extiende de $2n=44$ a $2n=60$ a pesar de existir grandes semejanzas en la morfología.

Otro ejemplo estudiado es el de dos ranas de Estados Unidos. *Hyla chrysoscelis* es el típico animalito diploide y presenta una dotación de 24 cromosomas (= **2n**). Por su parte, *Hyla versicolor* posee 48 cromosomas (= **4n**), que se corresponden con una duplicación ge-

nética de los 24 cromosomas de *Hyla chrysoscelis*. De esto se deduce que *Hyla versicolor* se originó a partir de *Hyla chrysoscelis* por un evento de duplicación cromosómica.

Más complejo aún es el género *Xenopus*, una rana africana. *Xenopus laevis* tiene una conformación *tetraploide* (**4n**), organizada en 36 cromosomas. Y se conocen 9 especies *tetraploides* más, todas ellas con 36 cromosomas. Hay otras 5 especies de carácter *octaploide* (**8n**), cada una con un genoma de 72 cromosomas y se conocen dos especies *dodecaploides* (**12n**), cuyo genoma está formado por doce juegos de cromosomas. Son *Xenopus longipes* y *Xenopus ruwenzoriensis* y cada una posee un total de 108 cromosomas. En este caso vemos un fenómeno de Aloploidía por el que la descendencia poliploide (una hembra con baja fertilidad) se cruza con un macho parental no poliploide formándose así una tetraploidía, por hibridación. Si su descendencia vuelve a ser fecundada por el parental original, se obtiene un hexaploide, más estable.

¿Cuál es la ventaja de la poliploidía? Simplemente la de tener más genes que pueden sufrir modificaciones y nuevas funcionalidades sin perder las proteínas originales que siguen siendo funcionales a partir de los genes de otros cromosomas.

La cantidad de cromosomas es claramente otra fuente de variabilidad, que puede determinar aislamiento reproductivo, y lo que es más importante, puede determinar la formación de nuevas especies en períodos de tiempo mucho más cortos que los previstos por la gradualidad de mutaciones puntuales considerados en la Teoría Sintética original.

Los **Elementos Transponibles** o Transposones, son fragmentos de ADN, de largo variable, que tienen la sorprendente cualidad de saltar desde su ubicación original hasta otra parte del genoma, hasta el genoma de otra célula, o hasta el genoma de otro individuo de la misma o de otra especie. Son una importantísima fuente de variación, y según algunos investigadores una de las principales, con capacidad para agregar o quitar genes, alterar su expresión, modificar el tamaño del genoma, y hasta intervenir en la ploidía. Pero además es una de las peores contradicciones a los postulados de discreción y gradualidad de la Teoría Sintética.

Si bien estos elementos transponibles se conocen desde la década del '50, se los consideró como fenómenos excepcionales y sólo presentes en plantas y "organismos inferiores". Estudios posteriores fueron advirtiendo su presencia en todos los seres vivos, desde bacterias y hongos hasta animales y por supuesto en el ser humano, pero en un primer

momento se consideró que solo podían aportar “material basura” o sin sentido. La realidad es que forman parte de un muy importante porcentaje de la totalidad del genoma.

Si bien la mayoría de los organismos cuenta con mecanismos de defensa para inactivarlos mediante metilación, cuando estos fragmentos de información genética se integran al genoma de alguna gameta, serán heredados a la descendencia pasando a formar parte del genoma de esa comunidad. En general se insertan en zonas no codificantes, modificando regiones reguladoras de la expresión de otros genes, aunque por duplicación y mutación pueden pasar a ser genes activos.

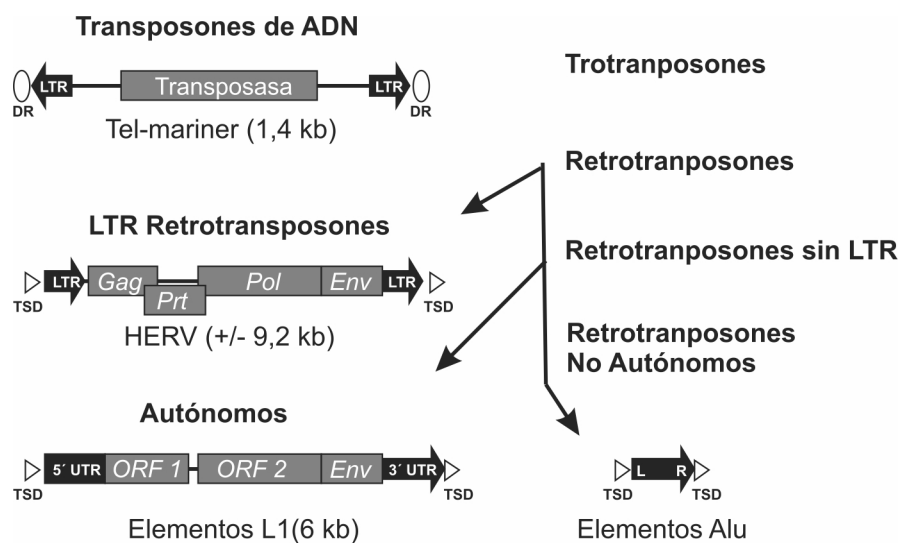
Todos tienen algún mecanismo para transponerse de un lugar a otro, y entre los más frecuentes se encuentran de los *extremos cohesivos también llamados “pegajosos” o “sticky ends”*. En términos generales se los puede clasificar en dos tipos: transposones de ADN, fragmentos que pueden cortarse de su ubicación e insertarse en otra posición gracias a una enzima que ellos mismos codifican llamada **transposasa**; y transposones de ARN o retrotransposones, que cuentan en su secuencia con información para sintetizar la **transcriptasa reversa**, enzima que puede utilizar el ARN como molde para generar la cadena correspondiente de ADN, lo cual es el proceso inverso de lo que sucede normalmente en cualquier célula. Además de su interés evolutivo, es de destacar el impresionante aporte a la Ingeniería Genética que significaron el descubrimiento de estas enzimas, que son hoy herramientas imprescindibles.

Otros retrotransposones cuentan además con la información para sintetizar proteínas que constituyen una cápside viral, es decir que son retrovirus que infectan a una célula, se copia como ADN, se integran a su genoma, y ahí quedan formando parte del mismo hasta que alguna condición particular los activa y emergen, o una mutación los modifica y el curso de la evolución les asigna alguna función, o no. Este es el caso del Herpesvirus o el Parvovirus, y otros varios que se han detectado en el genoma humano, y forman parte de un grupo de secuencias llamadas HERV (retrovirus endógenos humanos), que representan copias, normalmente truncadas, de retrovirus que se han ido integrando en el genoma humano en el curso de la evolución y cuyas secuencias son, por ejemplo, el origen de protooncogenes celulares. Constituyen alrededor de un 8% del genoma (hay unas 450.000 copias).

Uno de los retrotransposones presentes en mayor cantidad en el genoma humano, son los elementos Alu, que además son específicos de primates y constituyen un 10% de

nuestro genoma. Un elemento Alu está formado por una secuencia de 250 - 280 nucleótidos, con 1.500.000 copias por genoma y una repetición cada 4 kb (kb = Kilobases: 1000 bases) como promedio. Estos elementos Alu, forman parte de un grupo de elementos repetidos llamados SINE (Short Interspersed Nuclear Elements, o elementos nucleares dispersos cortos) y en total constituyen un 20% del genoma humano.

En menor cantidad, hay otros llamados LINE (Long Interspersed Nuclear Elements, o elementos nucleares dispersos largos); el principal LINE es el llamado LINE-1 ó L1, formado por una secuencia de unas 6 kb repetida unas 800.000 veces en el genoma. Un elemento L1 codifica dos proteínas: una *ARN-binding protein* y una proteína con actividad endonucleasa y retrotranscriptasa. Está flanqueado por unas pequeñas repeticiones directas (en la misma orientación) y termina en una cola poli-A. Los elementos LINE son retrotransposones, puesto que pueden copiarse a sí mismos a través de un intermediario ARN y transponerse a otras localizaciones genómicas.



Clases de elementos móviles. *Transposones de ADN*, con repeticiones terminales invertidas (ITR) y un marco de lectura abierto (ORF) que codifica una transposasa. Están flanqueadas por repeticiones directas cortas (DR). Los retrotransposones se dividen en clases autónomas y no autónomas dependiendo de si tienen ORFs que codifican proteínas necesarias para la retrotransposición. Ejemplos de retrotransposones LTR son retrovirus endógenos humanos (HERV). También se muestran la transcriptasa reversa (RT) y los dominios de endonucleasa (ES). La RT, EN, y un dominio rico en cisteína conservada (C). Un elemento Alu es un ejemplo de un retrotransposón no autónomo. Alus contienen dos monómeros similares, la izquierda (L) y derecho (R), y al final de una cola de poli (A).

(<https://cajalesygilileos.wordpress.com/2013/05/19/los-transposones-los-genes-saltarines-scitable/>)

Se calcula que 1 de cada 100-200 nuevos nacimientos lleva una inserción nueva de un Alu o de un L1, que pueden ser causa de enfermedades por diversos mecanismos, esta tasa varía entre especies. Se calcula que existen actualmente unos 5000 elementos L1 completos en el genoma humano, de los cuales unos 90 están activos (capaces de retrotransposición). El potencial patogénico de estos elementos está dado por la capacidad de insertarse aleatoriamente e interrumpir genes, de modificar la expresión de genes cercanos, pero sobre todo de inducir recombinaciones ilegítimas. Por si fuera poco, sus enzimas pueden inducir la retrotransposición de otros fragmentos. Un 80% de los genes humanos tienen L1 en sus intrones, lo que indica el importantísimo papel en la regulación de la expresión génica que estos han tenido en la evolución.

Nuestro genoma también contiene unas 300.000 copias de transposones de ADN, lo que supone un 3% del total del genoma. Estos elementos contienen el gen (habitualmente truncado) de la transposasa, flanqueado por repeticiones invertidas, también responsables de algunas patologías humanas.

Del mismo modo que los plásmidos bacterianos, capaces de transportar información complementaria entre bacterias sin importar su especie, los Elementos Transponibles pueden incluir entre sus fragmentos, genes que pasarán a otros seres incluso de muy diferentes especies, a través de virus.

Recientemente, se ha demostrado que en la evolución de la placenta, han tenido fundamental participación elementos transponibles de ADN que constituyen una red de genes reguladores y activadores relacionados con la comunicación materna-feto y la supresión del sistema inmune de la madre para proteger y evitar el rechazo del feto.

Durante mucho tiempo, dada la línea conceptual de la Teoría Sintética que solo aceptaba mutaciones discretas y graduales heredable de padres a hijos, se consideró que los elementos transponibles solo aumentaban la cantidad de "ADN basura" sin incidencia en la expresión génica y mucho menos en la formación de nuevos genes. La transferencia horizontal de genes, es decir que puedan transferirse genes entre especies distintas, modifica profundamente las restricciones de la herencia mendeliana, y transforma radicalmente la dinámica de la evolución.

2.1.2 Segregación aleatoria de cromosomas homólogos

Cuando los homólogos se separan en la meiosis, no se separan según sean de origen paterno o materno, sino que se distribuyen aleatoriamente. Como los homólogos pueden tener pequeñas diferencias en sus alelos, el resultado es que cada gameta lleva una combinación única de cromosomas, y por ende de genes.

Así es como tenemos algunos rasgos de nuestro padre y otros de nuestra madre, y algunos incluso de nuestros abuelos, y otros tantos que nos son propios y originales.

Las combinaciones, y por lo tanto la variabilidad que se pueden generar por este mecanismo es altísima, porque con 23 parejas de cromosomas el número de combinaciones posibles es igual a 2^{23} , solo considerando la recombinación. La altura de una persona es un ejemplo de estas combinaciones posibles y guarda una relación con el promedio de la altura de los padres.

Durante este proceso de segregación de homólogos, son frecuentes los errores en la disyunción cromosómica, dando lugar a polisomías o aneuploidías (deleciones y traslocaciones), que suceden en general durante la meiosis I y con mayor frecuencia en la ovogénesis que en la espermatogénesis. La mayor parte de estos errores son inviables cuando se trata de cromosomas autosómicos, terminando en abortos espontáneos o graves malformaciones algunos de escasa sobrevivencia, con la excepción de la trisomía del par 21 (síndrome de Down). Sin embargo cuando se producen en los cromosomas sexuales (XXY, XXX, X, son algunas de las más frecuentes) los individuos pueden tener una sobrevivencia normal, aunque con algunas malformaciones más o menos leves y con esterilidad.

2.1.3 Entrecruzamiento cromosómico

Sucede durante la Meiosis I, cuando los cromosomas homólogos se aparean a partir del contacto entre sus quiasmas, sitio en el que además del contacto se intercambian fragmentos, de modo que uno o dos fragmentos de un cromosoma pasa a formar parte del otro. Este intercambio de fragmentos cromosómicos ya existe en algunas bacterias, y algunos investigadores proponen que se ha conservado como un mecanismo evolutivo para reparar roturas y errores. El mecanismo es común a todos los eucariotas y si bien también tiene el objetivo de reparación, además es fuente importantísima de variabilidad.

En la especie humana se ha calculado que se producen unos 55 sobrecruzamientos por célula, porque ese es el número medio de quiasmas que se observan. Esto supone una media de al menos 2 entrecruzamientos por par cromosómico, incluidos los cromosomas sexuales.

Si consideramos los dos mecanismos juntos, el entrecruzamiento y la segregación de homólogos, el resultado es una infinita posibilidad de variantes; cuando se habla de la deriva génica en una población, es precisamente por esta capacidad para recombinar todo el acervo genético de la población, de una generación a otra.

Sin embargo aún es muy discutido cuál es la probabilidad de que la variabilidad y la posible especiación producida de este modo permita el surgimiento de caracteres novedosos o grandes modificaciones, en los casos de macroevolución. Algunos sostienen que es muy escasa.

2.1.4 Epigénesis

La **epigénesis** es otro más de los diversos mecanismos de producción de variabilidad, pero uno de los más controvertidos, ya que contraría todos los conceptos básicos de la herencia genética.

Consiste en modificaciones **heredables** que sufre el ADN sin alterar la secuencia de nucleótidos, tales como metilación de ciertas bases del ADN y fosforilación, acetilación y metilación de histonas y procesos de modificación en la “edición” del ARNm, todos los cuales modifican la expresión de los genes. Muchas de estas modificaciones sobre el ADN son heredadas, por lo tanto la epigenética, analiza tanto la variabilidad fenotípica producida por el ambiente durante el crecimiento y desarrollo, como los patrones de herencia epigenéticos transgeneracionales que las condiciones ambientales pueden inducir.

Estamos hablando entonces de caracteres adquiridos por la influencia del ambiente, capaces de ser heredados a la descendencia: ni más ni menos que Lamarckismo. Claro que estas situaciones no son dramáticas ni alcanza para determinar el surgimiento de nuevos caracteres, pero podrían modificar patrones de comportamiento que conlleven algún aislamiento reproductivo.

Es bien conocido el caso de que en muchos anfibios y reptiles, el sexo se determina por las condiciones térmicas del huevo, a diferencia de mamíferos cuya determinación es cromosómica. Este tema se amplía en el siguiente capítulo.

En mamíferos, las hormonas juegan un papel transductor por el que, durante el desarrollo, pueden modificar el fenotipo a veces dramáticamente. Sin embargo los cambios epigenéticos que nos interesan son aquellos que pueden ser heredados.

Recientemente se ha comenzado a resaltar la importancia del ambiente proporcionado por el efecto materno en el fenotipo de la descendencia, el cual resulta ser blanco de la selección natural. De esta forma comienzan a elaborarse nuevos argumentos que intentan explicar relaciones entre mecanismos epigenéticos y procesos de adaptación como una integración continua de desarrollo, ecología y evolución. Es así que algunos modelos evolutivos incluyen un proceso de adaptación epigenética transgeneracional que permite coordinar las experiencias ambientales maternas con la respuesta fenotípica y la adaptación de su descendencia.

Sería posible pensar que un gen desactivado por metilación, heredado así de una a otra generación, quedaría expuesto a mutaciones sobre las que la selección natural no actúa, produciendo, en dos etapas una modificación genética inducida por el entorno.

2.2. Sobre la Selección Natural

Si la **variabilidad** es la aparición constante de variantes fenotípicas en una población, según las interacciones entre los diversos genotipos y su ambiente, la Selección Natural abarca todo ese conjunto de factores externos que llamamos “ambiente”, que determinarán cuáles individuos serán “seleccionados” por sus cualidades, o ventajas adaptativas. Dichas ventajas adaptativas le permitirán el mejor acceso a los recursos vitales y por lo tanto podrán dejar mayor número de descendencia, con lo que las características favorables tenderán a ser mayoritarias en la población, a lo largo del tiempo.

Es conocido que Darwin toma un concepto usado por Malthus en 1798 quien afirmó que parte del sufrimiento humano era consecuencia de que la población humana crece más rápido que su capacidad para producir recursos y alimentos. Trasladado al medio natural, Darwin expresa que la tasa reproductiva de los seres vivos es mucho mayor que los recur-

son disponibles, por lo que usa la expresión “lucha por la existencia” para describir la selección natural. Pero expresa:

“Debo advertir ante todo que uso esta expresión en un sentido amplio y metafórico, que incluye la dependencia de un ser respecto de otro y -lo que es más importante- incluye no sólo la vida del individuo, sino también el éxito al dejar descendencia. De dos cánidos, en tiempo de hambre, puede decirse verdaderamente que luchan entre sí por cuál conseguirá comer o vivir; pero de una planta en el límite de un desierto se dice que lucha por la vida contra la sequedad, aunque más propio sería decir que depende de la humedad.”

Vemos cómo Darwin destaca con claridad que en la “lucha por la existencia” deben considerarse la totalidad de las distintas formas de interrelaciones entre los seres vivos, y de estos con su entorno físico y climático. Pero de un modo metafórico se refiere a la selección natural como una “Supervivencia del Más Apto” concepto que toma de Herbert Spencer, lo que demuestra la influencia sociopolítica que recibe de su entorno. Podría haber utilizado otra metáfora que describa mejor el modelo de ecosistema, pero vive en una sociedad en la que el sometimiento de esclavos y campesinos para beneficio de las clases altas debe ser justificado no como una lucha de clases, sino como una lógica propia de la naturaleza.

También observa que esta constante presión de la selección no disminuye la variabilidad, como podría pensarse si sólo sobrevivieran los que poseen determinados caracteres más adecuados. Por el contrario, hay permanentes fluctuaciones e infinitas graduaciones de cada una de estas variaciones, valiosas en sí mismas ante las permanente fluctuaciones ambientales.

“A esta conservación de las diferencias y variaciones individualmente favorables y la destrucción de las que son perjudiciales la he llamado yo selección natural o supervivencia de los más adecuados. En las variaciones ni útiles ni perjudiciales no influiría la selección natural, y quedarían abandonadas como un elemento fluctuante, como vemos quizá en ciertas especies poliformas, o llegarían finalmente a fijarse a causa de la naturaleza del organismo y de la naturaleza de las condiciones del medio ambiente.”

Es necesario en este punto que recordemos que Darwin no conocía en absoluto el concepto de alelo (si bien se sabe que las investigaciones de Mendel estuvieron a su alcance, es posible que nunca las haya leído), ni de gen y mucho menos deriva génica. Pero tiene muy en cuenta la herencia de caracteres que varían a lo largo de una población y que son transferidos de una generación a otra con la posible aparición azarosa de unos nuevos y la desaparición de otros, algunas veces por azar, otras por selección natural.

Ya en el siglo XX la genética poblacional aplicó modelos matemáticos (casi más que estudios de campo) definiendo modelos por los que podría actuar la selección natural según tres tendencias:

1. Selección estabilizadora: Por la que la presión sobre determinado carácter favorece fuertemente a algunos de ellos disminuyendo la variabilidad.
2. Selección direccional: en la que la aparición de un cambio externo favorece alelos escasamente representados, modificando la media poblacional hasta que este se hace mayoritario.
3. Selección disruptiva; por la que determinado factor externo perjudica la media poblacional, favoreciendo por lo tanto los dos extremos de la curva de representación de fenotipos, generando poblaciones con caracteres opuestos.

Algunos textos agregan la selección sexual, como un mecanismo intraespecífico por el que la hembra utiliza algún criterio de selección para privilegiar determinados caracteres del macho, relacionados en algunas especies con su tamaño, su capacidad para competir con otros machos en una pelea, o en alguna cualidad del canto, o la confección de un nido, la obtención de alimento, o en sus movimientos al estilo de una danza (ver Selección Sexual en el capítulo 2). Todos esos preparativos previos a la cópula denominados cortejo, determinarán cuáles machos serán seleccionados para dejar descendencia, comportamiento que debió evolucionar manteniendo esos caracteres fenotípicos preferidos por la hembra, genéticamente unidos a otro conjunto de cualidades que favorecen la supervivencia y la optimización de recursos. Sin embargo esto no siempre es tan claro.

La idea de una selección natural que favorece a los más aptos, suele estar fuertemente ligada a la idea de la competencia por la supervivencia como ya se dijo, alentadas por las tendencias ideológicas hegemónicas. Sin embargo también pueden ser seleccionados aquellos seres que mejor se asocien y cooperen con otros aún de especies muy diferentes

para la optimización de recursos, en relaciones que llegan incluso a la simbiosis. No son pocos los autores que sostienen que la asociación y los procesos simbióticos han sido el verdadero motor de los saltos evolutivos más notables: desde la aparición de los eucariotas, hasta la vasta asociación de organismos pluricelulares con bacterias y hongos. Ante la necesidad de dar respuestas rápidas a cambios bruscos, la asociación permite respuestas adaptativas originales que alientan procesos de coevolución notables, muy pocas veces destacados en la bibliografía más que como casos de relaciones ecológicas. Si bien es cierto que no es posible verificar estas relaciones en el registro fósil, los ejemplos en la naturaleza son tantos y tan notables que es inevitable volver a la explicación de una direccionalidad ideológica antes que una imposibilidad técnica, para su análisis.

Volviendo al marco general de la Teoría Sintética, otro de los debates de interés es hasta qué punto el fenotipo es resultante adaptativo de la selección natural. En términos de genética de poblaciones, la selección natural se define ahora más rigurosamente como la **tasa de reproducción diferencial** de distintos genotipos. Según Dobzhansky (1951) *“La Evolución es un cambio en la composición genética de las poblaciones. El estudio de los mecanismos de evolución es competencia de la Genética de Poblaciones”*. Este modelo corresponde a la tradición de la teoría Sintética y es acusado, por algunos autores de “Adaptacionista” y “Determinista”, dado que considera a cada **gen** perfectamente adaptado a su entorno con una función determinada, producto de la estricta selección natural.

Esto ha conducido al error de intentar forzar explicaciones finalistas extravagantes, sobre la utilidad adaptativa de determinados caracteres: bajo la consigna “esto está aquí para”, como si hubiera aparecido ya con esa función, y cada carácter debiera tener una utilidad específica y probada.

Pero no todo es selección natural! Ya lo había dicho el propio Darwin, que la selección natural no es omnipresente, y que no todo está expuesto a su designio. Hay estructuras o caracteres, patrones de líneas y hasta órganos que pueden no tener valor adaptativo alguno, y ser resultantes del diseño arquitectónico del organismo, o quedar como resabio sin utilidad real. El desarrollo de los pulmones se produce a partir de un saco aéreo en desuso es un conocido ejemplo: esos peces se arrastraban en el barro y no lo necesitaron en su función original de flotabilidad, pero en un principio tampoco lo pudieron aprovechar para obtener oxígeno, momento en el que pudo haber desaparecido, pero perduró hasta que algunas modificaciones le asignaron una nueva utilidad, logrando la aparición de los anfibios.

Stephen J. Gould junto a N. Eldredge proponen el modelo de Equilibrio Puntuado, que se contrapone a la gradualidad y discrecionalidad de la Teoría sintética. Según ese modelo, períodos de estabilidad climática y geográfica se corresponden con pocos o ningún cambio en el conjunto de las especies en un determinado territorio, hasta que fenómenos externos como cataclismos o simplemente un cambio de clima, inducen una gran aceleración en los procesos evolutivos (macroevolución) en cortos períodos, hasta un nuevo momento de calma y estabilidad. Esto se corresponde mejor con algunas secuencias evolutivas observadas en el registro fósil, en el que durante largos períodos no parece haber cambios significativos, y en un determinado momento unos seres desaparecen para dar lugar a otros distintos sin demasiadas etapas intermedias. Si bien se puede argumentar que durante el surgimiento de especies con caracteres novedosos, sus representantes intermedios son tan escasos que no llegan a dejar registro fósil, el escaso período entre la desaparición de unos y la aparición de otros no coincide con la propuesta de los gradualistas.

La extinción de especies es otro fenómeno que no siempre está expuesto a la selección natural. Tal como dice E. Mayr, la mayoría de las veces no podremos conocer las causas de una extinción, que pueden ser tanto producto de un cataclismo que produce una Extinción Masiva de especies, como algún otro proceso geológico repentino en los que "la supervivencia del más apto" no aplica. En ese aspecto, un caso muy interesante el de espectacular fauna que ha quedado registrada en Burgess Shale (Canadá), ya mencionado, que corresponde al periodo llamado Explosión Cámbrica. En todo ese amplísimo territorio montañoso de origen sedimentario se pueden observar que en un corto período de 10 millones de años surgieron una increíble variedad de seres con los más extraños planes de desarrollo, y pensemos que muchos otros aún pudieron no haber quedado fosilizados; la mayoría de todos ellos se extinguieron, quedando solo unos pocos que representan casi la totalidad de los phyla conocidos. Ante semejante extinción masiva, se especula que solo el azar debió ser quien determinó cuáles de esas especies perdurarían para continuar el proceso evolutivo.

3. Concepciones interesadas y tergiversaciones

Luego de haber hecho un repaso muy general sobre algunos aspectos y mecanismos de la evolución, se hace necesario abordar algunas concepciones científicas y analogías que pasan al conocimiento social con algunas tergiversaciones, que se constituyen en verdaderos obstáculos para el aprendizaje, y que se repiten casi por costumbre en la educación sin más fundamentos que algunos viejos prejuicios. A continuación ejemplificamos algunas de las más frecuentes, de las que escapar, es a veces todo un esfuerzo.

- El término Evolución, como criterio de mejoramiento y progreso, es introducido por Spencer y no por Darwin. En la naturaleza hay variación y cambio, y ni más ni menos que eso es la evolución, el cambio a lo largo del tiempo que no produce mejoramientos, y ni siquiera mayor complejidad. Por lo tanto es incorrecto decir que un ser vivo es más evolucionado que otro, o que la evolución tiende a mejorar la especie, ideas que solo se manipularon para justificar el racismo y la eutanasia.
- Es frecuente interpretar que la evolución ha transitado por caminos previstos o “destinos inevitables” hasta los representantes actuales. Así es habitual en el aula que los adolescentes lleguen a la conclusión de que los monos, con tiempo suficiente, llegarían a ser inteligentes, o “tan inteligentes” como nosotros. No hay tal finalismo evolutivo en sentido alguno: no existe la posibilidad de prever un sentido evolutivo en el medio natural.
- Se usa mucho en diversas bibliografías escolares y de divulgación, representar las secuencias evolutivas como una línea de tiempo en la que un ser vivo inferior deja lugar a otro más complejo que a su vez se continuará en otro más evolucionado (por parecido a los actuales), siendo uno motivo y consecuencia del otro, de izquierda a derecha como el sentido del progreso en la escritura. Un ejemplo clásico es el de los animales en donde unos pocos invertebrados dan lugar a los peces, que luego dan lugar a los anfibios, luego a reptiles, y finalmente a mamíferos y aves, denotando la inferioridad de los grupos anteriores. Es inevitable así pensar en una evolución que siempre mejora para lograr “nuestro” mundo actual.
- Cuando se representa la diversificación de las especies se suele dibujar un árbol en forma de pino en el que el ser humano ocupa la cumbre. En otros más elabo-

rados se muestra un cono invertido, con la parte pequeña abajo, que va aumentando su frondosidad hasta la actualidad, siendo los más diversos y complejos, los seres más modernos. Si realmente se representara la diversidad, ¿cómo debería ser este árbol considerando que los insectos son casi 1 millón de especies y los mamíferos solo unas cuatro mil? ¿cómo debería representarse temporalmente si la fauna de Ediacara muestra una variabilidad mucho mayor que la actual?

- La iconografía tradicionalmente encontrada en los libros de texto relata gráficamente el camino evolutivo que conduce al ser humano de un modo lineal, destacando al *Homo sapiens* como la culminación acabada de un proceso, sin indicar su importancia relativa en el tiempo respecto de otros homínidos. En el relato, suele destacarse, aún sin explicitarlo, que solo el *Homo sapiens* desarrolló un lenguaje, una cultura y una representación simbólica de su entorno.
- La iconografía nunca representa la interdependencia entre los seres vivos, quedando los niveles “más inferiores” en la escala evolutiva casi como descartables o prescindibles, cuando en realidad es lo contrario. Las posibilidades de que el planeta siga habitado por seres vivos, depende mucho más de esos seres “inferiores” como bacterias, algas y hongos, que de la permanencia de los mamíferos como nosotros.
- El lenguaje también nos lleva a “humanizar” las cualidades de los seres vivos, calificándolos de buenos, asesinos, torpes, hábiles, agresivos, sanguinarios, inútiles, sagaces, misteriosos o independientes. En esta idea se pierde de vista que cada ser vivo tiene caracteres que han evolucionado en conjunto con su ecosistema y por tanto adaptados a su rol biótico. Sus comportamientos son el resultado de esta integración y no tienen intencionalidades más allá que la de responder a sus pautas de supervivencia.

Es necesario destacar que estas concepciones antropocéntricas no están “en la naturaleza humana”, frase que merecería un libro aparte, ni son comunes a todas las culturas. Es bien sabido que las culturas originarias de América tenían una profunda comprensión de la circulación de la materia (la Madre Tierra como origen de todo) y el flujo de la energía (el Padre Sol), sistema en el que el ser humano es parte integrada y dependiente del ecosistema

junto al resto de los seres vivos; tomaban por ello todos los recaudos necesarios para su respeto y cuidado. Las concepciones depredatorias nos vienen de la llamada cultura occidental, en la que se combinan concepciones de la religión judeocristiana y el paradigma que dió por resultado la revolución industrial. Desde esta óptica, se ve a la naturaleza como el espacio salvaje que hay que domesticar y someter con los medios tecnológicos para ponerlo al servicio del ser humano, máxima creación de Dios.

Así es como llegamos al presente con una situación de crisis ambiental y una grave imposibilidad de modificar no ya los simples hábitos de las personas, por demás insuficiente, sino las políticas depredatorias, extractivistas y contaminantes de las grandes potencias, dueñas del poder económico mundial.

4. Los homínidos como objeto de estudio

Dado que la evolución uno de los temas centrales y prescriptivos del segundo año de la escuela secundaria, la evolución de los homínidos es un excelente ejemplo para abordarla dado que es uno de los procesos mejor estudiados, y brinda una excelente oportunidad pedagógica para comprender y desmitificar los orígenes animales de nuestra especie, de nuestra capacidad para el trabajo, de nuestra naturaleza social, del origen del lenguaje y de nuestra dependencia cultural, caracteres adaptativos que permitieron nuestra supervivencia. Muy pocas veces se analiza en profundidad cómo es que estos caracteres nos devienen como seres biológicos resultantes de un largo proceso evolutivo.

La evolución en general y la evolución de los homínidos en particular deben ser una de nuestras principales herramientas para la Alfabetización Científica, entendida como desmitificación y desnaturalización de prejuicios y supersticiones instaladas en la cultura y el sentido común.

Haciendo un repaso muy sintético de los aspectos más generales, podemos comenzar mencionando que los primeros homínidos aparecen en África oriental a partir de primates, probablemente del género *Ramipithecus*, que además fueron ancestro común de gorilas y orangutanes, y posteriormente de chimpancés y bonobos, nuestros parientes genéticos más cercanos en la actualidad.

Uno de los modelos propone que un grupo de aquellos antepasados quedaron habiendo en el este de África, aislados por la falla del Rift, producida hace 30 millones de años

por movimientos volcánicos, poniendo un obstáculo insalvable no sólo a los animales de esa región sino a los vientos húmedos del oeste. Esto último produjo un paulatino cambio climático; la selva pasó lentamente a ser una estepa, con escasos árboles (este modelo de aislamiento reproductivo corresponde a la especiación simpátrica).

La mayoría de aquellos animales adaptados a la vida selvática no pudieron sobrevivir en esas condiciones; entre los pocos sobrevivientes se encuentran algunos primates que pudieron cambiar su modo de vida arborícola y caminar en dos patas, lo que les permitió un más fácil desplazamiento sobre el suelo, dejando las manos libres para manejar herramientas como palos y piedras.

Actualmente algunos discuten si fueron Australopitecinos los primeros homínidos (homininos según las nuevas clasificaciones), o si existieron otros primates que caminaron en dos patas anteriores a ellos, como *Orrorin tugenensis* o *Sahelanthropus tchadensis*. Otros autores sugieren que estos dos deberían incluirse dentro del género *Australopithecus*.

Hace aproximadamente entre 6 a 8 millones de años, esos primeros homínidos de 1,20 a 1,40 m de altura y de aspecto idéntico a un chimpancé, caminaron erguidos casi igual que los homínidos actuales. A partir de ese momento los diversos grupos que fueron emigrando, dieron origen a nuevas especies llegando a coexistir en el sudeste de África hasta cuatro especies diferentes entre australopitecinos, *Paranthropos* (otro género que deriva de *Australopithecus*), *Kenianthropus* un tercer género que aún se discute si lo es, y *Homo*, hace de esto entre dos y tres millones de años.

El género *Homo*, definido originalmente por el propio Linneo, debió aparecer en el África oriental proponiéndose a *Homo habilis* y *Homo rudolfensis* como los primeros de ellos, con características en la dentición, el largo de las extremidades y el mayor volumen cefálico como algunas de sus características distintivas. Sin embargo no hay acuerdo completo; algunos proponen que estas dos son la misma especie con un gran dimorfismo, incluso otros especulan que *H. habilis* debería ser un australopitécido, dado su tamaño corporal y cefálico.

Hasta hace muy poco se pensaba que una cualidad distintiva de los Homo, cuyos restos más antiguos datan de 2,5 m.a., era su capacidad para fabricar herramientas de piedra. La producción de útiles de piedra es una actividad con una intención definida y aprendida con continuidad, que requiere conocimiento de la materia prima, sus propiedades y técnicas de tallado, lo que se considera, requiere capacidades intelectuales y sociales desarro-

ladas. Sin embargo esto también se pone en entredicho, ya que el hallazgo de piedras talladas de más de 3.000.000 millones de años, anteriores a los primeros *Homo*, sugieren que *Australopithecus* pudo haber logrado esa habilidad. Estamos hablando de homínidos con un cerebro de entre 450 a 550 cm³, no tan diferente al *Homo hábilis*, con 600 cm³.

La aparición de nuestra especie, *Homo sapiens*, se calcula en apenas 150.000 años según el registro fósil. Sin embargo esto es materia de estudio aún, dado que análisis genéticos sobre huesos de *Homo neanderthalis* y *Homo denisovano*, muestran que compartimos varios genes que harían suponer que no hubo aislamiento reproductivo, y no está claro si serían especies diferentes o solo variedades, y si esto es así, el ser humano como tal es un poco más antiguo.

El primer y principal carácter homínido no es la mayor inteligencia, sino el **andar bípedo**. Gracias a esto las manos quedaron libres para el uso de herramientas como palos y piedras, lo que permitió un rápido perfeccionamiento en el uso de las manos. La característica de **ser social**, conformando grupos tribales de entre 15 a 30 individuos con distribución de tareas y organización política también observada en gorilas y chimpancés, fue aportando las mayores ventajas adaptativas. Sumado a los cambios en la forma de vida y los nuevos nichos, se produjo un cambio también en la dieta que ya en *Australopithecus* tiene características de omnivorismo y carroñeo. Es interesante destacar que son diez o más los representantes del grupo de australopitecinos que se distribuyeron por todo el este africano, hasta el sur del continente con diversos hábitos alimenticios.

El género *Homo* determinó la aparición de nuevas cualidades y entre ellos, los que mejor sobrevivieron y reprodujeron fueron aquellos que consiguieron la mayor capacidad de organización social, las mejores habilidades en la confección y uso de herramientas, y el mayor ingenio para dar respuesta a los constantes desafíos del ambiente. La consecuencia directa de estas nuevas características fue el desarrollo de mecanismos de comunicación cada vez más complejos.

El registro fósil muestra un paulatino aumento de la capacidad craneal, pero también de una mayor complejidad cerebral, produciéndose en algún momento un reordenamiento conformacional que determinó nuevas áreas con nuevas funciones, una de las más importantes, es el lenguaje fonado, y los lóbulos frontales de la corteza cerebral, donde se procesa el pensamiento abstracto. El desarrollo de una cultura es resultante gradual de este proceso evolutivo, aunque no es una exclusividad del *Homo sapiens*, y la construcción de he-

ramientas lo demuestra. Incluso el lenguaje debió aparecer en especies anteriores, aunque probablemente ese lenguaje no era fonado, sino por medio de gestos, señas manuales y sonidos guturales.

El lenguaje fonado requirió de un reordenamiento cerebral que permitió convertir símbolos abstractos en sonidos articulados, en un sector de la corteza llamada área de Brocca, gracias al descenso de la laringe. El lenguaje es el mejor ejemplo de las características de plasticidad del cerebro de *Homo*, que nace en un estado de gran inmadurez, en comparación con otros mamíferos, dado que su desarrollo se completa mediante el aprendizaje y los estímulos externos durante la niñez. Esta inmadurez es solo posible gracias a que toda la comunidad se hace cargo de la descendencia, dado que serán totalmente dependientes durante sus 10 primeros años de vida. Pero también le dá la gran posibilidad de incorporar un inmenso conjunto de conocimientos culturales, que se modifican y se suman muchísimo más rápido que la evolución biológica, innovando y creando su propio entorno.

Si realizamos una línea de tiempo que muestra el curso evolutivo de los homínidos desde la aparición de los mamíferos, se puede ver que la existencia del ser humano es casi insignificante en relación temporal. Es interesante observar en esta línea de tiempo que otros homínidos existieron durante más de 1,5 y hasta 2 millones de años, es decir, muchísimo más de los que lleva existiendo el propio ser humano. Sus extinciones debieron responder a cambios climáticos que no pudieron superar pero existieron durante un larguísimo período de tiempo perfectamente adaptados a su ambiente.

La supervivencia del *Homo sapiens* fue una contingencia (como todo en la naturaleza) que debemos a circunstancias casuales como cambios climáticos que pusieron fin a un período glacial permitiendo su emigración hacia todo el planeta.

5. Conclusión: La evolución, y la Alfabetización Científica

Darwin es emergente de una época y una sociedad europea liderada por una Inglaterra que había logrado acumular importantes riquezas y conocimientos, mediante una política imperialista de depredación, saqueos, piratería, guerras e invasiones, lo cual forma parte de nuestra propia historia. La revolución industrial y la nueva redistribución del trabajo por la que Europa vendía productos con un gran valor agregado a nuestros países obligados mili-

tarmente a vender en “libertad de mercado” solo materias primas, favorecen una situación de gran “prosperidad”, ejemplo y paradigma de desarrollo social. La ciencia y la tecnología pasan entonces a ser la nueva herramienta de poder, bases del positivismo científico y las nuevas ideologías liberales. En ese contexto social, es Spencer el que plantea la evolución como un cambio hacia el progreso y el perfeccionamiento, tanto de la naturaleza como de las sociedades humanas, y toma las ideas de Darwin que caen en el momento justo para enunciar “La supervivencia del más apto”, y fundar el Darwinismo Social. Con esta base “científica” el sometimiento y explotación de otros pueblos quedaba justificado como una ley natural inexorable por la que los más “evolucionados” deben triunfar sobre los inferiores y atrasados. Es necesario destacar que Darwin se expresó con claridad, en contra de que el concepto de evolución de las especies pudiera ser aplicado y ni si quiera comparado con los procesos sociales, regidos por la cultura, la ética y la moral, cualidades propias del ser humano. Pero la idea ya estaba instalada, y rápidamente se popularizó.

Cien años después, y con la Bomba Nuclear como herramienta de terror global, Estados Unidos se imponía como nuevo imperio; dando continuidad al positivismo liberal se constituye en renovada hegemonía científica, creando incluso nuevas disciplinas, como la sociología y las ciencias políticas, que junto a la Teoría Sintética de la Evolución, integran el marco epistémico de la modernidad. Queda así reforzada la idea de la libre competencia como motor único de la evolución, que es progreso, la cual además debe ser gradual y discreta, sin posibilidad de cambios grandes ni repentinos: sin revoluciones.

Los científicos y sus investigaciones, como parte de la sociedad, están insertos en una realidad social y política, presiones laborales, intereses económicos, y debates ideológicos, por lo que de ningún modo el conocimiento científico es aséptico, objetivo y desinteresado, ni lo podría ser. Por ello para abordar y analizar el conocimiento científico, no es posible dejar de lado el contexto social y político en el que se generó. La epistemología y la filosofía de las ciencias aportan importante material, en los que estos debates ideológicos están muy presentes.

En ese sentido la plena participación democrática de los ciudadanos en la construcción de las políticas científicas y educativas, requiere tanto del conocimiento científico como del contexto social y político que definió su origen y orientación. Para que un ciudadano latinoamericano pueda participar democráticamente en el debate sobre los alimentos transgénicos, por ejemplo (como veremos en el capítulo 4), no solo deberá comprender sus

fundamentos moleculares, sino también en qué contexto político se incorporan a nuestros cultivos y al servicio de qué intereses fueron introducidos en nuestra economía.

Por lo tanto un educador debe hacer un permanente trabajo metacientífico sobre el conocimiento disciplinar y su contexto, ligado a un análisis crítico permanente del rol que en la sociedad cumplimos como docentes.

Está abundantemente descrito en la bibliografía, la gran importancia didáctica del contexto social y político que acompañó el desarrollo de un determinado conocimiento o una tecnología, dado que esto permite una comprensión amplia, completa y contextualizada. Pero también hay una cuestión ética y de honestidad intelectual que nos cabe como educadores en la formación de una conciencia participativa de los estudiantes. Como es de esperar, esto también cuenta con diversas perspectivas, más o menos conservadoras o transformadoras, que dependen de la formación del docente.

Una línea de pensamiento muy difundida en ese sentido es el llamado “enfoque CTS” (por Ciencia, Tecnología y Sociedad) que tiene origen en Estados Unidos durante los '80, que parte de la observación de un cierto aislamiento entre la cultura científico-tecnológica y el resto de la vida social, observando que la educación es el ámbito adecuado para subsanar esta brecha. Esta línea pedagógica fue exportada a España y nos llega como una propuesta para Iberoamérica, a partir de organismos internacionales como la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos), que en conjunto con organizaciones internacionales y privadas desarrolla las “Metas Educativas 2021: la educación que queremos para la generación de los Bicentenarios”. En ese documento, en el capítulo 3 bajo el título Ciencia, tecnología y participación ciudadana, Mariano Martín Gordillo nos explica:

“Sin duda, la idea de una educación para la ciudadanía democrática es especialmente integradora y, por ello, muy pertinente. En este sentido, mantiene también cierta afinidad con propuestas procedentes del campo de la alfabetización científica, como el enfoque de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS), cuyo propósito principal es promover el aprendizaje social de la participación pública en la orientación democrática de las decisiones sobre ciencia y tecnología “

Pero ¿qué tipo de participación y en qué forma de democracia? ¿se refiere a las decisiones sobre la ciencia y la tecnología como objetos de consumo, o de las mejores políticas de investigación para la utilidad social de las tecnologías?

Un enfoque habitual de esta línea, propone que existen controversias entre la ciencia y la tecnología por un lado, y los intereses sociales por otro, asumiendo que son estos dos espacios sociales, ya dados e inevitables, pero además en niveles valorativos equivalentes. Por lo tanto se activan mediaciones institucionales áulicas entre Ciencia, Tecnología y Sociedad, que intentan alternativizar problemas que son netamente políticos. Los problemas sanitarios, la imposición del monopolio de los transgénicos, o la desocupación producida por nuevas tecnologías, en realidad no son una controversia de la democracia, sino parte de las luchas políticas entre los grandes capitales y los intereses populares.

La alfabetización científica cobra un sentido democrático, trascendiendo lo académico, solo si se contextualizan sus contenidos incluyendo a los verdaderos actores de la lucha política, los intereses en pugna, las organizaciones sociales en lucha, y los derechos vulnerados en cada caso. Desde esa otra perspectiva, el conocimiento científico es una herramienta liberadora para la toma de decisiones, y no solo una controversia a resolver institucionalmente.

La Teoría de la Evolución nos brinda una oportunidad única para analizar el contexto histórico cultural, los intereses políticos del conocimiento científico y los motivos profundos del pensamiento mítico o fantástico en el que se mantiene a una mayoría.

Hoy, ya entrado el siglo XXI e instalada la globalización como paradigma cultural, infinidad de cultos religiosos que adoctrinan en el ideario creacionista y la esperanza de una salvación milagrosa, se hacen cada vez más frecuentes en la construcción de la cultura popular, haciendo de la Alfabetización Científica un objetivo cada vez más complejo y a la vez más necesario. A la par, las Ciencias Políticas acuden a conceptos cientificistas para justificar la libre competencia y la libertad de mercado como motor de progreso, y a nuevas ciencias como la Economía para explicar con la elegancia de las Estadísticas que la pobreza y la marginación son un daño colateral casi inevitables.

Volviendo a Ausubel, parte importante de nuestro rol docente es definir si nuestra actividad va a reproducir las concepciones hegemónicas, o vamos estimular en nuestros estudiantes una visión crítica y transformadora de nuestra realidad social, para mejorar nuestra calidad de vida.

Bibliografía

- Beraldi H. Estromatolitos. <http://www.geologia.unam.mx/igl/index.php/difusion-y-divulgacion/temas-selectos/571-estromatolitos>
- Gould SJ y Richard Lewontin R. La Adaptación Biológica. Mundo Científico N° 22, Vol. 3
<http://lacienciaysusdemonios.com/2009/10/27/especiacion-en-ranas-%C2%A1poliploidia-en-animales/>
- <http://lacienciaysusdemonios.com/2009/11/05/especiacion-en-ranas-2-%C2%A1animalada-de-poliploides/>
- <http://www.unav.es/ocw/genetica/tema-1-3.html> (elementos trasponibles)
- Leman L et al. (2004) Carbonyl Sulfide-Mediated Prebiotic Formation of Peptides. *Science*, 306 283; DOI: 10.1126/science.11102722
- Lincoln TA, Joyce GF. (2009) Self-Sustained Replication of an RNA Enzyme. *Science* 323: 1229-1232, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1167856>
- López-Goñi I. (2015) Somos lo que somos porque somos virus y bacterias: el impacto de los microorganismos endógenos en la biología del huésped. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 22: 15-21
- Margulis L and Sagan D. (2008) *Microcosmos*. 3ra.edición. Barcelona: Tusquets, SA.
- Rebek Jr., J. (1994) Moléculas sintéticas autorreplicantes. *Investigación y Ciencia* N° 216.
- Sacks, O, Kevles DJ, Lewontin RC, Gould SJ, Miller J. (1996) *Historias de la ciencia y del olvido*. Madrid: Siruela.
- Rosas, A. (2015) Los primeros Hominios. *Paleontología humana*. Ed. CSIC. y Catarata. Madrid.
- Toro B, Tallone A. Educación, valores y ciudadanía. *Metas Educativas 2021: La educación que queremos para la generación de los Bicentenarios*.

Actividades para el aula

Evolución. Variabilidad y selección natural

La presente propuesta didáctica se plantea en dos clases de dos horas cada una para desarrollar las actividades, y una tercer clase evaluativa, cuyo diseño se deja a criterio del docente. De acuerdo a los diseños curriculares de la Provincia de Buenos Aires, tienen aplicación en el segundo año y en el quinto (secundaria orientada), aunque en cada caso el docente deberá ajustar los conceptos exigidos y la profundidad de las preguntas de la actividad.

1ra. Clase

Se desarrolla a partir de la lectura del texto **“Las cabras ancestrales”**. Se sugiere su realización de forma grupal para que se discuta, primero por grupos de 4 o 5 estudiantes, y luego en una puesta en común general, los conceptos básicos de la evolución.

Las cabras ancestrales

Un importante trabajo de investigación paleontológica nos devela la historia evolutiva de dos especies de cabras que actualmente habitan en el sudoeste asiático.

Hace entre 8 y 10 millones de años, existían numerosos rebaños de cabras que pertenecían a una única especie. Tenían una gran talla y grandes cuernos que crecían circularmente hacia delante, y habitaban un extenso valle atravesado de sur a norte por un pequeño riachuelo. Si bien este valle era bastante árido y pedregoso por los fuertes vientos fríos del norte, estas cabras se encontraban bien adaptadas al clima, alimentándose de los pastos cortos que crecían a las orillas del río y de los arbustos espinosos que crecían en amplio valle; es de notar que no tenían depredadores de que cuidarse.

Como en la naturaleza nada se mantiene estable por siempre, llegó un día en que sucedió un importante cambio. La erupción de un volcán cercano producto de movimientos en la corteza terrestre, produjo el levantamiento de una pequeña cadena de cerros en el extremo norte del valle que cerró el paso del arroyo, produciendo la formación de un gran lago, y poniendo a la vez un obstáculo al frío viento del norte.

Todo esto, que sucedió en apenas unos pocos miles de años, produjo un cambio dramático en el clima y la geografía de la región. La ladera sur de estos nuevos cerros de clima húmedo y cálido, se pobló de una importante y variada vegetación lacustre y de montaña, acompañada por nuevos animales como aves, insectos y un mamífero cazador similar a un coyote. Al otro lado de los cerros, castigados por el viento ártico, el clima árido y frío adquirió además una orografía montañosa y rocosa.

Las cabras se ubicaron a lo largo de estos cerros y a las orillas del lago, pasando de un lado al otro dependiendo de las condiciones estacionales; sin embargo esto también se modificó y nuevos movimientos geológicos pusieron nuevos obstáculos a las cabras, impidiendo el paso de un lado al otro de la cadena de montañas, quedando así un grupo de cabras en el lado norte, y otro en el lado sur del levantamiento.




Esta situación se mantiene hasta el presente, por lo que es posible analizar las diferencias entre las características de las dos especies actuales de cabras, y de estas con la especie ancestral, de la cual se cuenta con bastante material fósil.






He aquí las características de las especies actuales:

Especie que habita la ladera sur: son cabras de talla baja, con pelo corto, cuernos largos y punzantes, pezuñas anchas y blandas, dientes adaptados a una dieta variada de pastos, hojas de diversas plantas y frutos. Tienen dos pariciones al año, de una o dos crías.

Especie que habita la ladera norte: son cabras de pelo largo y lana, cuernos cortos, de talla mediana, pezuñas pequeñas y duras, dientes adaptados a una dieta de pastos ralos y espinillos. Tienen una única cría anual en la estación cálida.

Consignas de trabajo:

-  Realice dos esquemas de la zona geográfica descripta, antes y después del surgimiento de la cadena de montañas representando las zonas climáticas y su ocupación por las diferentes especies animales y vegetales.
-  Confeccione un cuadro con las características físicas de las tres distintas especies de cabras.
-  ¿Cuáles caracteres de las cabras corresponden a qué tipo de presión ambiental?

-  ¿Cómo se produce la aparición de nuevos caracteres y cómo se distribuyen en toda una población? ¿Alguno de los caracteres puede no responder a la selección natural?
-  ¿Cómo pueden determinar los científicos que las cabras actuales son dos especies distintas? ¿Se puede determinar esto respecto de las cabras ancestrales?
-  De acuerdo a los puntos anteriores, redacte una definición general de los conceptos de Selección Natural y Variabilidad.
-  Investigue los modelos de especiación Alopátrica, Simpátrica y Parapátrica, ¿A qué modelo de especiación responde este caso?
-  ¿Por qué se los designa como “Modelos”? ¿Cuál es la diferencia con las teorías e hipótesis?

2da Clase

El objetivo de esta clase es que se puedan aplicar los conceptos y el modelo de especiación analizado en el trabajo anterior, como base para el análisis del modelo de evolución de los Homínidos, y el desarrollo en forma ramificada de diversas especies y géneros, que lograron ocupar distintos espacios geográficos y climáticos.

Actividad 1: A partir de la observación del video: “**La Odisea De La Especie. Los Prehumanos. Los Orígenes De La Humanidad.**” (<https://youtu.be/IsCm9M53LMU>) discuta:

- ¿A qué modelo de especiación corresponde el desarrollo de los homínidos?
- Elabore un texto donde explique la teoría actual sobre la aparición de los homínidos (u homíninos), detallando los factores de la selección natural y los caracteres de este grupo.
- ¿Cuál es la diferencia entre un proceso evolutivo lineal y uno arbustivo? Discuta las implicancias científicas e ideológicas de cada modelo.
- ¿Podieron coincidir en un mismo tiempo y espacio distintas especies de homínidos? ¿Cuáles podrían haber sido las consecuencias de ese encuentro respecto de los nichos y hábitos de cada especie?

Actividad 2: Busque en el texto del capítulo 1 del presente libro o de otros textos, las diferencias en el modo de vida y alimentación, entre los géneros *Australopithecus* y *Homo*.

1. Compare los cráneos, discuta las diferencias de hábitos y modos de vida que podrían inferirse a partir de sus características óseas.

Australopithecus afarensis



Homo habilis



2. Responda:

- a) ¿Cuál fue la importancia de la bipedia en la aparición de los homínidos?
- b) ¿Por qué es importante la organización social en el proceso evolutivo?
- c) Investigue y discuta:

¿Qué fenómenos posibilitaron la cefalización? ¿qué tan dependiente es el desarrollo del cerebro de su herencia genética y de su contexto cultural?

CAPÍTULO 2:

Reproducción sexual: enigmas, mitos y certezas

Introducción

La reproducción es un tema central en el diseño curricular de segundo año en la provincia de Buenos Aires, y permite revisar y profundizar nuevos temas vinculados con la evolución, como el cortejo o el dimorfismo sexual vinculados a la selección sexual. Se recomienda resaltar la generación de variabilidad asociada a la reproducción sexual y relacionar esta propiedad con las ventajas ecológicas y evolutivas de este modo de reproducción. A su vez, dado que los estudiantes suelen asociar los sexos de acuerdo con sus ideas intuitivas sobre las estructuras genitales de los vertebrados, se propone la caracterización basada en la existencia de gametas masculinas y femeninas con cualidades diferentes entre sí. De este modo, se contribuye a pensar a la reproducción sexual como un mecanismo común a una gran variedad de organismos.

Al abordar el tema de la reproducción humana, el diseño curricular aclara la necesidad de señalar las diferencias que existen con el resto de los animales. Sobre todo que el estudio de las acciones humanas implica el análisis de diversas cuestiones socioculturales que hacen a la salud reproductiva e igualdad de géneros. Este último aspecto se vuelve relevante a la luz de la ley 26150 que promueve la educación sexual integral para que los estudiantes puedan asumir una vida responsable, contando con información pertinente, objetiva y validada científicamente. La educación sexual constituye la oportunidad para elimi-

nar todo concepto, prejuicio, estereotipo o práctica basada sobre la idea de superioridad o inferioridad de cualquiera de los sexos.

Antes de tratar el tema de reproducción sexual en el aula es interesante sondear cuáles son las ideas previas que traen los estudiantes de la escuela media.

Un estudio realizado con estudiantes de nivel secundario mostró que muchos estudiantes piensan que la reproducción sexual ocurre principalmente en los animales, aunque algunos tuvieron dificultades para reconocer que ciertos animales como los caracoles, las arañas o las palomas también se reproducen sexualmente.

Dado que la reproducción sexual implica la producción de gametas portadoras de la información genética que los progenitores heredarán a sus descendientes, otro de los sondeos que se realizó en ese estudio fue acerca de cómo creían los estudiantes que se transmitían los caracteres hereditarios. Algunos indicaron que el ADN, los genes y los gametos eran los principales elementos implicados en la herencia de los caracteres. Pero sólo identificaron estos elementos como propios de los animales, principalmente en aquellos taxonómicamente más relacionados al ser humano, como los mamíferos, ignorando que los mismos elementos participan en otros seres vivos como las aves, los insectos o las plantas. No obstante, si bien el concepto de ADN resulta familiar, posiblemente por la frecuente mención en los medios de comunicación, las definiciones elaboradas por los estudiantes evidenciaron una interpretación vacía de contenido. A su vez, sólo la mitad de los estudiantes indicaron que las plantas producen gametas, el resto únicamente reconoció que las estructuras vinculadas a la transmisión de los caracteres hereditarios son el polen, las semillas y los frutos. Estos resultados denotan una fuerte concepción antropocéntrica de procesos biológicos, sobre todo en lo que se refiere a la reproducción sexual.

Por otra parte, las creencias populares que se incorporan en el lenguaje cotidiano también influyen sobre las ideas previas que tienen los estudiantes sobre temas relacionados con la reproducción sexual y la herencia de los caracteres y pueden dificultar la correcta interpretación de conceptos y procesos vinculados con la genética. Por ejemplo, expresiones populares como “la herencia se lleva en la sangre”, “hermanos de sangre”, “lo lleva en la sangre”, etc. confunden a muchos estudiantes entorpeciendo la consideración de las gametas como células transmisoras del material genético de una generación a otra y de la presencia de ADN en todas las células del cuerpo.

La falta de comprensión de procesos como la meiosis, su importancia en el intercambio de información genética durante la división celular y la transmisión de los caracteres a las siguientes generaciones conlleva a su vez que los estudiantes encuentren dificultades para relacionar a la meiosis con la diversidad biológica, la selección natural, la conservación de las especies y la evolución. Las mayores dificultades en el aprendizaje y la integración de estos procesos aparecen al estudiar la división celular, la mitosis y la meiosis. Una investigación mostró que muchos estudiantes secundarios no logran comprender algunos aspectos básicos de la meiosis. Por ejemplo, con respecto a la duplicación de los cromosomas, algunos parecieron no entender que cada cromosoma se duplica o que al hacerlo se forman dos cromátidas idénticas. Otra de las mayores dificultades detectadas fue la correcta ubicación de los alelos del mismo gen en las cromátidas hermanas. Esto implica serias dificultades para entender cómo ocurre luego la segregación de estos alelos durante la separación de los cromosomas homólogos y la posterior separación de las cromátidas hermanas en las etapas siguientes de la meiosis.

Estos resultados llaman a reconsiderar la forma de enseñar la división celular, ya que la enseñanza clásica se basa en una descripción estática de los estadios de la meiosis y sus nombres, y no permite a los estudiantes reflexionar acerca del proceso y cómo ocurre la segregación independiente de los cromosomas. Por ejemplo, las representaciones estáticas de los diagramas de los estadios de la división celular pueden confundir y generar interpretaciones erróneas, como si fuesen características estructurales permanentes. Esta manera descriptiva de abordar la enseñanza de la meiosis y la mitosis puede llevar a la confusión ya que superficialmente los procesos son semejantes. Algunos autores enfatizan que es importante destacar las diferencias principales, como el papel de la meiosis en el intercambio genético y en la reducción del número de cromosomas a la mitad y el papel de la mitosis en la producción de copias idénticas de la célula original, y sugieren que al momento de enseñar la meiosis es importante relacionar ese proceso directamente con la fertilización, los ciclos de vida y la alternancia de generaciones haploide y diploide.

2.1. Qué es la reproducción sexual

Es interesante notar que en los estudios citados previamente, ninguno de los test realizados a los estudiantes preguntó directamente ¿qué es la reproducción sexual? Sin embargo

se asumía que los estudiantes lo sabían al pedirles que indicaran qué tipos de organismos tenían ese tipo de reproducción. A pesar de lo simple que pueda resultar esta pregunta, la respuesta ha sido de lo más variada a lo largo de los años, y es que existen organismos con ciclos de vida tan especiales que obligan a repensar las definiciones de conceptos tan generales. En la actualidad incluso hay divergencias entre la comunidad de biólogos, ya que los microbiólogos consideran que las bacterias se reproducen sexualmente, a diferencia del resto que opina distinto... pero, ¿por qué?

Una de las definiciones de **reproducción sexual** que ha logrado mayor consenso entre la comunidad científica es la siguiente: “proceso que involucra la fusión de las gametas producidas por meiosis, seguido por singamia (fusión de núcleos para formar el cigoto), produciendo una generación nueva que porta una combinación de los genes de los progenitores (entrecruzamiento y, usualmente, anfimixis¹)”. Esta definición (carente de todo romanticismo pero con todo el rigor científico posible...) incluye también a los organismos isogaméticos (es decir aquellos cuyas gametas no tienen diferencias morfológicas) que no tienen sexos diferenciados, y a aquellos que producen espermatozoides y óvulos provenientes tanto de organismos monoicos o dioicos. Pero excluye a otros organismos con ciertas formas de partenogénesis y a los procariontes. Veamos mejor algunos ejemplos.

Hay dos formas de partenogénesis que no encajan en esta definición a pesar de atravesar por la meiosis: la *androgénesis* y la *ginogénesis*. La androgénesis implica que los huevos se desarrollan luego de la desintegración de los cromosomas maternos, usando finalmente los genes paternos, como ocurre en un insecto de la especie *Bacillus rossius*, conocido como “bicho palo”. En cambio, la ginogénesis es otro caso en el que la partenogénesis puede ocurrir espontáneamente o ser inducida por el espermatozoide. En estos casos, el espermatozoide sólo funciona para disparar la embriogénesis, ya que luego el núcleo del espermatozoide es descartado. Por ejemplo, este tipo de reproducción ocurre en peces del género *Poeciliopsis*. De todos modos, aunque hay autores que consideran a la partenogénesis como un caso especial de reproducción sexual, vale aclarar que otros directamente la consideran como reproducción asexual.

Entonces, si consideramos la definición especificada en el párrafo anterior, ¿qué ocurre con los procariontes? ¿Tienen reproducción sexual? Si nos ceñimos estrictamente a la definición, los procariontes quedan excluidos porque básicamente el intercambio genético

¹ (Anfi= diferente; mixis= mezcla). Fecundación de un óvulo por un espermatozoide.

ocurre por transferencia horizontal. Sin embargo, los biólogos que trabajan con procariotas definen a la reproducción sexual como “cualquier proceso que promueve la recombinación de genes entre distintos individuos”. Ese intercambio de genes ocurre a través de distintos mecanismos en los que el ADN es transferido entre células bacterianas básicamente a través de tres procesos: la *transducción* por virus bacterianos, la *conjugación* por plásmidos bacterianos y la incorporación de fragmentos de ADN del ambiente por bacterias naturalmente competentes (*transformación*); luego el ADN recibido se recombina con el cromosoma de la célula por la acción de varias proteínas citoplasmáticas. Esa definición, que incluye a la transferencia horizontal de genes, le ha costado algunas críticas. Por ejemplo, un virus que transmite su ADN a un individuo infectado no implica necesariamente que se trate de un caso de reproducción sexual.

A pesar de todos los debates que se han producido en torno a la reproducción sexual, es innegable que esta forma de generación de nuevos individuos se ha conservado evolutivamente a través de la historia de la mayoría de los organismos eucariotas. Esto ha generado nuevos interrogantes porque este tipo de reproducción, en comparación con la reproducción asexual, involucra grandes costos que asumir (en términos de *fitness*) para los organismos. A continuación exploraremos más este asunto.

2.1.1 Los costos de reproducirse sexualmente

En varias culturas el nacimiento de un hijo varón es recibido con grandes celebraciones y rituales, sobre todo en países asiáticos y africanos. Hay proverbios asiáticos que dicen que la llegada de un niño es “buena economía y buena política” y “una sonrisa en la morada de los dioses”, mientras que las niñas no gozan de tan feliz recibimiento. Sin embargo, desde una perspectiva biológica, parece ser que para el resto de los organismos vivos el nacimiento de los machos es sinónimo de *costos*.

Clásicamente se ha considerado que la **producción de machos** resulta un doble costo para las hembras, y en consecuencia para la población (Figura 1), porque pierden la mitad de sus recursos al generar machos que luego invertirán muy poco en la supervivencia de su descendencia. Desde luego, esto es aplicable a aquellos machos que gastan todos sus recursos en competir entre sí y que, entonces, no colaboran con la hembra en la producción de la descendencia, como por ejemplo en el cuidado de las crías o en la transferencia de

nutrientes que permitan que la hembra produzca crías más grandes o se reproduzca más rápido. Pero en los casos en que el macho colabora, los costos se reducen, como en las situaciones de monogamia, en las que los “intereses” de ambos sexos coinciden.

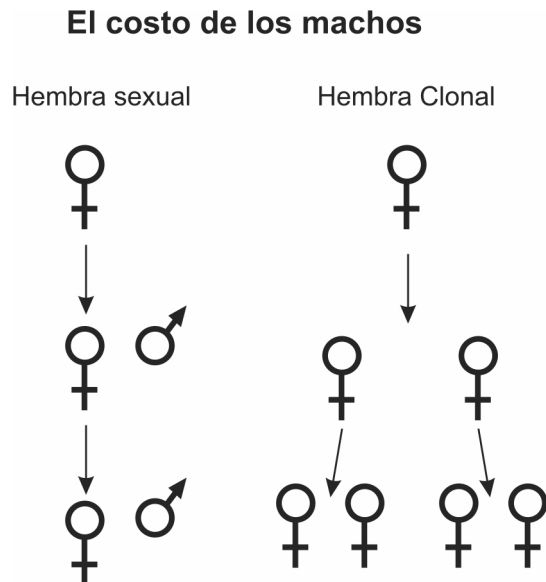


Figura 1. Costo de la producción de machos. En una situación hipotética, las hembras con reproducción asexual generarían más crías por individuo en comparación con las hembras sexuales

Además, se debe tener en cuenta que las relaciones entre machos y hembras no siempre se restringen al apareamiento y al cuidado de las crías. En algunos casos los machos pueden interferir consumiendo los recursos que usan las hembras para producir la descendencia. Por ejemplo, si los machos tienen tamaños más grandes que las hembras, pueden agotar el alimento más rápido que ellas; estos costos pueden reducirse si los machos viven menos o si ambos sexos usan recursos distintos. En síntesis, finalmente se ha visto que producir machos no siempre produce un “doble costo”; en realidad, lo importante no es ser machos, sino cómo ambos progenitores aportan recursos para la supervivencia de sus crías.

Por definición, la reproducción sexual involucra el encuentro mutuo y la unión de dos gametas compatibles (que en la mayoría de los organismos eucariotas también se traduce en un elevado costo de desarrollo de órganos especializados en la producción de gametas y estrategias que favorecen su encuentro). Esto suma el costo del tiempo que lleva la **búsqueda de la pareja**, por lo que parece que algunos organismos decidieron seguir la regla del “mejor solo que mal acompañado” y su línea evolutiva los guió hasta el hermafroditismo. Al

costo del tiempo empleado en buscar pareja también se le puede añadir el riesgo de ser predado durante la búsqueda y/o cópula, o de contraer enfermedades de transmisión sexual.

Hay una hipótesis que propone que la eficiencia de un organismo para buscar pareja puede influenciar la evolución de su estrategia reproductiva. Es decir, si para los organismos móviles y activos encontrar pareja a veces puede resultar difícil, para un organismo sésil esto implica realmente un desafío. Los modelos asumen que hay un compromiso entre el tiempo invertido en la búsqueda de pareja vs. el tiempo invertido en la búsqueda de alimento. A medida que disminuye la eficiencia de un organismo para buscar pareja, este compromiso disminuye la probabilidad de que un individuo pueda continuar dicha búsqueda hasta alcanzar su objetivo. Bajo estas condiciones sería esperable que el hermafroditismo sea ventajoso, ya que muchos hermafroditas pueden autofecundarse cuando no encuentran una pareja. Si bien se ha debatido mucho acerca de las ventajas de la autofecundación, ser hermafrodita podría ser muy beneficioso incluso en aquellos organismos autoincompatibles, dado que un individuo podría aparearse con cualquier individuo conespecífico que encuentre, mientras que un organismo dioico debe esperar hasta encontrar uno del sexo opuesto. Después de todo, ya lo decía John Lennon, "*love is wanting to be loved*".

Si hasta aquí estos costos para reproducirse sexualmente no resultaron convincentes para desistir de la tarea, los investigadores insisten en más ítems para agregar a las cuentas e incluyen los costos que implica llevar adelante la meiosis y el entrecruzamiento. Se ha observado que en la mayoría de los organismos eucariotas unicelulares isogaméticos, a pesar de que no afrontan los costos de producir machos, el tipo de reproducción más frecuente es la asexual. Las hipótesis sugieren que los organismos adoptan esa estrategia reproductiva para evitar afrontar los **costos de la meiosis**. Por ejemplo, en estos organismos la reproducción asexual vía apomixis² involucra a la mitosis seguida de maduración celular. La mitosis no suele durar más de 15 minutos, a diferencia de la reproducción sexual, en la que la meiosis puede tardar más de 10 horas en llevarse a cabo. Hay procesos mecánicos durante la meiosis que influyen en su duración y limitan la velocidad, como por ejemplo la orientación, el movimiento y el correcto apareamiento de los cromosomas. Esto

² (Apo= sin; mixis= mezcla). Es una subcategoría de reproducción asexual, en la que la meiosis es suprimida y hay una sola división mitótica de maduración. Las crías son genéticamente idénticas a la madre. Ej: cítricos, manzanos y gramíneas.

podría traer aparejado una reducción de la tasa reproductiva. Los organismos que se reproducen asexualmente vía automixis³ no tienen más ventajas que los sexuales, ya que la meiosis también ocurre.

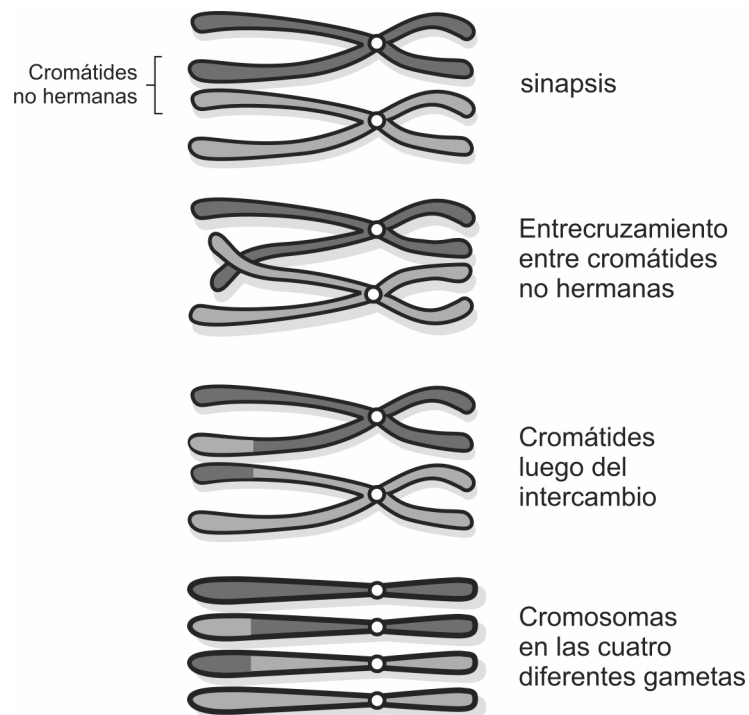


Figura 2. Entrecruzamiento de los cromosomas homólogos durante la meiosis.

Los costos de afrontar una meiosis son insignificantes en los organismos que alcanzan la madurez con lentitud o que atraviesan períodos prolongados entre eventos reproductivos. Esto puede explicar por qué la reproducción sexual es más frecuente en los organismos multicelulares, más grandes que los unicelulares. A su vez, como vimos en el capítulo anterior, la recombinación genética producto del **entrecruzamiento** de los cromosomas durante la meiosis (Figura 2) amplía el rango de combinaciones de genes, por eso la reproducción sexual mejora el potencial evolutivo de los organismos. A través de ese proceso se generan beneficios a largo plazo, como el “empaquetamiento” de genes benéficos o la separación de las mutaciones perjudiciales. Sin embargo, a corto plazo la recombinación es costosa porque puede romper combinaciones exitosas de genes. El éxito de algunas de estas com-

³ (*Auto*= por sí mismo; *mixis*= mezcla). Es una subcategoría de reproducción asexual, en la que la meiosis es normal, produciendo cuatro núcleos haploides. Uno de ellos, usualmente el ovocito, se fusiona con el cuerpo polar y se restituye el número diploide de la descendencia. Ej: bichos palo, moscas blancas y polillas.

binaciones de genes se basa principalmente en la interacción genética no aditiva, a través de dominancia o epistasia.

A pesar de todos estos argumentos en la mayoría de los organismos eucariotas se ha conservado el camino de la reproducción sexual para perpetuar su especie, lo cual ha generado un sin fin de debates para explicar esa paradoja.

2.1.2. La paradoja de la reproducción sexual

La pregunta que ha desvelado durante mucho tiempo a los biólogos evolucionistas es ¿por qué la reproducción sexual está tan ampliamente conservada entre los organismos si es tan costosa? Muchas de las hipótesis que fueron elaboradas para tratar de responder a esta incógnita pueden reunirse bajo el paraguas de dos grandes ideas básicas. Una de ellas es que la reproducción sexual provee de nuevas combinaciones genéticas a los descendientes a través de la meiosis y la recombinación de los cromosomas homólogos (entrecruzamiento). Así, la selección natural puede actuar sobre estas variaciones y la reproducción sexual posibilita la oportunidad de adquirir nuevas adaptaciones de forma rápida, por ejemplo en ambientes inestables. La otra idea base es que mediante la reproducción sexual, en el proceso de meiosis y recombinación, se eliminan las mutaciones negativas o deletéreas.

El origen de estas ideas puede rastrearse hasta la primera mitad del siglo XX, ya que Fisher propuso que la tasa de cambio del *fitness* es proporcional a la variación genética aditiva. Si bien la fuente primera de variabilidad genética es la mutación, Fisher pensaba que la combinación de genes era la única manera de mantener la variación en la mayoría de los linajes de organismos. Muchas de las explicaciones que surgen para justificar las ventajas de la reproducción sexual están relacionadas a la diversidad genética, sin especificar a qué nivel (poblacional o individual) se hace referencia. Por ejemplo, John Maynard Smith explicó las ventajas de la combinación de genes en la reproducción sexual. Las poblaciones sexuales pueden adaptarse con mayor facilidad a un ambiente cambiante mediante la combinación de mutaciones en un mismo individuo. Además, la reproducción sexual puede reducir la frecuencia de alelos deletéreos en la población, ya que el individuo que reúne esas mutaciones no sobrevivirá y por lo tanto no podrá transmitir sus alelos deletéreos. En este caso, a nivel del individuo la reproducción sexual únicamente es benefi-

ciosa para las crías que adquieren combinaciones genéticas que aumentan su *fitness*. Muchas de las hipótesis, que argumentan que la ventaja de la reproducción sexual está en el aporte de nuevas combinaciones de genes, asumen que las especies asexuales heredan a su descendencia genomas idénticos. Sin embargo, hay estudios realizados en rotíferos que plantean escenarios bastante distintos. Por ejemplo, diversos estudios demuestran que los linajes asexuales de rotíferos (clase Bdelloidea) presentan igual o mayor variación genética que los linajes sexuales (clase Monogononta). Incluso es probable que los linajes asexuales exhiban los mismos niveles de variación epigenética que los linajes sexuales (ver capítulo 1). Por lo tanto, la hipótesis de que la reproducción sexual ha sido exitosa únicamente por incrementar la variabilidad genética no tiene mucho sustento. Sobre todo si se tiene en cuenta el hecho de que los organismos con estrategias asexuales también tienen elevada diversidad genética y que la meiosis y el entrecruzamiento, aunque son mecanismos que generan nuevas combinaciones de genes, no alteran los loci ni modifican su orden físico.

Algunos autores, como Gorelick y Heng (2011), tratan de escapar de la encrucijada de la “paradoja de la reproducción sexual” proponiendo que este tipo de estrategia reproductiva se ha dispersado exitosamente a través de los distintos linajes eucariotas porque en realidad es una *fuerza conservadora que permite mantener la integridad de la identidad del genoma de una especie, removiendo cualquier variación que pudiera alterarlo*. Los investigadores plantean la siguiente analogía para explicar su idea: si los alelos son como los colores de los píxeles en la pantalla de una computadora, los loci son la ubicación física en la pantalla y el genoma es la pantalla, entonces la función primera de la reproducción sexual es asegurar el mantenimiento de la integridad de la pantalla en sí, y no tanto de la imagen que se forma en ella. Se plantea entonces que la meiosis, a pesar de los costos mencionados antes, trae aparejado procesos cuyos beneficios compensan esos costos, como el mantenimiento de la ploidía (número de cromosomas), el apareamiento de los cromosomas homólogos y la eliminación de rearrreglos cromosómicos deletéreos. Por ejemplo, durante la sinapsis de los cromosomas homólogos en metafase I de la meiosis es posible detectar y reparar daños en el ADN para conservar los genes individuales, así como asegurar la conservación de la ploidía, ya que un error en la división meiótica que cause una pérdida o ganancia de cromosomas en las células hijas suele ser fatal, al menos en los animales. Todos estos casos tienen algo en común: que la descendencia sea lo más parecida posible a sus

progenitores, dado que se trata de conservar lo que fue exitoso para la supervivencia de los ancestros.

Cabe destacar que investigaciones recientes hacen énfasis en que no son los genes individuales los que definen a una especie sino un *genoma entero*. En términos de la combinación de genes, el genoma y los genes funcionan distinto. La alteración de genes puede producir cambios en las características dentro de una especie, con la consiguiente potencialidad de generar nuevas adaptaciones a corto plazo. Pero es la selección sobre la estabilidad del genoma con sus adaptaciones la que produce la identidad de una especie. En conclusión, la teoría del genoma establece que la información contenida en los genes individuales no es la unidad sujeta a selección natural porque el significado de cada gen depende del contexto del genoma, es decir de la topología dentro del núcleo, el ambiente, las interacciones genotipo-ambiente, los efectos genéticos indirectos y el eco-evo-devo. Así es como el genoma sería la principal plataforma para la evolución.

2.2. ¿Por qué hay sexos?

Hasta aquí, no podemos negar que la reproducción sexual, su origen y su éxito como estrategia reproductiva, es un tema que hace más de un siglo que genera grandes debates entre los científicos. Pero ese enigma no termina ahí. Dado que la reproducción sexual implica la existencia de sexos, es decir dos tipos distintos de individuos dentro de una especie (machos y hembras), hay otros interrogantes que hasta el día de hoy todavía no tienen una solución definida y que Graham Bell denominaba “la vergüenza de los biólogos”: ¿por qué hay dos sexos en la mayoría de los organismos multicelulares? ¿puede existir la reproducción sexual sin sexos?

En primera instancia podríamos preguntarnos por ejemplo ¿qué tienen en común las hembras de los escarabajos, de los calamares, de las aves y las mujeres de nuestra especie? ¿Qué es lo que diferencia a las hembras de los machos en todos los organismos con sexos separados? Básicamente es una cuestión en la que el tamaño sí importa: *las hembras siempre producen gametas más grandes que los machos*. El óvulo es el que carga con una gran masa voluminosa de citoplasma que contiene la materia prima para la diferenciación temprana y crecimiento de los embriones. Consecuentemente, la movilidad del óvulo queda restringida. Por otro lado, los machos producen gametas más pequeñas y móviles que las

hembras, el espermatozoide, cuya función, además de transportar los cromosomas, se reduce principalmente a la búsqueda, encuentro y fertilización del óvulo. Así es que la pregunta del porqué de los sexos puede reformularse en: ¿por qué hay **anisogamia** o dimorfismo en las gametas?

En 1972, una primera respuesta llega de la mano de Parker, Baker y Smith. Su explicación, conocida como el modelo PBS, fue un clásico por décadas, consiste en que la selección disruptiva actúa sobre una población isogamética que presenta ligeras variaciones en el tamaño de sus gametas. La diferencia en el tamaño de las gametas originalmente podría responder a distintas **presiones de selección**, específicamente al **número de gametas** producido por un progenitor en un período determinado y al **fitness del cigoto**, es decir la probabilidad de que el cigoto sobreviva hasta llegar a adulto y se reproduzca en el menor tiempo posible. De este modo, los individuos que producen un mayor número de gametas tienen ventajas selectivas, dado que se incrementa la tasa reproductiva de ese progenitor. Bajo la suposición de que la disponibilidad de recursos energéticos y materiales para la organización de las gametas es similar en todos los adultos de una población, la producción de un mayor número de gametas conlleva la producción de gametas con volumen citoplasmático más reducido. Pero un cigoto formado a partir de dos gametas tan pequeñas podría tener un *fitness* demasiado reducido para un organismo multicelular, dado que su capacidad de supervivencia y velocidad de crecimiento dependen directamente de la cantidad de citoplasma disponible. Si además se suma que el tamaño de las gametas es heredable y que, en una población que presenta algún grado de variabilidad en los tamaños de las gametas la selección favorecería el máximo número de fusiones de las gametas más pequeñas con las gametas más grandes, esta situación daría lugar a la **selección disruptiva**, generando así una distribución bimodal del tamaño de las gametas, según lo explicado por el modelo PBS (Figura 3). Pero, ¿qué pasaría si se unieran dos gametas grandes u óvulos? Si bien es claro que la unión de dos espermatozoides sería fatal para el cigoto dado la escasez de citoplasma, no ocurriría lo mismo en la unión de dos óvulos, ya que la unión de estas gametas con gran contenido citoplasmático incrementaría el *fitness* del cigoto. Por eso los espermatozoides debieron estar bajo una intensa selección que les permitiera desarrollar mecanismos (por ejemplo: la vigorosa movilidad o la secreción de enzimas del acrosoma, como la hialuronidasa por el acrosoma) para buscar y unirse selectivamente a los óvulos, superando los mecanismos que pudieran desarrollar los óvulos para rechazar-

los. Así, los espermatozoides se especializaron en la búsqueda de óvulos y éstos, al ser fertilizados por los espermatozoides altamente móviles, incrementaron su productividad al reducir su movilidad.

Selección Disruptiva del tamaño de las gametas, que resulta en óvulos y espermatozoides

Imaginemos una población de organismos que se reproduce sexualmente pero sin sexos: A puede cruzarse con B; B con C y C con A. Hay una distribución de tipos parentales que producen gametas de diferente tamaño.

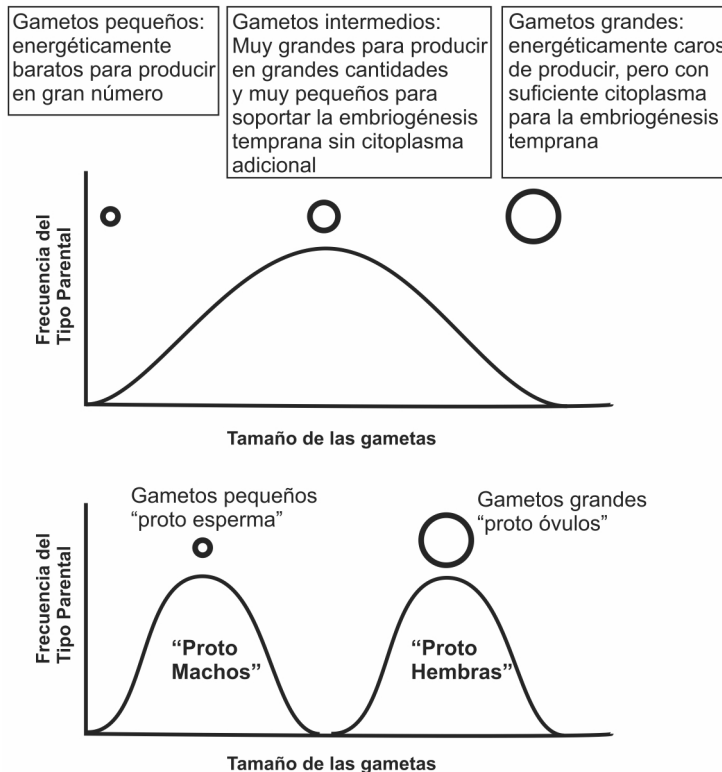


Figura 3. El modelo PBS establece que la acción de la selección disruptiva actuó inicialmente sobre una población isogámica en la que existía cierta variabilidad en los tamaños de las gametas (gráfico superior). Esta presión selectiva favoreció la evolución del dimorfismo en las gametas, dando como resultado la formación de óvulos y espermatozoides.

El modelo PBS no está libre de críticas. Algunos investigadores cuestionaron el supuesto de que el *fitness* del cigoto se incrementa desproporcionadamente con el volumen de las gametas, ya que no existe evidencia empírica directa que lo sustente. A su vez, el modelo PBS tampoco se puede aplicar a organismos actuales con isogamia, como por ejemplo la mayoría de los hongos basidiomicetos o algunas algas verdes. En estos casos pueden existir gametas con distintos "tipos reproductivos" (*mating types*), usualmente identificados como "positivo-negativo", ya que no hay fundamentos que justifiquen la distinción de se-

xos; por lo que se podría decir que en estos casos hay reproducción sexual sin sexos. En los organismos con isogamia, los tipos reproductivos presentan mecanismos moleculares que restringen la compatibilidad de las gametas independientemente del dimorfismo en el tamaño. Para explicar la evolución de estas estrategias reproductivas se han propuestos otros modelos distintos al PBS.

2.3. Procesos que determinan el sexo en los organismos

En la sección anterior exploramos un poco el origen evolutivo de la anisogamia y uno de los modelos más populares que dio respuesta a esa incógnita. En los animales y plantas que han evolucionado hacia sexos separados, la diferenciación precisa de machos y hembras fértiles es un proceso fundamental del desarrollo. Pero los mecanismos que determinan el sexo fenotípico que tendrá cada individuo forman parte de otro enigma ancestral. Antes de la invención del microscopio, los argumentos que daban cuenta de estos mecanismos se basaban principalmente en la intuición y rayaban con lo mitológico. Por ejemplo, hace más de 5000 años se creía en el origen hermafrodita del humano y una subsiguiente división en dos partes: el hombre y la mujer. Un caso muy conocido es el de la Biblia, en el que Dios crea a Eva de una de las costillas de Adán... Algunos investigadores creen que en el idioma original, la "costilla" se refería a un "costado" del cuerpo de Adán; es decir que originalmente Adán era hermafrodita, pero como a Dios no le pareció una buena idea que Adán estuviera solo, decidió crear a una colaboradora a partir de uno de los "costados" de su cuerpo.

Mucho tiempo después, en la antigua Grecia, Aristóteles propuso un mecanismo un poco más complejo para comprender la determinación del sexo. En su época se pensaba que el ser humano estaba compuesto de cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra; entonces él propuso que el macho estaba constituido por mayor cantidad del elemento superior fuego, mientras que la hembra estaba formada por más agua.

Los acercamientos más empíricos recién emergieron a partir del siglo XVII, luego de la difusión del uso del microscopio y la observación de las células reproductivas, con el origen de otra serie de hipótesis de lo más variopintas acerca de la determinación del sexo en los embriones. Fue recién en 1891 cuando Hermann Henking describió una estructura particular que denominó "X" en los núcleos de las células de unos insectos macho. Unos años más tarde, Clarence McClung se dio cuenta de que esas estructuras eran cromosomas y

los llamó “cromosomas accesorios”, que luego fueron conocidos como “cromosomas X”. El papel de los cromosomas en la determinación del sexo recién empezó a tomar más solidez en 1905, con los estudios de Nettie Stevens y Edmund Wilson. En sus trabajos demostraron que en algunos insectos, las células de las hembras tienen dos cromosomas X y los machos sólo uno; y descubrieron que en las células de una especie de escarabajo, los machos tienen un cromosoma más pequeño que el resto y lo denominaron “cromosoma Y”.

Los humanos y los mamíferos, así como otros organismos modelo como la mosca *Drosophila melanogaster* y el nematodo *Caenorhabditis elegans*, portan cromosomas sexuales y ciertas características en común que han llevado a elaborar supuestos generales acerca de la conservación de los mecanismos de determinación del sexo. Esto ha derivado en algunos de los mitos que aún circulan entre la comunidad de biólogos, sobre todo al evocar siempre los mismos modelos para abordar el estudio y/o la enseñanza de la determinación del sexo en los individuos.

2.3.1. Mito 1: El sexo típicamente está determinado por los cromosomas X e Y

En la mayoría de las especies en las que se conoce el mecanismo de determinación sexual, este se basa en la *determinación genética del sexo*, es decir que los elementos genéticos especifican si un individuo será macho o hembra. Pero en muchos animales, y en algunas plantas, son los estímulos externos los que controlan la determinación del sexo, esto se conoce como *determinación ambiental del sexo*. Algunos casos involucran a la temperatura en los reptiles, el fotoperíodo en los anfípodos marinos y algunos percebes, y factores sociales en muchos peces de arrecifes de coral y lapas. El mecanismo exacto en que actúa el ambiente para disparar el desarrollo del sexo aún es una pregunta sin respuesta. Hay estudios realizados sobre poblaciones del pez *Dicentrarchus labrax* que muestran que cuando la población está expuesta a temperaturas elevadas (superiores a 17 °C), durante los primeros 60 días de su desarrollo embrionario, la proporción de sexos tiene un sesgo hacia los machos. Las investigaciones sugieren que la metilación del ADN en el promotor de la aromatasasa (la enzima que convierte los andrógenos en estrógenos) puede ser un componente del proceso que vincula la temperatura ambiental con la proporción de sexos en ese pez y en las especies de vertebrados con determinación del sexo dependientes de la temperatura.

También suele ser común que la gente piense que una vez que el individuo ha desarrollado un sexo, macho o hembra, quedará así para siempre porque “es natural” que así sea. Sin embargo, el cambio de sexo en un organismo durante su vida no es algo raro en la naturaleza. Hay casos en que un ambiente es más beneficioso para un sexo, entonces los mecanismos ambientales de determinación del sexo se activan. Por ejemplo, en el pez *Thalassoma bifasciatum*, cuando los sitios para armar el nido son limitados y la habilidad del macho para defender su nido depende de su tamaño corporal, los individuos tienden a comenzar su vida como hembras y solo se transforman en machos cuando alcanzan el tamaño suficiente como para defender exitosamente su nido. Este tipo de desarrollo sexual se conoce como *hermafroditismo secuencial*.

2.3.2. Mito 2: El sexo es controlado por un gen maestro-interruptor

La evidencia de que el cromosoma Y desempeña un importante papel en la determinación del sexo fue muy fuerte a mediados del siglo XX. Esto condujo a una avalancha de investigaciones dedicadas a la caza del “factor determinante de los testículos” en humanos, un gen “maestro” ubicado en el cromosoma Y que funciona como un interruptor para activar (o no) el desarrollo de los testículos. La elección de los testículos como ícono masculino se basó en el concepto de Alfred Jost que demostró que un embrión de mamífero se diferencia en una hembra en ausencia de hormonas testiculares. Así, la teoría del ovario por *default* suponía una “pasividad” de los cromosomas XX, que no tenían que hacer “nada” para desarrollar las características femeninas, mientras que el cromosoma Y tenía un papel activo en el desarrollo del testículo que luego produce las hormonas que originan las características masculinas.

La intensa búsqueda dio como resultado el aislamiento del gen SRY ubicado en el cromosoma Y del humano, la clonación del gen *Sry* correspondiente en los ratones y la demostración, en 1991, de que la adición de *Sry* como un transgen podía iniciar el desarrollo masculino en embriones de ratones XX. De este modo se asumió que la determinación del sexo en los mamíferos estaba gobernada por un “gen maestro”, único gen necesario y suficiente, aunque aún no son muy claros los pasos involucrados desde la expresión del gen *Sry* hacia el fenotipo final.

Algunas taxas tienen genes “maestros-interruptores” determinantes del sexo muy conservados a través de sus linajes filogenéticos, como el gen *Sry* en los mamíferos que mencionamos en el párrafo anterior. Hay estudios que respaldan el uso repetido del mismo gen maestro para la determinación del sexo en los animales. Por ejemplo, en los vertebrados no mamíferos el gen *dmrt1* y sus parálogos actúan como el determinante primario del sexo en la rana africana *Xenopus laevis*, el pollo *Gallus gallus*, el pez *Oryzias latipes* y posiblemente el pez *Cynoglossus semilaevis*. En las plantas dioicas no se ha identificado ningún gen maestro determinante del sexo, pero se han encontrado genes que afectan la determinación del sexo en las flores. Por ejemplo, 227 genes de esterilidad masculina se han encontrado en la planta de arroz, al menos uno por cada cromosoma, lo que implica que en cada autosoma podría evolucionar una función determinante del sexo. Por otra parte, hay algunos genes reguladores como los genes de la familia *doublesex-mab3* (DM) que, a pesar de las profundas diferencias que presentan con los genes maestros, regulan a los genes involucrados en las gónadas en casi todos los animales. En el pez cebra *Danio rerio*, la determinación del sexo está controlada por múltiples regiones del genoma que establecen un umbral cuantitativo específico a partir del cual el fenotipo se define como macho o hembra. Pero se desconoce cómo interactúan estos múltiples loci y el ambiente para controlar los procesos de diferenciación del sexo en este pez.

Aún quedan enigmas por resolver en cuanto a los mecanismos que controlan el desarrollo de las características sexuales en un organismo. La incorporación de distintos modelos de estudio que permitan una comprensión más profunda de la diversidad de mecanismos implicados en la determinación del sexo, el uso de métodos comparativos filogenéticos para incorporar los factores genéticos y ecológicos y la integración disciplinar que atraviese todo el árbol de la vida permitirá esclarecer los puntos que permanecen nebulosos.

2. 4. La selección sexual

Como describimos anteriormente, las hembras producen relativamente un menor número de gametas grandes, mientras que los machos producen más cantidad de gametas pequeñas. A su vez, las hembras son las que con más frecuencia invierten en otras formas de cuidado parental. Dado que los machos tienen la potencialidad de fertilizar gametas a una

tasa más rápida de lo que son producidas, se deduce que las hembras son un “recurso escaso” por el que los machos tienen que competir para lograr dejar su descendencia. Por lo tanto, un macho podría incrementar su éxito reproductivo buscando y fertilizando a muchas hembras distintas, mientras que las hembras lo harían transformando los recursos alimenticios en gametas o crías. Esto se puede comprender fácilmente considerando un ejemplo muy conocido entre los mamíferos: el ser humano. Mientras que la gestación de un hijo dura aproximadamente nueve meses en el útero de una mujer, durante todo ese tiempo el hombre potencialmente tiene la capacidad de fecundar a otras parejas.

A pesar de que cada macho podría fecundar a decenas de hembras en un período de tiempo, no es frecuente encontrar en la naturaleza una proporción de sexos que favorezca un alto número de hembras por cada macho, si no más bien una proporción cercana a 1:1. El hecho de que las hembras sean un “recurso limitante” para lograr dejar descendencia genera competencia entre los machos por fecundar a las hembras, y de este modo se favorece la *selección sexual*.

En 1971, Charles Darwin creó el concepto de selección sexual como una forma de explicar la evolución de ciertas características prescindibles para la supervivencia, como las armas de ofensa o mecanismos de defensa que tienen los machos para pelear y alejar a sus rivales, su coraje y su agresividad, la ornamentación o la capacidad de vocalización. Para él era muy claro que este tipo de características no estaban bajo selección natural, sino bajo selección sexual, ya que suponía que si las hembras podían sobrevivir y reproducirse sin ellas, también lo podrían hacer igualmente los machos. Él pensaba que las variaciones en este tipo de características se preservaban y acumulaban gracias a la selección sexual, que dependía de “el fervor del amor, el coraje y la rivalidad de los machos así como de los poderes de percepción, el gusto y la voluntad de la hembra”. De este modo, la selección sexual puede definirse como el proceso mediante el cual los individuos compiten por el acceso a la pareja y a las oportunidades de fecundación, seleccionando aquellas características que únicamente están relacionadas con el incremento del éxito en el apareamiento. No obstante, en muchas especies las hembras son las principales proveedoras de recursos energéticos para el cigoto y dedican gran parte de tiempo de su vida a la producción de gametas, en comparación con los machos. Por eso, son las que tienen más riesgos de “perder” si el apareamiento no resulta exitoso. De ahí que también tengan el *poder* de elegir

a sus parejas cuidadosamente para obtener, en algunos casos, ciertos beneficios. Veamos a continuación algunos de ellos.



Figura 4: Los cangrejos violinistas (*Uca* spp.) son un ejemplo de la acción de la selección sexual. Los machos portan una quela más desarrollada con la que atraen a las hembras.

2.4.1. Beneficios directos de la selección sexual: recursos y cuidado de las crías

Hay casos en que la preferencia de la hembra sobre ciertos rasgos de los machos puede ser seleccionada evolutivamente si la hembra se ve beneficiada directamente en el incremento de su supervivencia y fertilidad, es decir que su *fitness* es incrementado. Así, en las hembras puede evolucionar la preferencia por aquellos machos con habilidad en el cuidado parental o que les aporten buenos recursos. Muchos de los recursos importantes para la supervivencia de las crías de la hembra son protegidos en los territorios de reproducción que defienden los machos de muchas especies de animales. Por ejemplo, los machos de las libélulas de la especie *Calopteryx haemorrhoidalis* tienen la particularidad de tener las alas pigmentadas y realizar una serie de despliegues comportamentales pre y post-copulatorios durante los cuales exhiben sus alas a las hembras. Dado que los machos de esta especie defienden substratos acuáticos que las hembras usan durante la oviposición es posible que la pigmentación alar haya evolucionado mediante la selección sexual.

El alimento es otro recurso apreciado por las hembras, ya que limita su capacidad de producir gametas. En algunas especies de animales, las hembras deciden con qué macho quieren aparearse según su habilidad para proveer comida. Los “regalos nupciales” son

productos materiales que los machos ofrecen a las hembras durante el cortejo. Este comportamiento puede interpretarse de dos maneras: como inversión parental, es decir que el macho provee recursos nutricionales a la hembra para aumentar su desempeño reproductivo, o que el macho incrementa su éxito reproductivo atrayendo a las hembras. La conducta de dar regalos está ampliamente distribuida entre los animales, pero es muy común especialmente entre los artrópodos, entre los cuales los machos suelen donar alimento. Por ejemplo, los machos de una especie de araña que habita en el norte de Argentina (*Paratrechalea ornata*) ofrecen a la hembra un regalo nupcial durante el cortejo que consiste en una presa envuelta en la seda. De este modo, el regalo nupcial permite persuadir a la hembra de iniciar la cópula e incrementar la duración de la cópula, aumentando así la cantidad de espermatozoides transferidos.

Pero en el mundo silvestre no todo es ambición por territorios o regalos... Las hembras también pueden preferir machos en los que detecten habilidades para el cuidado parental. Por ejemplo, los machos de *Gasterosteus aculeatus*, un pequeño pez del hemisferio norte, presentan una coloración nupcial rojiza que se asocia a su habilidad parental, específicamente a la habilidad del macho para criar una puesta de huevos hasta su eclosión.

Sin embargo, la hembra también puede presentar preferencias en la elección de su pareja aunque esta no le proporcione recursos que incrementen su *fitness* directamente. Algunas hipótesis que explican este comportamiento y los beneficios indirectos que recibe la hembra son: la hipótesis de Fisher y la hipótesis de los "buenos genes".

Cabe mencionar que si bien los caracteres sexuales secundarios usualmente están más desarrollados en los machos que en las hembras, en éstas también puede ocurrir algún grado de desarrollo de éstos caracteres, y por lo tanto, estar bajo la presión de la selección sexual. En un considerable número de especies animales las hembras compiten entre sí para lograr el acceso a los recursos necesarios para la concepción y el cuidado de sus crías, pero también compiten por el acceso al apareamiento. Por último, hay animales en los que los machos también muestran preferencias por aparearse con hembras con características particulares, lo que explicaría la llamativa ornamentación que presentan las hembras de algunas especies: como la notoria coloración del plumaje en los tucanes, colibríes o loros; la presencia de cuernos o astas en muchos mamíferos ungulados de ambos sexos; o las ornamentaciones elaboradas en insectos de ambos sexos; por citar sólo algunos ejemplos.

2.4.2. Beneficios indirectos: hipótesis de Fisher

En 1889, Alfred Wallace estaba convencido de que los animales no muestran ninguna preferencia sobre la belleza de sus parejas, porque argumentaba que ese tipo de facultades son inherentes al ser humano, propios de su “naturaleza espiritual”; en cambio el sentido estético en los animales tendría un origen inexplicable. Pero para Ronald Fisher, ese argumento era débil, porque él reconocía que aún se ignoraban los motivos por los que los animales silvestres elegían a sus pretendientes y porque hasta el momento no había ninguna explicación satisfactoria para el origen de los sobresalientes caracteres sexuales en sí mismos, ni para los elaborados cortejos ni se sabía por qué a las hembras les atraen esas excentricidades.

En 1930, Fisher planteó una situación hipotética en la que el desarrollo de la preferencia sobre una característica por parte de un sexo (usualmente la hembra) influye sobre el número de descendientes de los individuos del otro sexo. Por ejemplo, el plumaje en los gallos puede modificarse de acuerdo con la acción de dos procesos selectivos: a) los machos con ciertas ornamentaciones en su plumaje pueden presentar ventajas iniciales, independientemente de las preferencias de las hembras, y b) la ventaja adicional conferida por la preferencia de las hembras, que es proporcional a la intensidad de esta preferencia. A su vez, la intensidad de la preferencia aumentará por selección si los hijos de las gallinas que mostraron preferencias tienen marcadas ventajas en comparación con los hijos de otras gallinas. Las dos características involucradas en el proceso, la ornamentación en el plumaje del macho y la preferencia de la hembra por el plumaje ornamentado, deben estar sujetas a una selección positiva. Los machos con ornamentos tendrán ventajas en el apareamiento si muchas hembras prefieren aparearse con ellos. Sin embargo, la selección sobre la preferencia en las hembras se explica de modo distinto, ya que ocurre por selección indirecta. Dado que las hembras con fuertes preferencias se aparean con machos muy ornamentados, los alelos de la preferencia y del ornamento a menudo coinciden en la descendencia producto de ese apareamiento, con la consecuente asociación estadística de ambos alelos. De esta forma, una selección positiva sobre la ornamentación inducirá a una selección positiva correlacionada sobre la preferencia. Los beneficios indirectos para las hembras resultan en un gran número de “nietos”, dado que sus hijos heredarán las cualidades ventajosas de sus padres y a la vez serán atractivos para otras hembras, por lo que

tendrán elevadas tasas de apareamiento y por lo tanto más descendencia. Con esta hipótesis, Fisher pudo explicar que la gran exageración de los ornamentos sexuales observados en muchas especies se debe a que simplemente son atractivos para las hembras. De hecho el proceso hacia ornamentos cada vez más elaborados puede continuar y acelerarse indefinidamente. Únicamente podría frenarse y alcanzar un equilibrio si aparecen desventajas para los machos con ornamentos elaborados que reduzcan su descendencia o su supervivencia.

2.4.3. Beneficios indirectos: “los buenos genes”

A diferencia de la hipótesis de Fisher, que propone que las hembras eligen a sus parejas únicamente por su atractivo, la hipótesis de los buenos genes establece que la elección se realiza sobre los machos que portan los “mejores genes”. Tradicionalmente, se entiende que los “buenos genes” son aquellos que aumentan la habilidad de la descendencia para sobrevivir, competir y reproducirse, aunque en realidad debería interpretarse como aquellos que aumentan el valor reproductivo de la descendencia. Pero, ¿pueden las hembras distinguir a los machos con buenos genes del resto? Según la hipótesis del *handicap* de Amotz Zahavi (1975) hay señales que son indicadores confiables de la calidad del macho sólo cuando éstas implican un costo asociado:

“El estudio de una variedad de caracteres que probablemente fueron seleccionados por selección sexual (a través de la elección de pareja) evidencia que probablemente todos ellos parecen conferir una desventaja (handicap) en la supervivencia. [...] La selección sexual es efectiva sólo mediante la selección de un carácter que disminuya la supervivencia del individuo. Es posible considerar al handicap como un tipo de prueba impuesta sobre el individuo. Un individuo con un carácter muy bien desarrollado seleccionado sexualmente es un individuo que ha sobrevivido a la prueba. Una hembra que puede discriminar a un macho con un carácter bien desarrollado seleccionado sexualmente, de uno que no lo tiene, es capaz de distinguir entre un macho que ha pasado la prueba de uno que no ha sido probado. Las hembras que eligen a los machos con los caracteres más desarrollados pueden estar seguras de que han elegido a los mejores genotipos de toda la población de machos.”

Un ejemplo muy conocido para ilustrar la hipótesis del *handicap* es el del desarrollo de la cola en los machos de los pavos reales. Así lo explica Zahavi:

"Las plumas excesivas en la cola de los pavos reales que parecen atraer a las hembras son obviamente deletéreas para la supervivencia de los individuos. Cuanto más brillantes son las plumas, más conspicuo es el macho a sus predadores; y cuanto más largas son, más difícil es para el macho escapar de los predadores o moverse durante las actividades cotidianas. Por lo tanto, si las hembras eligen a los machos que están en desventaja por tener las plumas más largas, eligen la calidad. Ciertamente sería mejor para las hembras elegir machos de alta calidad pero sin handicap por sus plumas. Por consiguiente, tenemos que asumir que la distinción de la calidad es más difícil sin la prueba de las plumas."



Figura 5: El pavo real es el modelo clásico para explicar la hipótesis del *handicap*.

Sin embargo, no todas las señales que implican un costo para la supervivencia son indicadores fiables de buenos genes, hay investigadores que sugieren que las señales costosas deberían considerarse como inversiones en lugar de *handicaps*. Mientras a las hembras les resulta muy conveniente que los ornamentos sean señales confiables de la buena calidad genética del macho, es posible que aparezcan machos a los que les convenga debilitar la asociación entre los buenos genes y la expresión de la ornamentación tanto como sea po-

sible, así esos machos que no portan buenos genes también son capaces de atraer hembras. Por eso, los machos de baja calidad intentarán invertir más en ornamentos si estos aumentan su éxito reproductivo. Por supuesto, esto hace a las hembras más difícil la tarea de distinguir a las potenciales parejas de buena calidad.

En la actualidad la teoría del *handicap* se interpreta de otra manera, clasificando a las señales en dos tipos: las señales dependientes de la condición y las señales reveladoras. Las señales dependientes de la condición son aquellas que implican costos para desarrollar y mantener los caracteres elaborados, de esta forma los machos de alta calidad son los que podrán asumir estos costos. Por otro lado, las señales reveladoras aumentan la discriminación de la calidad de sus portadores y no son costosas, de modo que los individuos de baja calidad tendrán baja tasa de apareamientos. Por ejemplo, el costo de las señales dependientes de la condición puede afectar al desempeño del cuidado parental de las crías por parte del portador, mientras que el costo de una señal reveladora no afectaría a este desempeño.

La longitud de la cola de las aves y sus formas ornamentales son un ejemplo clásico de carácter seleccionado sexualmente, ambos implican costos aerodinámicos para las aves, por lo que son un tipo de señal dependiente de la condición; mientras que la presencia de marcas pigmentadas en el plumaje de la cola podrían funcionar como señales reveladoras durante el cortejo si no implican costos adicionales.

Otro ejemplo de señal dependiente de la condición es el despliegue acústico realizado por los machos de los grillos. El "canto" o "llamado" es utilizado para atraer a las hembras, pero implica costos para los machos: gasto energético, reducción en el tiempo de forrajeo y el incremento de riesgo de predación o parasitismo. Para aumentar la atracción de las hembras, los machos pueden incrementar la tasa de llamados. A su vez, la buena condición nutricional de los machos incrementa su tasa de llamados y de esa forma mayor cantidad de hembras son atraídas.

2.4.4. Sin beneficios: preferencias como productos derivados de la selección natural

La evolución de las preferencias en las hembras también puede ocurrir en ausencia de beneficios directos o indirectos. En esa dirección se han elaborado hipótesis denominadas de

“sesgo sensorial”. Dos predicciones se asocian a este tipo de hipótesis: una establece que los machos deberían desarrollar caracteres sexuales que maximicen la estimulación sensorial de las hembras; la otra, que las preferencias de apareamiento de las hembras deberían evolucionar como un producto derivado de la selección natural sobre el sistema sensorial en contextos diferentes al reproductivo, como el forrajeo o la evasión de predadores. Los supuestos de este tipo de modelos se basan en que la pleiotropía crea fuertes correlaciones genéticas entre comportamientos distintos que comparten un sistema sensorial. Por ejemplo, *Poecilia reticulata* es un pez sudamericano cuyos machos presentan variaciones en los caracteres secundarios, como el tamaño del cuerpo y la cola, el patrón de coloración y los cortejos elaborados. Estudios realizados sobre esta especie han corroborado correlaciones entre la preferencia de las hembras por objetos inanimados de color naranja (indicadores de preferencias de forrajeo) y las preferencias reproductivas por machos del mismo color, consistentes con el supuesto de pleiotropía. Se estima que los detalles de la arquitectura sensorial, como el número de neuronas eferentes, podrían influir sobre la evolución de las preferencias.

2.4.5. La selección sexual y la especiación

El origen de nuevas especies es la fuente de la diversidad de la vida. Pero ¿de qué manera se relaciona la selección sexual con la especiación? Podemos inferir que la selección sexual tiene un papel importante, dado que especies estrechamente relacionadas frecuentemente presentan drásticas diferencias en características asociadas a la reproducción. Fisher fue uno de los primeros en reconocer, en 1930, que su hipótesis, también conocida como proceso *runaway* o proceso de Fisher, puede funcionar como un potencial mecanismo de especiación en la selección sexual, ya que si este proceso ocurre en una población aislada, las nuevas preferencias y ornamentos desarrollados pueden confluir en un mecanismo de aislamiento reproductivo precigótico.

Estos mecanismos de aislamiento pueden ocurrir en poblaciones simpátricas en las que dos procesos de Fisher divergentes ocurran simultáneamente con una amplia variación de preferencias en las hembras. Otra posibilidad es que la evolución de las preferen-

cias por señales indicadoras de adaptación local incrementa la selección natural disruptiva en poblaciones parapátricas⁴.

Por otro lado, la selección sexual a su vez puede contribuir al *fitness* reducido de los híbridos si estos son menos atractivos como parejas, de este modo se refuerza el “aislamiento reproductivo postcigótico”. Las preferencias de apareamiento pueden ser un potente mecanismo de refuerzo, dado que la selección ocurre en contra de la hibridación deletérea si los individuos tienden a aparearse con parejas genéticamente compatibles. De hecho, esto puede llevar a que las hembras elijan aquellas señales que indican bajos niveles de hibridación.

2.5. Reproducción en humanos

2.5.1. Somos primates

Aristóteles consideraba que el ser humano era el único animal dotado de razón, es decir de la capacidad de pensar racionalmente. Desde entonces, por varios siglos los naturalistas utilizaron esa capacidad como un carácter taxonómico y clasificaron a los humanos como los únicos animales racionales, separados del resto de los animales... hasta la llegada de Carl Linnaeus. Él notó que la razón no era una característica visible, no se podía medir ni pesar, por lo que tampoco podía ser utilizada como un carácter taxonómico. Así fue como, se dio cuenta de que el resto de las características como las similitudes anatómicas entre los simios y los humanos eran tan grandes que debía reunirlos a todos en un mismo grupo. De este modo, Linnaeus fue el primer biólogo en clasificarnos a los humanos dentro del orden Primates, clase Mammalia y en asignarnos el nombre de *Homo sapiens*. Actualmente, los primates se clasifican en dos subórdenes: Strepsirhini y Haplorhini. Strepsirhini incluye a los lemures y los loris, entre otros; mientras que Haplorhini se dividen en tres clados: los

⁴ La formación de nuevas especies puede ocurrir en poblaciones en las que aún existe un cierto grado de flujo génico, como las poblaciones parapátricas y simpátricas. El modelo de especiación simpátrica postula que en una población que comparte la misma área geográfica existen condiciones que favorecen la selección a favor de dos genotipos homocigotos extremos, mientras que el genotipo heterocigoto presenta menos *fitness*. Por otro lado, el modelo de especiación propone que una población parapátrica tiene una amplia distribución geográfica a través de la cual manifiesta una gran diversidad ecológica. Esta diversidad conduce a que existan variaciones a lo largo de un gradiente ambiental o geográfico, el que a su vez termina por dificultar el libre flujo génico entre todos los miembros de la población, adaptados a distintas condiciones dentro del gradiente.

Tarsiiformes (tarsios), los Platyrrhini (simios del Nuevo Mundo) y los Catarrhini (humanos, grandes simios, gibones y simios del Viejo Mundo). Los primates se distinguen principalmente por su larga esperanza de vida, su maduración reproductiva retardada, una baja tasa reproductiva y una elevada inversión por cada cría.

Nuestra especie es una de las que presenta las tasas reproductivas más bajas. El período de gestación de nueve meses es el más prolongado de todos los primates, sobrepasado por el período de gestación de otros grandes mamíferos como los elefantes o las ballenas. La lactancia puede persistir por dos años o incluso más y los hijos son dependientes de los padres durante muchos años luego del destete. Al ser humano le lleva más de diez años alcanzar la madurez sexual y la ovulación ocurre lentamente. Una posible explicación para la evolución de la baja tasa reproductiva es que el desarrollo del intenso cuidado parental incrementa la supervivencia de la descendencia de manera de compensar los costos por una fecundidad parental reducida.

De lo anterior se desprende que con el resto de los primates compartimos más que únicamente la ubicación taxonómica dentro del mismo grupo. A continuación conoceremos algunos aspectos vinculados a la reproducción que tenemos en común con nuestros “hermanos” de clado.

2.5.2. La pubertad en los primates

Los primates atravesamos un período extendido de desarrollo prepuberal, así como una prolongación del período de madurez reproductiva, más conocido como **pubertad**. Esta etapa se caracteriza por cambios morfológicos, fisiológicos y comportamentales manejados por la maduración y activación del eje hipotalámico-hipofisiario-gonadal (gonadarquia) y, en algunas especies, por el eje hipotalámico-hipofisiario-adrenal (adrenarquía).

La adrenarquía ocurre varios años antes de la gonadarquia. Durante esta etapa, los humanos, chimpancés y posiblemente algunos otros Catarrhini, experimentan la remodelación de la corteza suprarrenal y el incremento de la secreción de andrógenos por la zona *reticularis* (la zona más interna de la corteza suprarrenal). La única manera en que podemos reconocer las manifestaciones de la adrenarquía en los humanos es a partir del crecimiento del vello púbico y axilar, el desarrollo de las glándulas apócrinas en la piel que pueden causar el olor corporal y la activación de la actividad glandular sebácea causante del acné.

Se cree que el desarrollo de la adrenaquia cumple un papel importante en la madurez del cerebro y del sistema esquelético. En mujeres que atravesaron una adrenaquia precoz se han detectado varios desórdenes sistémicos asociados, como síndrome poliquístico de ovarios y síndromes metabólicos.

Al comienzo de la vida de los primates, la hipófisis y las gónadas secretan altos niveles de gonadotrofinas (hormonas luteinizante y folículo-estimulante) y de hormonas esteroideas, respectivamente, durante algunas semanas o incluso meses. Este período de actividad gonadal neonatal finaliza en la niñez, durante el llamado hiato prepuberal, en el que los niveles de gonadotrofinas disminuyen drásticamente y las gónadas entran en un estado de dormancia. Es en la gonadaquia que ocurre la reactivación gonadal, con menos de un año de edad en varios lémures prosimios, desde los tres años en macacos y monos ardilla, de los siete a los once en los chimpancés, y de los nueve a los trece años en humanos. Durante esta etapa, en los machos se incrementan drásticamente los niveles de hormona luteinizante en circulación y, en menor medida de la hormona folículo-estimulante. Estos aumentos en las gonadotrofinas estimulan el incremento del volumen testicular, el desarrollo de las células de Leydig, la secreción de niveles altos de andrógenos gonadales y el inicio de la espermatogénesis. El incremento de los niveles de esteroides gonadales estimula el desarrollo de los caracteres sexuales secundarios típicos de la especie, como la coloración facial y genital específica del sexo en los mandriles (*Mandrillus sphinx*), el saco laríngeo y los rebordes en las mejillas del orangután (*Pongo pygmaeus*) y el pelo facial y corporal especializado en el babuino (*Papio amadryas*), así como el comienzo de los comportamientos sexuales. En las hembras, el incremento de las gonadotrofinas estimula la iniciación de la actividad cíclica de los ovarios, el aumento de la síntesis de esteroides y, en los Catarrhini y algunos Platyrrhini, la menarca o primera menstruación. Luego de la menarca, las hormonas liberadoras de gonadotrofinas (gonadoliberinas o GnRH) desarrollan la capacidad de liberar gonadotrofinas a través de una retroalimentación positiva en respuesta a los estrógenos, culminando así en la primera ovulación. Así es como la menarca precede por un año (en los macacos rhesus) o por un año o más (en los humanos y los grandes simios) el comienzo de los ciclos ovulatorios fértiles, período caracterizado por tener ciclos irregulares, aunque por supuesto esto no imposibilita un embarazo durante ese período.

La menstruación, definida como el desprendimiento superficial del endometrio asociado al sangrado que ocurre cuando los niveles de progesterona disminuyen al final de un ciclo reproductivo infértil, ocurre únicamente en las hembras de los primates modernos, de las musarañas elefante y de algunas especies de murciélagos. Si bien hay casos de sangrado en otras especies de mamíferos, como los perros, este no se corresponde con una menstruación. En primer lugar porque el sangrado aparece durante el proestro (cuando no hay disminución en los niveles de progesterona) y, en segundo lugar, porque el sangrado proviene de la vagina, y no del útero. Pero parece ser que los humanos nos diferenciamos aún más del resto de los mamíferos, y en particular de los primates, y es por la conocida “pérdida del estro”.

2.5.3. La pérdida del estro en humanos

En cada ciclo reproductivo, las hembras de la mayoría de los mamíferos atraviesan por un período denominado estro (también conocido como celo), que es una fase en la que existe un período limitado de actividad sexual en la que se maximizan las posibilidades de concepción. Durante el estro, la hembra muestra *atractividad, proceptividad y receptividad sexual*. La atractividad comprende a aquellas características que le permiten a los machos identificar a una hembra receptiva, como cambios de coloración o la emisión de feromonas en la orina; la proceptividad incluye a todas aquellas conductas sexualmente solícitas que inducen a la cópula y por último, la receptividad incluye a las conductas y reacciones que facilitan la cópula, como la adopción de una postura adecuada que permita la inserción y el movimiento del pene hasta la eyaculación.

El estro puede ocurrir estacionalmente, de manera de sincronizar el nacimiento de las crías con condiciones ambientales favorables para su supervivencia y desarrollo, y también puede tener una frecuencia variable. Por ejemplo, el estro ocurre una o dos veces por año en las perras o varias veces en intervalos fijos de tiempo en las vacas, las ovejas o las yeguas.

Pero, parece ser que la especie humana, al igual que en otras especies de catarrinos no atraviesa por un período de estro. Si bien es cierto que cuando se acerca el período de ovulación ocurren cambios en el cuerpo de las mujeres, como modificaciones en los olores corporales o fluctuaciones en el estado de ánimo, se dice que el ciclo reproductivo perma-

nece críptico u oculto. Esta novedad evolutiva implica que la sexualidad femenina deja de estar controlada únicamente por factores hormonales y le da lugar a otros estímulos de índole social, psicológica, educacional o ambiental que actúan a través del sistema nervioso central. De esto se desprende que entonces la mujer puede tener relaciones sexuales en cualquier momento de su ciclo menstrual, independientemente de cuando ocurra la ovulación y de su mayor posibilidad de concepción.

Muchas hipótesis se han propuesto para explicar el surgimiento de la pérdida del estro a través de la historia evolutiva de los humanos y sus posibles ventajas adaptativas, como favorecer la cooperación dentro del grupo mediante la reducción de la competencia entre hombres, el surgimiento de la monogamia, la adquisición de alimentos con mejor contenido proteico a partir de la caza realizada por el hombre y la posibilidad de engañar a la pareja acerca de su paternidad disminuyendo el infanticidio. Incluso se ha llegado a proponer que con la ovulación oculta la mujer se podía engañar a sí misma acerca de cuándo eran sus días más fértiles. Según esa hipótesis, las mujeres que conocían exactamente los síntomas de las fases menstruales tenían la capacidad de evitar el contacto sexual para así evitar la concepción y, consecuentemente, el dolor del parto; de ese modo habrían sido seleccionadas las mujeres que desconocían su momento más fértil y que no pudieron evitar el embarazo...

Más allá de estas y otras explicaciones más, una de las hipótesis más conocidas y ampliamente aceptadas propone que la ausencia de signos externos notorios de la ovulación y la continua receptividad sexual refuerzan el vínculo en la pareja y así, una mejora en el cuidado de los hijos y su supervivencia. Al mantener a la pareja en la incertidumbre acerca de la fecha exacta de ovulación, los hombres se verían obligados a cuidar a la mujer durante más tiempo, restando recursos que usaba en la competencia por la pareja para invertirlos en el cuidado de su mujer e hijos.

Pero también es posible que la pérdida del estro haya aparecido como una consecuencia de la progresiva cefalización y de la mayor participación del sistema nervioso en la regulación de los distintos procesos fisiológicos. Esto también tiene sentido a la luz de distintos estudios realizados en mujeres sin actividad estrogénica (mujeres menopáusicas o con síndrome de Turner) que evidencian que, a diferencia del hombre, la respuesta de la mujer es más independiente de los estímulos hormonales. El crecimiento en el volumen del cerebro, a través de la historia de divergencia de los homínidos, ha tenido lugar principal-

mente por el desarrollo de la neocorteza cerebral y de las áreas de asociación, especialmente las de interconexión entre las áreas sensitivas y motoras. Las consecuencias de esta progresiva encefalización se evidencian en el comportamiento de algunos primates no humanos, como los chimpancés y bonobos, que a pesar de mantener el ciclo estral se muestran receptivos a la actividad sexual en cualquier momento del ciclo según los estímulos sociales que reciban. Cabe mencionar el caso de los bonobos y chimpancés, que mantienen relaciones sexuales en cualquier momento del ciclo, asociadas con el placer y las relaciones sociales y políticas. Algunas hembras pueden ofrecer sexo a cambio de comida o protección y también lo hacen los machos para buscar mejor posicionamiento social. Incluso está descrita la homosexualidad, es decir que la sexualidad, entendida como construcción de la personalidad sexual separada de las funciones reproductivas, nos permite suponer que debió estar presente en un ancestro común.

A pesar de todo el material de discusión que ha generado en las últimas décadas la pérdida del estro en la especie humana, desde la psicología hay posturas que afirman que en realidad las mujeres sí tienen estro. Los argumentos sostienen que la sexualidad femenina no es continua sino que tiene una doble actividad, consistente en una fase ovulatoria fértil (con mayor atractividad) y otra fase extendida no fértil el resto del ciclo. Hay estudios que reportan que en los días fértiles de sus ciclos, las mujeres sienten atracción sexual por una variedad particular de características masculinas que ancestralmente podrían considerarse como indicadores de calidad genética, como por ejemplo la dominancia social, rasgos faciales y corporales masculinos, ciertas cualidades vocales y la altura. Incluso se ha reportado un incremento del deseo sexual, de la frecuencia de fantasías sexuales y del desarrollo de actividades sociales con mayores posibilidades de conocer y tratar con hombres durante el período preovulatorio y ovulatorio. Estas investigaciones, aunque no son concluyentes, permiten constatar que la fase fértil de las mujeres sólo está parcialmente oculta. Finalmente, lo que se puede rescatar de todo ese debate es que existe una discontinuidad del control hormonal exclusivo de la sexualidad femenina, dejando paso al control nervioso central, y que este hecho es de gran relevancia para la historia evolutiva de nuestra especie.

2.5.4. La lactancia en los primates

La producción de leche, y su secreción a través de las glándulas mamarias, para nutrir a las crías es una de las características que nos define como los mamíferos. A diferencia de otros mamíferos, como la vaca, los primates producen leche con baja densidad en calorías, es decir con mayor contenido de agua, y un contenido proteico también relativamente más bajo. Estas características hicieron posible el desarrollo de una estrategia que involucra el cuidado frecuente de las crías durante el día y la noche, en adición a un período relativamente largo de alimentación exclusiva basado en la leche materna. Por eso, los primates son uno de los dos linajes de mamíferos euterios, junto con los edentados, en el que las hembras cargan a sus crías rutinariamente.

En las mujeres, se sabe que es durante el embarazo que el constante incremento de progesterona, estrógeno y prolactina activa la producción de calostro (lactogénesis I). Luego, la expulsión efectiva de la placenta y la consecuente disminución repentina en los niveles de progesterona desencadenan el inicio de la secreción abundante de leche (lactogénesis II). La succión ejercida por el bebé sobre el pezón ejerce un efecto inmediato sobre la hipófisis, que produce la liberación de prolactina y oxitocina. La prolactina estimula la producción mamaria de leche y la oxitocina, la expulsión de la leche. La prolactina es un requisito para la producción de leche, y es mantenida mediante la extracción de leche, ya sea por el bebé lactante o por extracción manual o mecánica. De este modo, una vez que la lactancia ya está establecida (lactogénesis III), la producción de leche es regulada por la succión del bebé, que estimula la liberación de prolactina, o por la continua extracción de leche.

Otra característica inusual que trae aparejada la lactancia en los primates es la presencia de un largo período anovulatorio inducido por ésta, denominado amenorrea lactacional en primates con ciclos menstruales. El estímulo de succión disminuye la secreción de la hormona liberadora de gonadotrofina, que a su vez produce una liberación débil y pulsátil de hormona luteinizante desde la hipófisis, suprimiendo de este modo la actividad de los ovarios. Se ha sugerido que los niveles elevados de prolactina pueden afectar el desarrollo folicular y reducir la sensibilidad del cuerpo lúteo a la hormona luteinizante, reduciendo la secreción de progesterona. Sin embargo la sensibilidad de los ovarios a la prolactina es muy variable, tanto que niveles moderadamente elevados de prolactina pueden no tener

efectos en algunos casos mientras que en otros pueden ocasionar anovulación y amenorrea. Es posible que los efectos centrales de la oxitocina puedan mediar la secreción de hormona liberadora de gonadotropina inducida por hormona luteinizante (gonadotropina coriónica en los simios del Nuevo Mundo) desde la hipófisis y, de este modo, estar vinculados con la amenorrea/anovulación de la lactancia. Por otra parte, también hay investigaciones que sugieren que los opioides o la dopamina actúan como posibles señales vinculando el estímulo de succión a la supresión de hormona liberadora de gonadotropina, sin embargo aún es necesario realizar más estudios para comprender el funcionamiento de ambos mecanismos.

Entonces... ¿la lactancia funciona como un método anticonceptivo? En 1988, el método de la amenorrea de la lactancia (o LAM por sus siglas en inglés) fue definido en Europa como el uso informado de la lactancia como método anticonceptivo “transitorio” por mujeres aún amenorréicas que no iniciaron la alimentación complementaria con sus bebés hasta los 6 meses postparto. Este método se basa en que el estímulo de succión del bebé suprime la secreción de hormona liberadora de gonadotropina (GnRH), suprimiendo así la actividad de los ovarios. De este modo la probabilidad de embarazo es muy baja en las mujeres que aún no han menstruado y que alimentan exclusivamente a sus bebés a través de la lactancia materna con intervalos que nunca exceden las 4 horas durante el día y las 6 horas durante la noche en el transcurso de los primeros 6 meses postparto. Sin embargo, dado que el fin de la amenorrea es impredecible y que no todas las mujeres cumplen estrictamente estas condiciones, es altamente recomendable que las madres utilicen otros métodos anticonceptivos más seguros y eficaces.

Por otro lado, también es conocido el caso en que se continúa con la lactancia durante el embarazo, aunque igual de conocidas son las presiones para abandonar la lactancia en ese período. En la actualidad, no hay evidencia concluyente de que los niveles de prolactina asociados a la lactancia puedan incrementar el riesgo de aborto espontáneo durante el embarazo temprano en casos no patológicos. Además debe considerarse que los niveles de prolactina descienden durante el estadio de lactogénesis II, por lo que su papel es menos importante durante la fase de calibración en las primeras 4-8 semanas postparto. La extracción de leche es el primer determinante de la producción de leche materna, de acuerdo con el mecanismo de secreción autócrina (ver capítulo 3). Por lo tanto, es muy poco

probable que los bajos niveles de prolactina en esta etapa representen un factor de riesgo para el aborto.

También se ha argumentado que la lactancia puede inducir un aborto debido a la liberación de oxitocina producida por el estímulo de succión. Se sabe que la oxitocina induce las contracciones de las células mioepiteliales para expulsar la leche y también desencadena contracciones uterinas. A su vez, se cree que las contracciones uterinas luego del parto reducen la pérdida de sangre materna. Sin embargo, la secreción de oxitocina en respuesta al estímulo de succión disminuye a lo largo del tiempo. Además, la sensibilidad del útero a la oxitocina alcanza un pico máximo en el trabajo de parto y está asociada a una retroalimentación positiva de los receptores de oxitocina y a un fuerte incremento en la densidad de los receptores miométriales de oxitocina. Luego del parto, la concentración de los receptores de oxitocina disminuye rápidamente y los receptores restantes parecen regularse por retroalimentación negativa, posiblemente para evitar respuestas contráctiles no deseadas durante la lactancia. En conclusión, no hay evidencia médica definitiva que indique que las mujeres en edad reproductiva, con buen estado nutricional y sin historial previo de abortos o partos pretérmino, puedan poner en peligro su embarazo si continúan amamantando. Por eso en general se promueve la lactancia durante los dos primeros trimestres, junto con una dieta adecuada, y también durante el tercer trimestre si no hay riesgo de parto prematuro.

2.6. Construcción de la identidad sexual

La identidad sexual es uno de los aspectos de la personalidad del ser humano que se construyen desde la infancia y que se comienzan a consolidar durante la adolescencia. Está conformada básicamente por los siguientes aspectos: el sexo biológico, la identidad de género, el rol de género y la identidad sexual. El **sexo biológico** está determinado por el componente biológico de las características que permiten distinguir a hombres y mujeres, por ejemplo: el sexo cromosómico, el sexo gonadal, los genitales, los componentes neuroendocrínicos y los componentes neuroendócrinos. Estas características son las que en principio permiten asignar el sexo de un bebé durante la gestación. La **identidad de género**, en cambio, es la convicción íntima y el sentimiento internalizado que una persona tiene respecto de sí mismo en torno a sentirse un hombre o una mujer. Por otro lado, el **rol de género** hace

referencia a la construcción socio-cultural de lo que es un hombre y una mujer, al comportamiento definido como masculino y femenino, que a su vez depende de un contexto temporal. Por último, la **orientación sexual** es la atracción que siente un individuo por otro de igual o distinto sexo, y a quien dirige sus intereses eróticos y afectivos. Mayoritariamente, las personas pertenecen a la orientación heterosexual y adoptan conductas masculinas o femeninas de acuerdo al sexo varón o mujer asignado al momento del nacimiento. Sin embargo, podemos distinguir también grupos sociales que se diferencian, a los que denominamos minorías sexuales y cuyos valores de vida, ya sea culturales, sexuales o políticos, se diferencian de los valores dominantes. Entre las minorías sexuales podemos distinguir minorías por orientación sexual o por identidad de género. La homosexualidad, en donde una persona se relaciona sexualmente con otra de su mismo sexo o la bisexualidad, cuando puede hacerlo con ambos sexos, son clasificaciones para las minorías sexuales por orientación sexual. El travestismo o la transexualidad son categorías para la identidad de género. Cabe diferenciar que el travestismo refiere a aquellas personas que adoptan una identidad de género distinta de su sexo sin modificar su genitalidad, mientras que la transexualidad alude a aquellos individuos que lo hacen mediante una intervención quirúrgica de cambio de sexo.

Muchas veces, la construcción de la identidad sexual es condicionada por el orden social dominante: el patriarcado. La homosexualidad, por ejemplo, ha sido asociada con los márgenes de la estructura sociocultural, es decir, a todo aquello unido a lo inmoral, patológico y desviado. Esta denostación es propia del modelo de familia patriarcal, cuyos orígenes pueden rastrearse hasta la antigua civilización romana. El sistema patriarcal se basa en la jerarquización de las personas en el seno familiar y la asignación de roles en función de esa jerarquización, donde la categoría de edad, pero sobre todo de género, son los elementos estructurantes. Es una construcción cultural que propone un modelo de hombre y de mujer según la organización social. El hombre es considerado un ser superior a la mujer en todos los aspectos, por lo tanto, cualquier actitud de un hombre que se considere como femenina es aún más denigrada, primero porque renuncia a su rol social y luego porque rebaja su categoría como miembro comunitario. El patriarcado se sostiene en una red de distintos ámbitos (cultural, simbólico, religioso y moral) que da sentido a esa organización y que condena cualquier desviación que pueda entenderse como un atentado al orden comunitario.

La sexualidad humana debe entenderse como la expresión de la identidad sexual, es el conjunto de relaciones que las personas establecen entre sí y con el mundo por el hecho de ser sexuados. A diferencia de otros seres vivos, la sexualidad implica otros procesos adicionales al de la reproducción, relacionados con la autoestima, el placer, la religión, las costumbres y el proyecto de vida.

2.6.1. Estereotipos de género

Los estereotipos son sistemas de creencias, juicios que se fundamentan en ideas preconcebidas, sobre los hombres y las mujeres. Se transmiten culturalmente de generación en generación y suelen proveer los modelos de comportamiento que la sociedad espera de cada sexo.

Usualmente los estereotipos asignan al hombre características como la agresividad, estabilidad emocional, autocontrol, dinamismo, dominancia, grandes cualidades y aptitudes intelectuales; se los considera poco afectivos, racionales, valientes, eficientes, competitivos, activos durante una relación sexual. Las mujeres, por otra parte, se espera que sean sumisas, inestables emocionalmente, muy afectuosas y tiernas, dependientes, amantes de los niños, sensibles, ingenuas y pasivas durante una relación sexual.

Estos estereotipos a su vez son incorporados por los niños y niñas, porque forman parte de las expectativas familiares y sociales a las que deberán ajustarse si quieren ser aceptados, es lo que se espera de ellos. Si bien los estereotipos dominantes varían de acuerdo al lugar y la época, todos tienen en común que se consideran como "la norma". Algunas frases comunes que evidencian a los estereotipos a los que estamos sometidos desde la infancia son del estilo: "los varones no lloran" o "sos una nena, no podés hacer eso". A partir de concepciones de este tipo se establece un trato diferente para cada sexo. Tradicionalmente a las niñas se les enseña a ser hacendosas y se les prepara para la crianza y el hogar; la maternidad se promueve como su realización absoluta en la vida y, por el otro lado, a los niños se les suele inducir a considerarse fuertes, a ser los futuros sostenedores económicos del hogar, los jefes de familia. En realidad estos estereotipos condicionan las oportunidades, los deberes y los derechos de cada individuo y lo que cada quien elige para su vida. No obstante, también es cierto que actualmente se percibe un cambio en los estereotipos sexuales.

Los estereotipos también se vinculan con el concepto que las personas se forman de sí mismas, dado que si el contexto social que rodea al individuo hace que de él se espere un determinado comportamiento; entonces mujeres y varones pueden hacerse una idea deformada de sí mismos, ya que se les limita su desarrollo. Los juicios que cada persona recibe de su familia y del entorno social influyen sobre la formación del autoconcepto. Por eso es necesario que cada individuo aprenda el valor del respeto y de la tolerancia, y que las personas valen por sus capacidades como individuos y no por pertenecer a uno u otro sexo.

2.6.2. La sexualidad en la infancia y la adolescencia

Si bien la sexualidad es un proceso continuo, que va evolucionando a través del desarrollo de cada persona, desde que es un recién nacido hasta comenzar su consolidación en la adolescencia, pueden distinguirse algunas etapas que nos permiten comprender, de manera flexible, las características y comportamientos saludables en cada una de ellas y que examinaremos con más detalle.

Período de lactancia: durante el comienzo de su vida, el ser humano se encuentra bajo una completa dependencia de sus cuidadores, de quienes requiere su completa atención para satisfacer necesidades básicas como la alimentación, la protección y el afecto. En este período, el recién nacido experimenta placer a través de la satisfacción de esas necesidades, lo que fortalece el desarrollo de un vínculo con su madre y sus cuidadores. La satisfacción inmediata de las necesidades del bebé disminuye su frustración, y así se produce en el niño el incremento del sentimiento de confianza y de seguridad que en primera instancia establece con su madre. La lactancia significa para el niño el aporte de alimento, aceptación, seguridad y cariño, a través del calor del pecho materno, las caricias de su madre, las sensaciones táctiles, la voz, la mirada y todo aquello que porte un significado para el lactante. La repetición de estas experiencias permiten al niño percibir que su madre está para reconfortarlo y generar un vínculo seguro con ella y con su entorno. Según Freud, desde el nacimiento hasta aproximadamente el año y medio de vida, el niño atraviesa por la "fase oral", que se caracteriza por mantener contacto con el mundo a través de la boca, identificando objetos y obteniendo placer. Sus manifestaciones típicas consisten en la succión del dedo pulgar, el chupeteo y el acto de morder.

Período preescolar: corresponde a los niños entre 1 y 5 años, aproximadamente. Esta edad se caracteriza por varios cambios a nivel biológico que hacen posible la marcha, el control de esfínteres y el desarrollo del lenguaje. Los niños con un adecuado sentimiento de confianza y apego son capaces de lograr una autonomía y emprender el proceso de individuación. Freud identificó en esta etapa la “fase anal”, debido a la importancia que conlleva el control de esfínteres y a la sensación de placer que puede experimentar el niño al retener, acumular y expulsar, lo que a su vez le da cierto control y poder para ejercer su voluntad y, por lo tanto, autoafirmarse. Tanto es así que el mecanismo de retención y expulsión de heces pueden tener un significado psicológico. En estas edades, el **juego** también emerge como una forma de ensayo de su rol futuro como adulto, imitando el comportamiento de ellos. Esto influye en la adecuación a los roles que va a tener en relación a su género. A su vez, en esta etapa de desarrollo aparece la **curiosidad** sobre lo sexual, suelen surgir los juegos como “la casita”, “la mamá y el papá” o “el doctor”, como una forma de exploración y conocimiento de sus cuerpos. El descubrimiento de los genitales suele ser motivo de generación de sensaciones placenteras que motivan a la autoestimulación o masturbación infantil (la denominada “fase fálica” de Freud). Es común que aparezcan preguntas como “¿de dónde vienen los bebés?” o “¿por qué soy distinta que mi hermanito?” También es frecuente que se presenten tendencias de carácter sexual hacia los progenitores, en el que surgen ciertos comentarios de las niñas hacia su padres (o viceversa) del estilo “me quiero casar con vos” o “quiero ser tu novio/a”. Ante esta situación es recomendable mantener el lugar de padres y no alimentar ese tipo de manifestaciones de amor. En esta etapa es importante la actitud que toman los progenitores frente a estas conductas, respondiendo con naturalidad, sin miedos ni vergüenza, sino con confianza, respeto, atención, y con un lenguaje adecuado para la comprensión del niño.

Período escolar: suele abarcar el desarrollo desde los 5 a los 10 años, aproximadamente. Es una etapa importante a nivel cognitivo porque comienza la formación y el aprendizaje formal en la escuela. Los niños adquieren un tipo de pensamiento que permite establecer relaciones de causalidad, pueden comprender explicaciones de índole más abstractas, generales y complejas, comienzan a formar su propio criterio acerca del mundo que los rodea. A esta altura ya existe la identificación con otros de su mismo sexo, y necesitan integrarse con grupos de iguales. Por eso es usual que los niños formen amistades con otros de su mismo sexo, y que existan separaciones entre niños y niñas que ayudan a reafirmar

su identidad sexual en términos de lo masculino y femenino. También pueden existir, por curiosidad, juegos de exploración con niños del mismo sexo o del sexo opuesto. En esta etapa se asimilan los estereotipos de género. Es común que los niños se enamoren de sus maestros, de algún ídolo juvenil o de un amigo, y que empiecen a hablar de niños y niñas que les gustan.

Adolescencia: según la Organización Mundial de la Salud, la adolescencia es una etapa que comienza alrededor de los 10 años de edad y dura hasta cerca de los 19 años. En esta etapa ocurren una serie de cambios hormonales que conllevan la aparición de los caracteres sexuales secundarios. Junto con estos cambios, nacen en el joven una nueva forma de pensar, de sentir y de comportarse en relación a sí mismo y al entorno que los rodea. El impulso sexual se manifiesta en la búsqueda y el encuentro con el otro. Los adolescentes suelen sentir preocupación por sus cambios corporales y por gustar y sentirse aceptados, por su apariencia y la relación con las personas del otro sexo. Pueden darse cuenta de que el cuerpo es una fuente de placer y de interacciones con el sexo opuesto. Es frecuente que aparezca la conducta de la masturbación, como una forma de conocer el propio cuerpo o de descargar tensiones. En el desarrollo normal del adolescente, este comportamiento evoluciona hacia una búsqueda para entablar relaciones con los demás, aumentando las actividades sociales que presentan oportunidades implícitas del conocimiento sexual a través de las amistades, las relaciones de pareja, las caricias íntimas o las relaciones sexuales, y ve disminuyendo así la actividad masturbatoria. Muchos de los pensamientos, sentimientos y deseos de los adolescentes están dirigidos hacia la sexualidad. Estos pueden estar acompañados de incertidumbre o ansiedad respecto de la orientación sexual, que en la mayoría de las veces es heterosexual. Pero en otros casos, cuando la orientación es homosexual o bisexual, puede desencadenar conflictos si no es validada y reconocida por la persona. Los jóvenes que presentan confusión acerca de su orientación sexual suelen enfrentar problemas con la comunicación a sus padres, dolor por no ser entendidos, y a eso se suma la falta de información confiable acerca de la homosexualidad. Por eso, la educación sexual debe centrarse en la información objetiva y en la conciencia de la responsabilidad que implican las consecuencias de los propios actos. En esta etapa también es importante desarrollar un sistema de valores humanos que estimulen la autoestima de los jóvenes y que los ayude a ser críticos de sus actos. La identidad sexual se establece al final de la adolescencia, y se van integrando así los impulsos sexuales a la personalidad, de acuer-

do con un contexto de normas, valores, éticas y objetivos que forman parte la vida de la persona.

Bibliografía

- Arrigui, A. A. 2014. La pérdida del estro. *Revista de la Asociación Médica Argentina*, 127 (3): 30-32.
- Bachtrog, D.; Mank, J.E.; Peichel, C.L.; Kirkpatrick, M.; Otto, S.P.; Ashman, T.; Hahn, M.W.; Kitano, J.; Mayrose, I.; Ming, R.; Perrin, N.; Ross, L.; Valenzuela, N.; Vamosi, J.C. 2014. Sex Determination: Why So Many Ways of Doing It? *PLOS Biology*, 12 (7): 1-13.
- Bardi, L.A.; Leyton, C.; Martínez, V. y Gonzáles, E. 2005. Identidad sexual: proceso de definición en la adolescencia. *Docencia*, N° 26.
- Brown, C.R. 1990. Some misconceptions in meiosis shown by students responding to an advanced level practical examination question in biology. *Journal of Biological Education*, 24 (3): 182-186.
- Caballero Armenta, M. 2008. Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Enseñanza de las Ciencias*, 26 (2): 227-244.
- Cetin, I.; Assandro, P.; Massari, M.; Sagone, A.; Gennaretti, R.; Donzelli, G.; Knowless, A.; Monasta, L. y Davanzo, R. Breastfeeding during Pregnancy: Position Paper of the Italian Society of Perinatal Medicine and the Task Force on Breastfeeding, Ministry of Health, Italy. 2014. *Journal of Human Lactation*, 30 (1): 20-27.
- Clutton-Brock, T. 2009. Sexual selection in females. *Animal Behaviour*, 77: 3-11.
- Darwin C. 1871. *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. London: John Murray.
- Durand, P. M., and R. E. Michod. 2010. Genomics in the light of evolutionary transitions. *Evolution* 64:1533–1540.
- Eppley, S. M. and L. K. Jesson. 2008. Moving to mate: the evolution of separate and combined sexes in multicellular organisms. *Journal of Evolutionary Biology* 21: 727-736.
- Fisher R. 1915. The evolution of sexual preference. *Eugen. Rev.* 7:184–92.
- Fisher, R. A., 1930 *The Genetical Theory of Natural Selection*. Clarendon Press, London. Press, [Variorum edition, Bennett, J. H. (Editor), 1999, Oxford University Press, Oxford].
- Fontaneto, D., M. Kaya, E. A. Herniou, and T. G. Barraclough. 2009. Extreme levels of hidden diversity in microscopic animals (Rotifera) revealed by DNA taxonomy. *Mol. Phylogenet. Evol.* 53:182–189.
- Fuller RC. 2009. A test of the critical assumption of the sensory bias model for the evolution of female mating preference using neural networks. *Evolution* 63:1697–711.
- Gorelick, R., Heng, H.H.Q. 2011. Sex reduces genetic variation: A multidisciplinary review. *Evolution* 65: 1088–1098.
- Hamoda, H.; Khalab, Y. y Carrol, P. 2012. Hyperprolactinaemia and female reproductive function: what does the evidence say? *The Obstetrician & Gynaecologist*, 14: 81-86.
- Krebs, J.R. y Davies, N.B. 1993. Chapter 8: Sexual Conflict and Sexual Selection. En: *An Introduction to Behavioural Ecology*. Third Edition, Blackwell Science Ltd., Oxford, pp 175-207.
- Kuijper, B.; I. Pen, F.J. Weissing. 2012. A guide to sexual selection theory. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 43: 287-311.
- Lehtonen, J.; Jennions, M.D. y Kokko, H. 2012. The many costs of sex. *Trends in Ecology and Evolution*, 27 (3): 172-178.

- Mark Welch, D. B., C. Ricci, and M. Meselson. 2009. Bdelloid rotifers: progress in understanding the success of an evolutionary scandal. Pp. 259–279 in I. Schön, K. Martens, and P. van Dijk, eds. *Lost sex: the evolutionary biology of parthenogenesis*. Springer, Heidelberg.
- Maynard Smith, J. 1978. *The evolution of sex*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Mittwoch, U. 2005. Sex Determination in Mythology and History. *Arq Bras Endocrinol Metab.*, 49 (1): 7-13.
- Parker, G. A., R. R. Baker, V. G. F. Smith. 1972. The origin and evolution of gamete dimorphism and the male-female phenomenon. *J. Theoret. Biol.* 36: 529–553.
- Peinado Rodriguez, M. 2009. En torno a la homosexualidad en educación para la ciudadanía. *Enseñanza de las ciencias sociales*, 8: 67-73.
- Radford, A. y Bird-Stewart, J.A. 1982. Teaching genetics in schools. *Journal of Biological Education*, 16 (3): 177-180.
- Randerson, J.P. y Hurst, L.D. 2001. The uncertain evolution of the sexes. *TRENDS in Ecology & Evolution*, 16 (10): 571-579.
- Saltzman, W.; Tardif, S.D. y Rutherford, J.N. 2011. Hormones and Reproductive Cycles in Primates. En: Norris, D.O. y López, K.H. (eds.) *Hormones and Reproduction of Vertebrates: Mammals*. Primera edición. Elsevier. pp 291-327.
- Sexualidad Infantil y Juvenil Nociones Introductorias para Maestras y Maestros de Educación Básica. SEP, 2000.
- Van der Wijden, C. y Manion C. 2015. Lactational amenorrhoea method for family planning (Review). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, Issue 10. Art. No.: CD001329. DOI: 10.1002/14651858.CD001329.pub2.
- Villada Salazar, C.P. 2011. Estrategias de aula para alcanzar aprendizajes significativos y desarrollar habilidades de pensamiento científico en relación con la meiosis. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Colombia, Bogotá. 119 pp.
- Weissing F.J., Edelaar P. & van Doorn G.S: (2011): Adaptive speciation theory: a conceptual review. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 65: 461-480.
- Zahavi A. 1975. Mate selection—a selection for a handicap. *J. Theor. Biol.* 53:205–14

Actividad para el aula

Sistema reproductor y sexualidad

La presente actividad es parte central del segundo año de la escuela secundaria, no solo por indicación del diseño curricular sino porque los estudiantes están en la edad en que estos temas son del mayor interés para su vida y su salud.

La docencia nos pone ante una responsabilidad de gran trascendencia: la formación de un ser social. Ante esa responsabilidad el docente debe ser capaz de responder de un modo integral, y eso lo obliga a tener una visión abarcativa de la importancia social de los conocimientos disciplinares. Esto, actualmente, gracias a la ley de Salud Reproductiva, es obligatorio a partir de los contenidos ESI (Educación Sexual Integral) que privilegian la trascendencia sociocultural de la reproducción, la anticoncepción, la diversidad y la igualdad de género, todo esto incorporado a la realidad cotidiana de los estudiantes.

Con la certeza de que no hay temas que no puedan ser tratados si se accede a ellos con suficiente rigor científico, respeto y espíritu democrático, la temática abordada pretende subsanar, aunque sea en parte, una grave deficiencia no solo del sector educativo sino en general de la sociedad toda.

“...es un error afirmar que el espacio de la escuela es un lugar sagrado donde solamente se estudia y estudiar no tiene nada que ver con lo que ocurre en el mundo de afuera...”

“...que no se diga que si soy profesor de biología no puedo alargarme en otras consideraciones, que debo enseñar sólo biología, como si el fenómeno vital pudiera comprenderse fuera de la trama histórico – social, cultural y política. Como si la vida, la pura vida, pudiera ser vivida igual en todas sus dimensiones en la favela (...) o en una zona feliz de los Jardines de São Paulo. Si soy profesor de biología debo, obviamente, enseñar biología, pero al hacerlo no puedo separarlo de esa trama.”
(FREIRE; 1993: 75 y 76).

Contenidos:

Etapas del proceso de fecundación y embarazo y su ubicación anatómico funcional.

- Minorías sexuales, datos de discriminación y derechos humanos. Causas y consecuencias del machismo y el patriarcado. Violencia de género, acoso y abuso, aborto. Implicancias sociales y legales.
- Ley provincial de procreación responsable. Asistencia social, legal, anticoncepción y prevención de enfermedades.

1ra clase:

Como introducción se utiliza un video (<https://www.youtube.com/watch?v=aH-QVEeJJUM>) que primero se corre completo, aunque luego se retomará para verlo en etapas. A la vez se distribuyen fotocopias con esquemas del sistema reproductor masculino y femenino, y el gráfico del ciclo del endometrio vinculado al ciclo ovárico (sin incluir en esta instancia el ciclo hormonal), para que se puedan hacer anotaciones sobre el mismo.

Luego de ver el video completo se abre el diálogo y las preguntas sobre su contenido, volviendo a correr el video, esta vez deteniéndolo para explicar cada momento, relacionándolo además con una lámina o dibujo en el pizarrón, y los esquemas en los que los estudiantes anotarán los nombres, etapas, órganos y eventos.

Se anotarán aparte las diversas preguntas que vayan surgiendo, atendiendo en particular a las expresadas en forma de comentarios chistosos, que suelen ocultar preguntas que no se animan a hacer o repiten mitos erróneos; es importante también rescatar las palabras vulgares y soeces utilizadas por ellos/as. Éstas dudas y comentarios serán respondidos uno por uno luego de la explicación general, y como cierre de la clase.

Como tarea: Si es posible, sería interesante que el video sea grabado en las netbooks de los estudiantes, pidiéndoles que lo vuelvan a ver con sus padres o grupo familiar, para que luego, en conjunto elaboren tres preguntas. De no ser posible, que estas preguntas se elaboren como tarea, recomendándose hacerlo con la ayuda familiar.

2da clase:

El docente consulta a los estudiantes cómo les fue con su grupo familiar, si a ellos les gustó el video y que expresiones recuerdan desde lo anecdótico. Esto sirve para rastrear el tipo

de diálogo y de conocimientos que manejan en el grupo familiar de modo de enfocar los aspectos de mayor interés para su formación. Luego se pide que en grupos de a cuatro comparen las preguntas que trajeron de la casa, y se quiten las coincidentes y las que ellos mismos pueden responder, debiendo quedar no más que cinco preguntas por grupo en una hoja. Cada hoja será entregada a otro grupo que deberá responderlas en otra hoja, con lo dicho hasta el momento y de no ser posible, mediante consultas al docente quien las explicará para toda la clase; al final de la misma el docente deberá tener dos hojas de cada grupo, una con preguntas propias y otra con respuestas a las de otro grupo.

3ra clase:

De las preguntas y respuestas se elabora una clase que permita dar cuenta de los errores y dudas más frecuentes. Con base en los esquemas repartidos en la clase 1, se explica el inicio de la producción de gametas y de la secreción de las hormonas sexuales, que inducen los caracteres sexuales externos. Se marca en los esquemas estos conceptos, con las llamadas y anotaciones necesarias, se recuerda el rol del endometrio y se introduce al ciclo menstrual.

El tema se dirige hacia el origen del deseo sexual, es decir la pubertad y la maduración sexual. Es importante aprovechar este momento para distinguir entre el **sexo**, como la presencia de unas u otras glándulas sexuales, y la **sexualidad** como construcción sociocultural de la personalidad, que incluye la identidad de género, la propia percepción corporal, gustos y deseos. Este momento, si bien contiene información que debe quedar por escrito durante la puesta en común final, el tema debe desarrollarse desde el debate abierto, coordinado por el docente.

4ta clase:

Se recuerdan los debates de la clase anterior, se lee la puesta en común, se expresan nuevos debates, y se hace hincapié en los prejuicios sociales y la discriminación, rescatando el respeto y la importancia de la diversidad, la necesidad de la integración y la no discriminación, y la violencia social que genera la intolerancia y el machismo.

Luego se reparte el texto que se expone a continuación, indicando que cada uno haga una lectura atenta para luego responder las preguntas que serán entregadas al docente, luego de un momento de debate y puesta en común. El texto propuesto para esta actividad,

“otro problema para Johana” (que el docente tiene la libertad de modificar a su criterio), claramente no es un material académico; el uso de lenguaje coloquial tiene la intención de que el estudiante ubique la situación planteada en la realidad de su vida cotidiana para que no resulte una mera ficción.

Otro problema para Johana

Ya iban para cuatro meses que Johana estaba saliendo con Franco y hasta ahora todo iba bien, ella piensa que es un buen pibe, y dice que “es re-lindo aunque un poco sarpado; ya el segundo día que salieron se quiso pasar con las manos”, pero ella supo poner los límites. Él la quiere y por eso aprendió a respetarla. Franco trabaja en la carpintería con su padre y siempre tiene ese olor tan lindo a madera que él dice que es por la resina del pino.

Johana es alegre, un poco callada y todos dicen que es muy inteligente; en la escuela le va más o menos porque tiene que faltar cada vez que se enferma alguno de sus hermanos. Pero le gusta aprender, y le gusta ver que puede entender a los profes; ha pensado en estudiar enfermería cuando termine el secundario.

El padre se fue de la casa hace dos años, y tiene que ayudar a cuidar a sus tres hermanos porque su mamá trabaja en el supermercado desde temprano. Los levanta, les da el desayuno y se van todos juntos a la escuela. Marcos, su hermano mayor, vive con la abuela en Santa Clara, él dejó la escuela para trabajar en un taller.

Pero Johana quiere estudiar, y siempre piensa en lo que le dice su madre:

“Nena, yo tuve al Marcos a los 14 años, y desde entonces no pude hacer otra cosa que laburar como desgraciada, y no tuve una vida; vos tenés que hacerte una vida, tenés que estudiar, sos inteligente y yo te voy a ayudar”.

Pero las cosas no son tan fáciles: Franco le viene pidiendo, más bien exigiendo, que quiere tener relaciones y ya no sabe cómo zafar. Él la presiona y dice que no aguanta más, que es lo natural y que no tiene nada de malo; que se siente un estúpido porque todos sus amigos hacen el amor con sus novias en cambio a él le quedan los huevos doloridos de besarla, y que si ella seguía rechazándolo la relación se iba a terminar.

Ella no lo quiere perder, pero es difícil tomar una decisión y piensa mil cosas:

¿Qué hago?, ¿será doloroso?, ¿y si pasa algo, si quedo embarazada?, ¿podré hacerlo bien?, ¿y si Franco se decepciona?, ¿y si me pide cosas que no me gustan? ¿Se enojará?, ¿y si se pone violento?

Las peleas entre su padre y su madre le dejaron muy malos recuerdos de violencia e insultos que no quiere volver a vivir nunca más.

...¿Qué hago si quedo embarazada? Esa sí sería una gran macana, y además sería una gran decepción para su madre.

Justo en la clase de biología el profe había hablado de los forros, de las pastillas, pero hablarlo con Franco sería más difícil... y le da mucha vergüenza, para colmo él nunca toca ese tema; y preguntarle a la madre sería imposible, ni pensarlo. No es fácil: "¿y si le pregunto al farmacéutico qué puedo usar para no quedar embarazada, o a la doctora de la salita?" No, tampoco, todo el mundo se va a enterar, son re-chusmas en el barrio.

Se angustia porque no encuentra salida, no tiene con quién consultar, y se la tendrá que jugar; la Mariana, que atiende la lencería, dijo que la primera vez que tenés relaciones es muy raro quedar embarazada. Y si todo sale bien después será más fácil hablarlo al Franco. Franco, sale temprano de la carpintería y se va a cambiar: siente que esta noche Johana va a aflojar, por eso esta vez aceptó ir a su casa; él se ha portado bien, desde hace cuatro meses que salen, la trata bien y no se sarpa; piensa que ya tiene que aflojar, son novios y nada malo hay con tener relaciones, después de todo es un hombre y tiene necesidades; además sus amigos ya lo han hecho, y no puede seguir así quedando como un pajero. Él la quiere a la Johana y sabe que ella también.

Pero él no piensa en el embarazo, o en realidad no quiere pensar. No puede tener tanta mala suerte, ¿no? Entonces ¡Que sea lo que Dios quiera! Sergio, compañero de la carpintería, es más grande y "la tiene clara", opina que el forro es re-incómodo, que es un asco y que encima puede estar pinchado, no sirve, "mucho más piola es hacerlo sin forro, la mujer es la que se tiene que preocupar por cuidarse".

Aprovechó que su padre viajó y se quedó solo, y Johana le dijo a la madre que se quedaba en lo de Mariana. Él puso reguetón en el equipo de música, ella cocinó unas hamburguesas, y alumbrados por la luz del televisor se besaron y se amaron.

Tres semanas más tarde, Johana, muy nerviosa, trataba de decidir qué hacer. La menstruación ya tendría que haberle bajado hace siete días. La única que le queda es ver si la encuentra a la doctora de la salita que siempre la ve en la parada del cole.

Al otro día Franco la encontró llorando en la esquina de la escuela. La doctora le dijo que fuera el fin de semana que le iba a hacer un test de embarazo, ¿me acompañas? le susurró ella.

Él no supo qué responder, hubiera querido consolarla pero estaba en blanco, lanzó una pueteada y salió corriendo. Ella quedó llorando con mucha tristeza. “No me puede pasar esto, no puedo darle semejante disgusto a mi mamá”; ya tiene tres hermanos que cuidar y lo que gana la madre apenas les alcanza para comer, además no podrá terminar el tercer año. Todo se va al diablo...

Franco piensa en qué decir: “podría dejar el cole y trabajar todo el día, total el estudio no es para mi, te puedo ayudar...”. Pero sabe que si deja la escuela el viejo lo mata. Igual lo va a matar cuando le diga que la embarazó a la Johana!

No pudo decir nada, no pudo pensar nada. La idea de que podía ser padre, que podía tener un hijo, le dio mucho miedo; si lo único que sabía hacer era jugar al fútbol...

A partir del texto, responda:

- Describa los mitos y errores conceptuales que tienen Johana y Franco respecto del embarazo y la anticoncepción.
- Describa de qué modo los amigos y parientes inducen algunos de estos errores.
- ¿A qué se deben los problemas que encuentran Johana y Franco para dialogar y consultar sus dudas?
- Reescriba el relato desde el (*) de modo que Johana no quede embarazada.

SECCION 2:

Percibir, entender, responder y transformar

Los temas que se revisarán en esta sección forman parte de los contenidos que se desarrollan en el 3er. año de la escuela secundaria, que hace el foco en la relación de los seres vivos con el entorno. Con el objeto de evitar particiones o divisiones innecesarias en la línea conceptual, entendemos que la información que rodea a los seres vivos sigue un circuito general que comienza con los estímulos ambientales y culmina con la respuesta, ejecutada luego de una elaboración minuciosa pero integral de todos los cambios del entorno que han impactado en el individuo. Los procesos que se encuentran implicados pueden ser simples o complejos e involucrar diferentes niveles de organización de la materia, desde los fenómenos que se observan a nivel molecular o celular hasta los sistémicos en donde todos los sistemas que comprende el individuo están actuando integradamente para lograr la respuesta. Incluso en el caso del ser humano, considerado como un ser biopsicosocial, la respuesta conductual comprende los tres componentes de la experiencia humana articulados entre sí de modo interdependiente e indivisible, y además individual e irrepetible.

Ante el conocimiento particionado, consideramos alternativamente el circuito de la información estímulo-respuesta como completo, complejo, integrador y relacional.

Como una de las formas en que se ejecutan las respuestas, analizaremos la relación material genético-proteína, en donde la información se transforma en moléculas ejecutoras, tanto en sistemas biológicos naturales como en los organismos que responden más allá de sus posibilidades naturales por la modificación de su genoma gracias a la intervención biotecnológica.

He aquí los dos capítulos de esta sección.

Capítulo 3:

Información, integración y respuesta

Para todos los otros seres vivos, es de fundamental importancia tanto para la supervivencia del individuo como la de la especie, conocer las condiciones del ambiente en el que viven para poder responder a ellas en la forma más apropiada. Casi todas las acciones que un ser vivo realiza dependen de la recepción y la interpretación de la información que procede del ambiente. Las respuestas serán las apropiadas para permitir o favorecer su adaptación si los datos que obtiene del ambiente son los necesarios y suficientes según las particularidades de cada especie.

La capacidad de los organismos para recibir e interpretar información del entorno, generando respuestas apropiadas, depende de que todas las células de cada individuo interactúen coordinadamente. Tanto para cada una de las que constituyen un organismo pluricelular como para individuos unicelulares, esa interacción entre las células depende de los **mecanismos de comunicación intercelulares**. Tanto para los organismos unicelulares como para los pluricelulares, la recepción de un estímulo, su transducción, la integración y la posterior respuesta, son etapas que deben cumplirse a través de mecanismos más o menos complejos.

En este apartado del capítulo vamos a desmenuzar estos mecanismos, reconociendo a partir de su estudio la participación fundamental que tienen en el procesamiento de la información y la generación de respuestas.

3.1 Mecanismos moleculares de comunicación intercelular

En microorganismos eucariotas como levaduras, hongos filamentosos y protozoos las moléculas que regulan los mecanismos de interacción para el apareamiento sexual o la diferenciación celular ante determinadas condiciones del ambiente son las **feromonas**.

El éxito evolutivo de los organismos pluricelulares se debe a que existen en todos ellos mecanismos de comunicación que involucran moléculas de señalización, los cuales regulan infinidad de procesos: vías metabólicas, crecimiento y diferenciación de tejidos, síntesis y secreción de proteínas, composición de los líquidos intra y extracelulares.

La comunicación intercelular se establece entre una célula de señalización que sintetiza y libera (con algunas excepciones) moléculas de señalización, las que producen una respuesta en la célula blanco o diana que es aquella que posee receptores para la molécula de señalización.

Cuando una molécula de señalización interactúa con su receptor ocasiona un cambio conformacional en el receptor o en alguno de sus dominios, que desencadena una serie de eventos intracelulares en cascada, denominados conjuntamente como **transducción de señales o vía de señalización intracelular**.

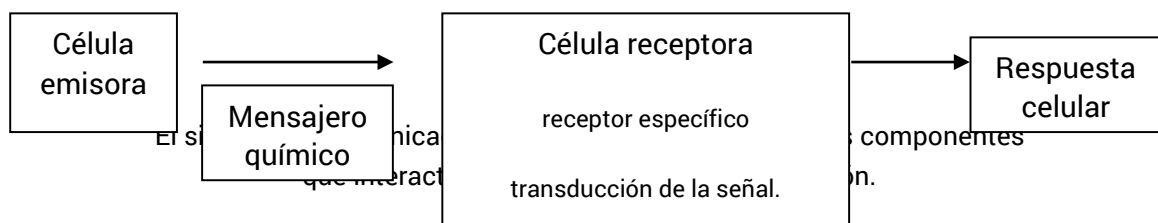
Hay una gran cantidad de mensajeros químicos que actúan como moléculas de señalización, pero una cantidad pequeña de mecanismos de transducción de esas señales. Estos mecanismos son amplificadores de la señal por la cual ante la interacción de una sola molécula de señalización con su receptor específico, se activan muchas moléculas mensajeras intracelulares que a su vez actúan sobre muchas proteínas celulares, por lo cual cuantos más pasos tenga una vía de transducción de señales más posibilidades de amplificación se presentan.

Uno de los mecanismos más comunes que organiza la respuesta celular ante estos eventos es la fosforilación y defosforilación de proteínas, en los residuos serina, treonina o tirosina, a cargo de proteinquinasas o fosfatasas, que actúan en forma coordinada a modo de interruptor o switch. Este mecanismo cambia la carga de la proteína por lo cual su conformación puede cambiar, lo que la afectará activándola o desactivándola. Todas las clases de proteínas, incluyendo proteínas estructurales, enzimas, canales o transportadores de membrana están reguladas por este tipo de interruptor. Las quinasas (fosforilan) y fosfatasas (defosforilan) pueden actuar sobre proteínas específicas o diversas, en este último ca-

so, el mecanismo se vuelve importante para poder coordinar e integrar diferentes vías metabólicas.

Por lo tanto, el esquema general de la comunicación intercelular abarca la síntesis y la liberación de la molécula de señalización, el transporte hacia las células blanco, la interacción con los receptores específicos en las células diana para su activación, el inicio de una o más vías de transducción de la señal, que conducen a cambios en el funcionamiento, metabolismo o el desarrollo celular, y la eliminación de la señal, que a menudo pone fin a la respuesta.

Dentro de este esquema general, lo más importante es comprender que existe una enormidad de mensajeros químicos diferentes, que cada uno actúa a través de un receptor específico, por lo cual también hay una gran cantidad de éstos. Sin embargo los mecanismos intracelulares de transducción de la señal son relativamente pocos, aunque con posibilidades de amplificación y control en sucesivos pasos que son regulables. Esto finalmente conduce a múltiples posibilidades de efectos o acciones celulares que son respuestas a los mensajeros químicos recibidos, finamente regulados.



Veamos ahora algunas características que pueden presentar cada uno de los elementos que se integran en los mecanismos de comunicación intercelular. En general, el análisis minucioso de estos mecanismos resulta tedioso, y difícil de seguir, por lo que sugerimos apoyarse fuertemente en las figuras y esquemas que acompañan el texto, para poder comprender las secuencias de eventos y sus interrelaciones.

Dependiendo de la distancia que media entre las células emisoras y las células receptoras, podemos clasificar a la comunicación intercelular en distintos tipos.

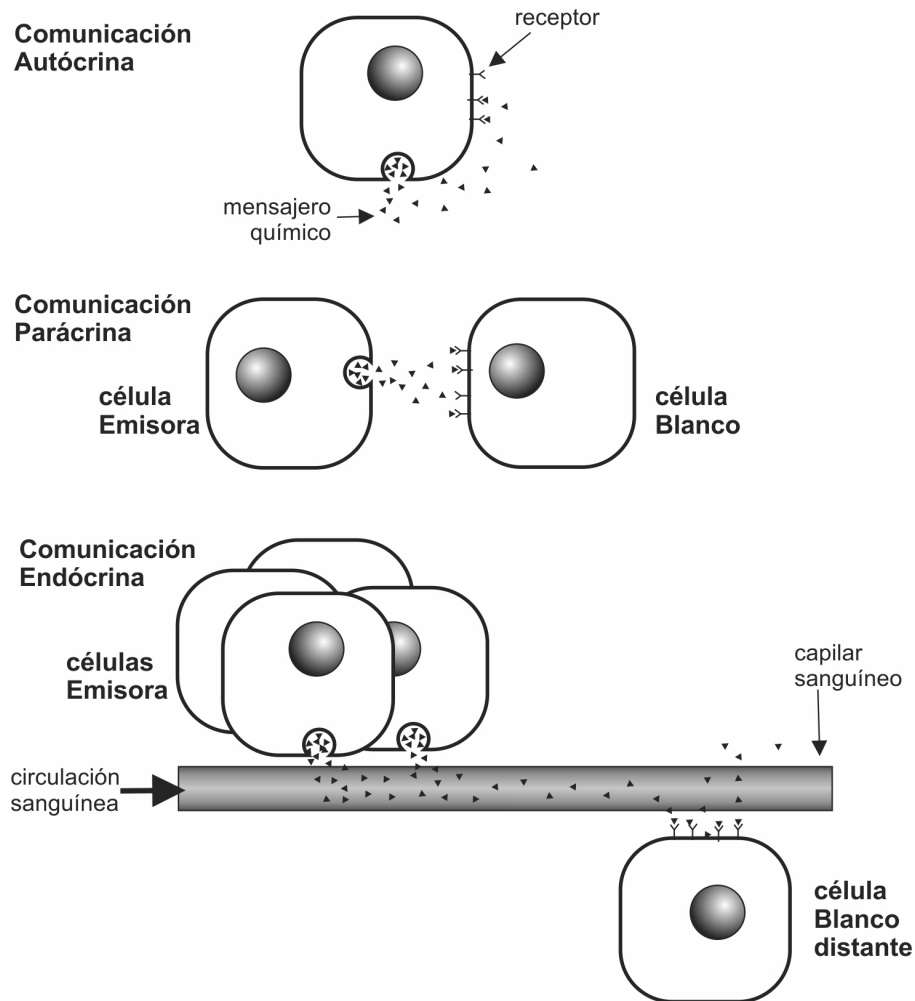
Cuando una molécula de señalización actúa a corta distancia, porque la célula blanco se encuentra próxima a la célula emisora, la comunicación es de tipo **parácrina**. El ejemplo típico de la comunicación parácrina es la comunicación sináptica entre neuronas a través de los neurotransmisores. Señales moleculares muy importantes para el desarrollo de los organismos multicelulares difunden a partir de la célula emisora hacia sitios alejados de ésta, creando un gradiente de concentración que induce diferentes respuestas en las células blanco de acuerdo a ese gradiente. Por ejemplo, muchos factores de crecimiento también actúan de modo parácrino.

Cuando el mensajero químico afecta a la misma célula que lo emitió, la comunicación es **autócrina**. Algunos factores de crecimiento, en especial los tumorales, actúan induciendo el propio crecimiento de la célula que los produce, ocasionando el desarrollo de grandes masas de células neoplásicas.

Las moléculas mensajeras que participan de la comunicación parácrina y autócrina son denominados **mensajeros locales** y son de acción corta y rápida.

La comunicación **endócrina** sucede cuando los mensajes químicos emitidos por una célula son volcados a la sangre o a otros líquidos extracelulares para actuar potencialmente sobre todas las células del organismo. A estas señales endócrinas se las llama **hormonas**, y están producidas por células o glándulas especializadas, de tipo **endócrinas**.

Dependiendo de su naturaleza química, las hormonas circulan por la sangre en forma libre, si son hidrosolubles, o bien lo hacen unidas a proteínas transportadoras. Por lo general, las hormonas actúan en forma más lenta que los mensajeros locales, pero persisten en el tiempo, actuando hasta que pierden actividad en las células blanco, o son inactivadas en el hígado y eliminadas en la orina.

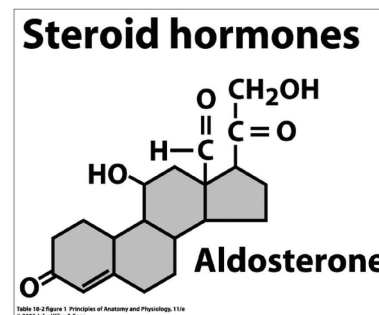
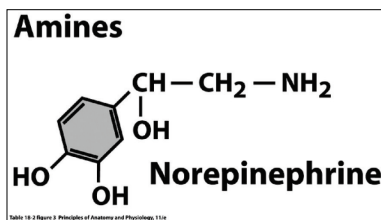
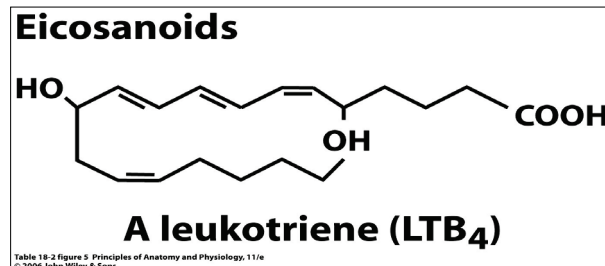
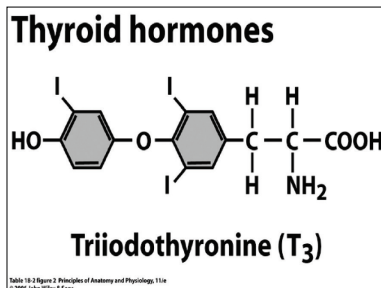


Diferentes tipos de comunicación intercelular.

Adicionalmente, proteínas unidas a la membrana pueden actuar como señales, interactuando con receptores de células diana adyacentes o escindiendo una porción que actúa como molécula de señalización exoplasmática soluble. Por ejemplo, el factor de crecimiento epidérmico (EGF), molécula de señalización con potente actividad mitótica, importante tanto en la cicatrización de heridas como en procesos de transformación tumoral, es una proteína integral de membrana. Puede fijarse a una célula adyacente y actuar como señal por contacto directo, o bien ser seccionado por acción de una proteasa extracelular que libera una porción soluble del EGF con capacidad de actuar como señal parácrina o autócrina.

Dependiendo de su composición química, los mensajeros químicos se pueden clasificar en **liposolubles** o **hidrosolubles**.

- Son liposolubles, y por lo tanto atraviesan libremente la membrana celular, los mensajeros **esteroides**, que derivan del colesterol, y difieren entre sí por distintas modificaciones químicas de este lípido, las hormonas **tiroideas** derivados del aminoácido tirosina yodado, y el **óxido nítrico**⁵, un gas de acción local.
- Son hidrosolubles, por lo que no atraviesan la membrana celular, las **aminas biógenas**, como las catecolaminas (adrenalina, noradrenalina y dopamina) que se sintetizan a partir de la tirosina, la histamina que es una modificación del aminoácido histidina y la serotonina y la melatonina, derivados del triptófano, los **péptidos y proteínas** y los **eicosanoides** (prostaglandinas⁶ y leucotrienos), derivados del ácido araquidónico, que pueden actuar en forma local o endócrina.



Los distintos tipos de moléculas de señalización se pueden diferenciar por su estructura química, pudiendo comportarse como liposolubles o hidrosolubles.

⁵ El sildenafil, conocido farmacológicamente como Viagra, incrementa los niveles de óxido nítrico, que actúa como mensajero en la vasodilatación de las arterias que conducen sangre a los cuerpos cavernosos y esponjoso del pene.

⁶ Las prostaglandinas son moléculas señal importantes en la sensación del dolor, por eso muchos analgésicos son inhibidores de su síntesis.

La acción de una señal química comienza con la unión a su receptor, molécula que debe poseer dos características fundamentales:

- **Especificidad:** la molécula señal y el receptor interactúan específicamente formando un complejo mensajero-receptor, como si fueran una llave y una cerradura.
- **Eficacia:** la formación del complejo mensajero-receptor es el desencadenante de una serie de eventos que ocurren dentro de la célula y que conducen a la respuesta.

Por lo general, una célula blanco posee de 2.000 a 10.000 receptores para una señal química determinada, y una misma célula puede ser blanco para muchísimas señales diferentes. El número de receptores para una molécula de señalización en una célula no permanece inalterado, sino que varía en el tiempo, dependiendo de diversos factores, uno de los cuales es la concentración del mensajero químico que se encuentren en las cercanías de las células blanco y la unión a sus receptores.

Por ejemplo, cuando aumenta la cantidad de mensajeros químicos que se unen a sus receptores en una célula, es frecuente que el número de receptores disponibles disminuya. Esto puede suceder a través de tres mecanismos: por inactivación de algunos receptores, por la internalización o secuestro de receptores hacia lugares donde no están accesibles al mensajero químico, o por la destrucción de los receptores. En todos los casos, el resultado es la disminución de la respuesta a las células blanco al mensajero químico. Este fenómeno recibe el nombre de **down-regulation** o **regulación en baja**.

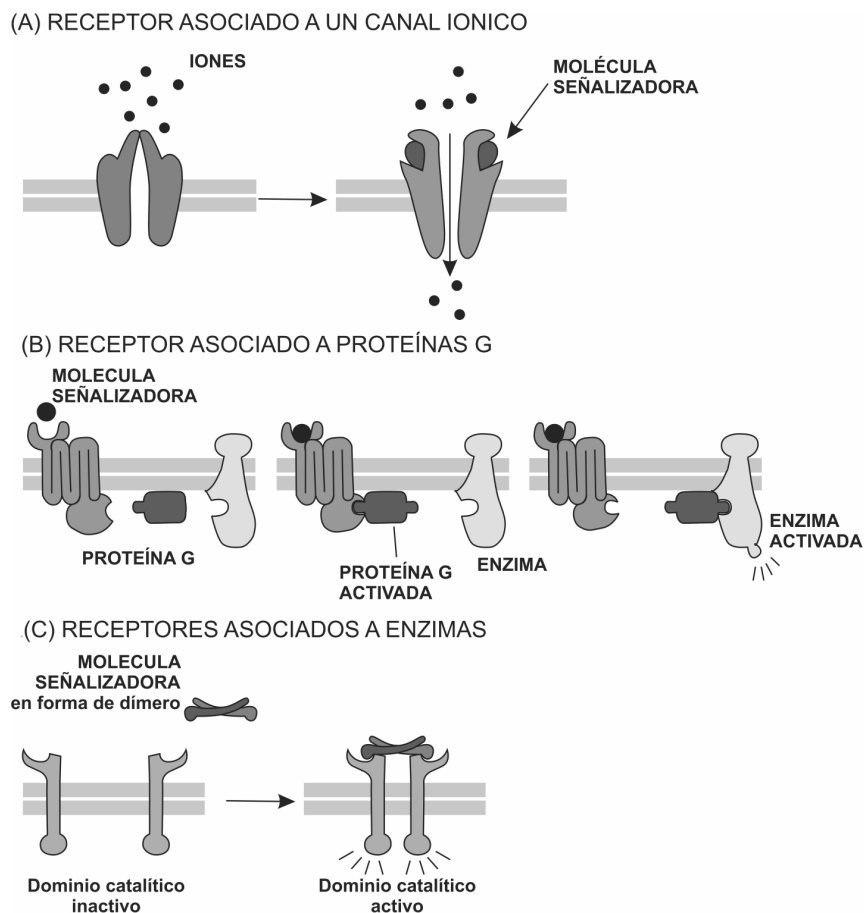
También es posible que suceda el fenómeno contrario: el mensajero químico estimula la formación de nuevas moléculas de su receptor o bien aumenta la disponibilidad de los ya existentes para la interacción con el mensajero. Cuando esto sucede, aumenta la sensibilidad de la célula blanco al mensaje que recibe, fenómeno conocido como **up-regulation** o **regulación en alta**.

Dependiendo de la naturaleza química del mensaje y por lo tanto, de la capacidad de atravesar la membrana celular, los receptores se pueden clasificar según el sitio de la célula donde se encuentren ubicados:

- **Receptores de membrana:** ubicados en la membrana celular o sobre la superficie externa de ésta, son receptores característicos de mensajeros peptídicos, proteicos, de las aminas biógenas y de los eicosanoides.
- **Receptores intracelulares citoplasmáticos o nucleares:** Son los receptores característicos de los mensajeros esteroides y las hormonas tiroideas. Suelen encontrarse ubicados en el núcleo o bien en el citoplasma celular, aunque estos últimos luego de interactuar con el mensajero químico se dirigen hacia el núcleo para actuar allí.

Dentro de los receptores de membrana, se reconocen tres tipos con actividad reversible: receptores canal, asociados a proteína G y enzimáticos.

Imagen: esquemas con rótulos manejados en el texto



Hay distintos tipos de receptores de membrana, receptores canal, unidos a proteína G y enzimáticos.

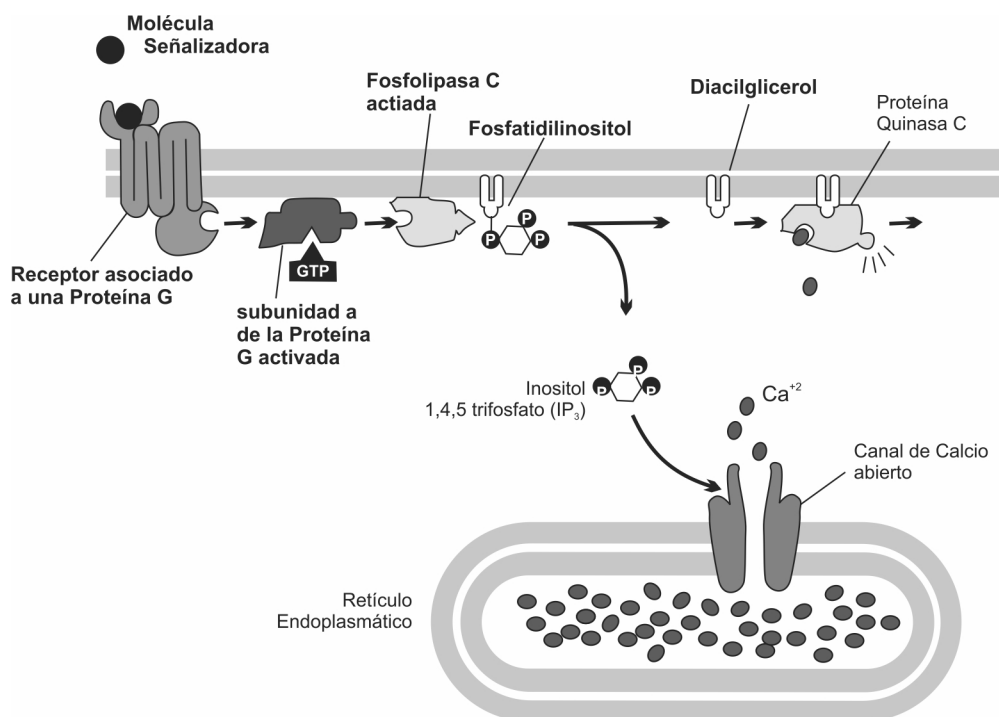
Veamos sus características y diferencias:

- **Receptores canal:** son receptores que tienen la forma de un canal que atraviesa la membrana, y por el que pueden pasar uno o varios iones. Al interactuar con el mensajero químico, los receptores canal se abren o cierran, permitiendo o impidiendo el pasaje de iones, y en consecuencia, cambiando las características eléctricas de la membrana de las células blanco. También es un ejemplo de receptores canal el del calcio, que actúa como segundo mensajero al ingresar a la célula y unirse a la proteína calmodulina, lo que provoca un cambio de forma de ésta. La calmodulina activa o inhibe a proteínas quinasas, que a su vez tienen como función la modificación de la acción de otras proteínas mediante el agregado de grupos fosfato.
- **Receptores unidos a proteína G:** estos receptores son proteínas integrales de membrana, que poseen una parte externa que interactúa con su mensajero, y una parte interna que se asocia a otra proteína que se encuentra en la cara intracelular de la membrana, denominada proteína G. La activación de esta proteína sucede al interactuar el mensajero con la porción extracelular del receptor, y su acción, a su vez, es abrir o cerrar canales de la membrana o bien, modificar la actividad de enzimas citoplasmáticas. Cuando los receptores acoplados a proteínas G regulan canales iónicos, pueden hacerlo de forma directa, o bien a través de la actividad de segundos mensajeros como el GTPcíclico (GTPc).

Cuando activan enzimas, en la mayoría de los casos, actúan sobre la Adenilato ciclasa (AC), que ocasiona el aumento del AMPcíclico (AMPc). Cuando el AMPc se une a las subunidades regulatorias de la enzima tetramérica Proteinquinasa A (PKA), activa su función quinasa, por lo cual diferentes tipos de sustrato se fosforilan.

Otro tipo de proteínas G tiene por efectora a la enzima fosfolipasa C (PLC). Esta enzima desdobra un fosfolípido de la membrana, el fosfatidilinositol, en diacilglicerol (DAG) e inositoltrifosfato (IP3), que es un segundo mensajero que difunde al retículo endoplasmático y a las mitocondrias, donde activa un canal de Ca^{2+} , inundando el

citoplasma de este ión que estaba almacenado en estas organelas. El Ca^{2+} promueve acciones celulares, como la contracción muscular o la secreción de sustancias. El DAG, por su parte, también es un segundo mensajero que modifica la actividad de la proteínquinasa C (PKC). Esta enzima inactiva es citosólica. Un aumento del Ca^{2+} citosólico hace que se fije a la membrana (del lado citosólico, claro) en donde queda accesible a una interacción con el DAG. Por lo tanto, la activación de la PKC depende tanto del aumento de DAG como de los iones Ca^{2+} , que a su vez dependen del IP3. La PKC activada induce diferentes respuestas en distintos tipos celulares.



El inositol trifosfato y el diacilglicerol son segundos mensajeros.

- **Receptores enzimáticos:** algunos receptores son proteínas integrales de membrana que tienen en sí mismos actividad enzimática o bien están unidos a otras enzimas. El extremo exterior recibe al mensajero, mientras que el interior es el que ejerce la acción enzimática, o bien activa a una enzima asociada que es la que actúa. Algunos receptores enzimáticos de tipo tirosinquinasa (RTK) se dimerizan: el mensajero promueve la unión de dos recepto-

res adyacentes, que se modifican recíprocamente entre sí, agregando fosfatos a los aminoácidos tirosina. Los receptores activados modifican a otras proteínas citoplasmáticas. La vía más usual es la de la activación de las proteínas Ras-MAPquinasa. La proteína Ras es molecularmente y funcionalmente muy parecida a la proteína G, y cuando es activada estimula una cascada de tres proteínas quinasas que actúan en forma secuencial culminando en la activación de una quinasa serina/treonina denominada MAPquinasa. Luego de trasladarse al núcleo, esta quinasa fosforila diversas proteínas, muchas de las cuales son factores de transcripción que regulan la expresión de proteínas vinculadas a la diferenciación y el control del ciclo celular o ejercen acciones metabólicas específicas. Otros receptores enzimáticos no tienen actividad enzimática por sí mismos, sino que se asocian a proteínas que poseen actividad de tirosinquinasa, como los de la familia JAK. Cuando se estimulan, agregan grupos fosfatos a los residuos de tirosina en el dominio citosólico del receptor, lo que les permite fijar factores de transcripción denominados STAT. Cuando un STAT se une al receptor es fosforilada por la JAK quinasa asociada. Así, la STAT fosforilada se disocia del receptor y forma un dímero con otra STAT fosforilada, que se dirige al núcleo donde se fija a secuencias que controlan la expresión de genes.

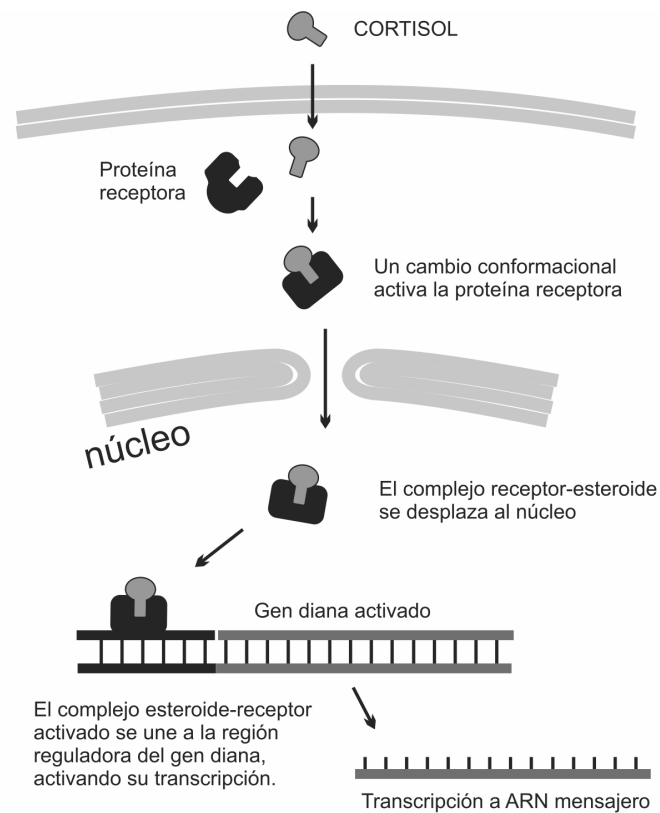
La mayoría de los efectos de la activación de los receptores de membrana es la de modular la actividad de enzimas o proteínas preexistentes, lo que da por resultado algún cambio en la función de la célula blanco, en general en tiempos cortos. Sin embargo, también pueden tener efectos a mayor plazo, por la activación o represión de la transcripción de genes, que resulta en la modificación de la expresión de proteínas. Por ejemplo, si el aumento de AMPc estimula la PKA y ésta se trasloca al núcleo, fosforila una proteína denominada de unión CRE (CREB), que no es otra cosa que un factor de transcripción, capaz de unirse a

una secuencia de ADN denominada CRE (elemento de respuesta AMPc) estimulando la transcripción de los genes a los que está asociado.

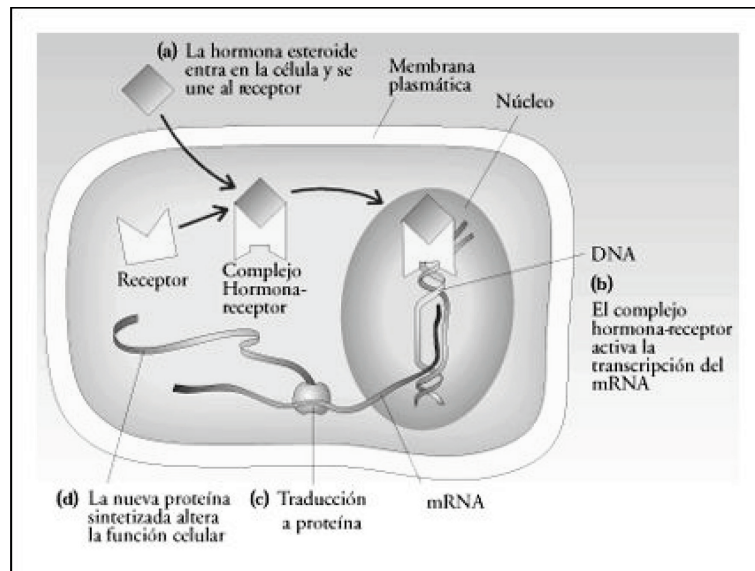
Este efecto de modificar la expresión génica es usual para los mensajeros químicos que pueden atravesar la membrana plasmática y se unen a receptores dentro de la célula, ya sea en el núcleo o en el citoplasma. Usualmente, los receptores intracitoplasmáticos se encuentran en forma inactiva, unidos a proteínas inhibidoras de su acción. La llegada del mensajero induce un cambio de forma en el receptor, su separación de la proteína inhibidora y su traslocación hacia el núcleo, o si ya está allí, la puesta en marcha de los mecanismos de transducción de señal. Muchas veces esta modificación de la transcripción de genes sucede en dos pasos, un paso inicial donde es modificada la transcripción de determinados genes, que son traducidos en proteínas que a su vez vuelven a interactuar con otros genes en el ADN en un segundo paso de modificación de la transcripción génica.

Como ya lo habrán supuesto, no todo está tan diferenciado ya que hay algunos mensajeros liposolubles que también tienen receptores en la membrana, que al activarse promueven los efectos citoplasmáticos de estos mensajeros, mucho más veloces que los efectos nucleares.

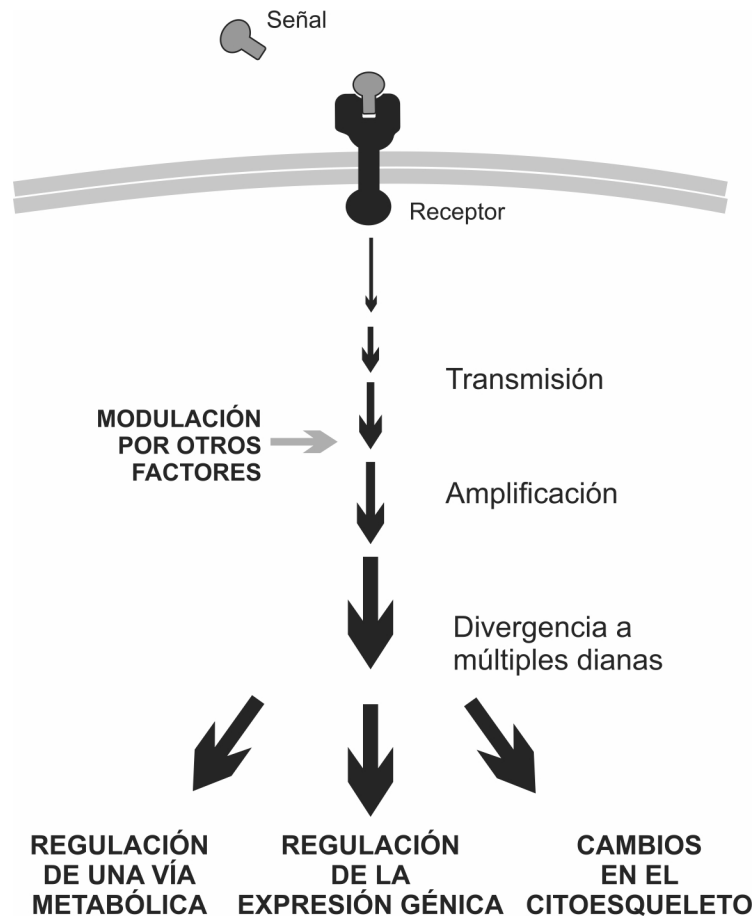
Ahora que ya hemos analizado qué sucede cuando una molécula de señalización interactúa con el receptor, volvamos al concepto ya mencionado de la amplificación de la señal, considerando su magnitud: una molécula de receptor activada puede convertir hasta 100 moléculas de proteína G de la forma inactiva a la activa. A su vez, cada proteína G activa a una AC, que luego cataliza la síntesis de varios cientos de moléculas de AMPc durante el tiempo en que dura su activación. A su vez, y dependiendo del tipo celular efector, el AMPc activa una cascada de enzimas que también tiene características amplificatorias: una serie de reacciones en cadena en las cuales una enzima activada a su vez activa a otra enzima, de modo tal que la amplificación que sucede en cada paso tendrá su magnitud asociada a la cantidad de pasos enzimáticos de la cascada.



Los mensajeros lipofílicos ingresan a la célula e interactúan en el citoplasma o el núcleo con sus receptores, modificando la expresión de los genes.



Los mensajeros lipofílicos ingresan a la célula e interactúan en el citoplasma o el núcleo con sus receptores, modificando la expresión de los genes.



Las proteínas diana pueden ser distintas, y los efectos celulares de los mensajeros se corresponden con el tipo de proteína diana que se modifique.

Todos estos complejos mecanismos resultan entonces en la modificación de la actividad de diferentes proteínas o la creación de proteínas nuevas. A estas proteínas se las denomina **diana**. Dependiendo del tipo de proteína diana que se vea afectada por esta cadena de reacciones, la célula blanco responde con una acción o efecto distinto y específico. Las proteínas diana incluyen proteínas de transporte a través de la membrana, enzimas que intervienen en distintos pasos del metabolismo celular, proteínas del citoesqueleto, proteínas reguladoras de la síntesis de proteínas, y proteínas que regulan el crecimiento y la división de la célula.

3.2 Sensación y percepción del entorno

Todo este complejo y abarcativo sistema de interacción celular es el sustrato biológico que permite reunir la información del entorno, su integración y elaboración, para la generación de respuestas. Diferentes estímulos provenientes del ambiente externo y también del interior del cuerpo son interpretados por sistemas de integración y control, para una adecuada evaluación de los cambios constantes que el entorno propone al organismo. Dependiendo de las características de cada especie, un organismo es sensible a determinados estímulos y da cuenta de esa sensibilidad a través de su percepción.

Recabar las ideas previas de nuestros estudiantes respecto de los términos de sensación y percepción, o aún buscar su definición en el diccionario conduce a confusiones, ya que una conceptualización se basa en la otra: mientras que la sensación se define como *la impresión que las cosas producen en el alma por medio de los sentidos*, la percepción es *la sensación interior que resulta de una impresión material, realizada a través de los sentidos*. Mejor que ponernos a discutir sobre lo adecuado de estas definiciones, es necesario diferenciar con más agudeza ambos conceptos.

Los diferentes **estímulos** a que un organismo está expuesto no son otra cosa que formas diferentes de energía. A través de los **receptores sensoriales**, los organismos convierten la energía del estímulo en una señal nerviosa, el **impulso nervioso**, transformación que se denomina transducción. Esta señal se transmite desde el receptor, mediante una serie de neuronas y relevos sinápticos, hasta las regiones cerebrales específicas, en donde se integra para dar lugar a una experiencia sensorial compleja: ver, oler, oír, sentir, suceden a través de lo que se denomina proceso sensorial o **sensación**. La infraestructura del sistema nervioso encargada de sustentar este proceso se llama **sistema funcional sensorial** y consiste en el conjunto de neuronas y sinapsis excitatorias e inhibitorias que van desde la periferia (superficie corporal u órgano receptor) hasta la corteza cerebral, el nivel más superior en la complejidad del procesamiento de la información en el sistema nervioso central. Sin embargo, no todo concluye allí. Este proceso forma parte de otro más amplio: la **percepción**, en el cual, la información sensorial se integra con la información previamente adquirida, por lo que se añaden elementos subjetivos que pueden matizar la sensación. Por lo tanto al hablar de percepción hay que contemplar un proceso activo en el que participa to-

do el cerebro. Es decir que la percepción es el resultado de un complejo proceso de integración, al que intentaremos aproximarnos para comprender.

La percepción sensorial se inicia entonces en los **receptores sensoriales**, que reciben diferentes tipos de estímulos, por ejemplo las distintas fracciones de luz en el espectro electromagnético, la energía térmica, la energía mecánica en sus variantes de presión o vibración, el campo magnético o el campo eléctrico, la fuerza gravitatoria o la que genera la inercia del movimiento, o estímulos de naturaleza química diversa, incluyendo la humedad. Cada estímulo activa un receptor específico para un determinado tipo de energía, que con efectividad asombrosa, genera potenciales de acción.

La transducción entonces, es el proceso utilizado por los receptores sensoriales para transformar la energía del estímulo en potenciales de acción, y se produce en una zona especializada de la membrana de la neurona sensitiva, o de la célula receptora especializada, denominada **sensor**. El estímulo provoca un cambio en la permeabilidad de la membrana: en forma directa, o indirectamente mediada por mensajeros intracelulares (AMPC y GMPc) se produce la apertura o el cierre de canales iónicos, lo que modifica un flujo iónico que induce un cambio en el potencial de membrana. En estado de reposo, hay una diferencia de potencial, una **polarización**, entre el exterior más positivo y el interior de la membrana, más negativo). La entrada de cargas positivas hacia el interior (principalmente Na^+), provocará una **despolarización**; mientras que si se produce una salida de cargas positivas desde el interior (principalmente K^+) entonces se producirá la **repolarización**. Este cambio en el potencial de membrana se denomina **potencial de receptor**.

3.2.1 Clasificación de los receptores

La diversidad de estímulos define distintos tipos de receptores sensitivos, agrupables en cinco tipos básicos de receptores sensoriales. Es bastante sencillo identificarlos en la función que cumplen en los seres humanos, pero también microorganismos, animales y plantas los poseen. Veamos sus definiciones y algunos ejemplos

- **mecanorreceptores**, con capacidad de detectar la compresión o el estiramiento de los tejidos adyacentes. Por ejemplo, la respuesta de movimiento de las plantas carnívoras se inicia al activarse mecanorreceptores.

- **termorreceptores**, que detectan cambios de temperatura, unos con capacidad de detectar frío y otros que reciben calor. La foseta loreal de los ofidios es ejemplo de un órgano termorreceptor.
- **nociceptores**, o receptores del dolor, que se activan por daño físico o químico
- **fotorreceptores**, que detectan ondas electromagnéticas como la luz. Por ejemplo, en algunas plantas, hongos y microorganismos hay fotorreceptores que detectan la luz azul, modificando su metabolismo en respuesta.
- **quimiorreceptores** que pueden detectar sustancias químicas como sustancias odoríferas, o la cantidad de oxígeno, la osmolaridad, o la concentración de gases. Por ejemplo, muchas bacterias presentan quimiotaxis cuando sus quimiorreceptores son estimulados.

Los distintos tipos de receptores se encuentran distribuidos en distintos lugares de la superficie o del interior del cuerpo. Si los receptores están ubicados de forma de recibir estímulos externos, se los denomina **exteroceptores**. Aquellos localizados en los órganos viscerales se denominan **interoceptores** o **visceroceptores**. Este tipo de receptores, ubicados en vasos sanguíneos, músculos y en el sistema nervioso central, registra la condición del medio interno, por ejemplo el estado osmótico o electrolítico de los líquidos corporales. Por lo general, los estímulos que registran los interoceptores escapan a la conciencia, aunque a veces algunos estímulos muy intensos generan sensaciones de dolor o presión. Los **propioceptores** son receptores localizados en los músculos esqueléticos, tendones y articulaciones y en el oído interno, que registran la longitud y tensión de los músculos, y la posición y el movimiento de las articulaciones para informar sobre la posición del cuerpo y su orientación en el espacio.

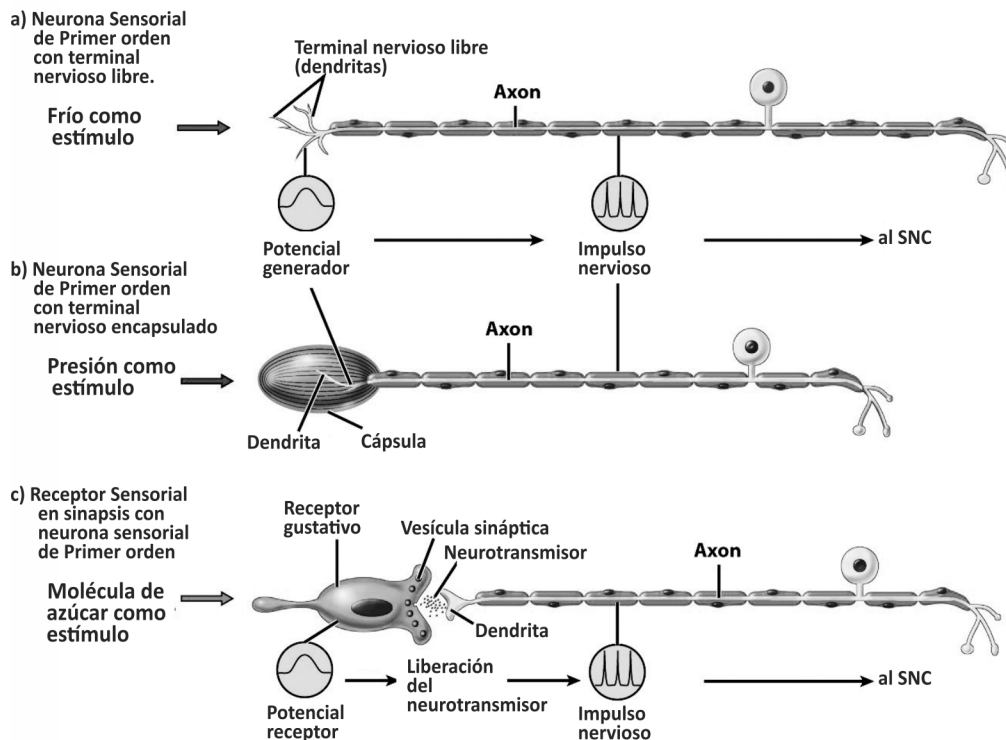
Los receptores también se clasifican por su estructura: pueden ser terminaciones nerviosas libres, terminaciones nerviosas encapsuladas y células especializadas.

Las **terminaciones nerviosas libres** son dendritas desnudas de neuronas sensitivas que por estar en el primer paso de la transmisión de la información sensorial se denominan de primer orden. Los receptores de dolor, picor, cosquilleo, temperatura y algunos táctiles son terminales nerviosas libres.

Cuando una dendrita está delimitada por una cápsula de tejido conectivo, con la función de aumentar la especificidad o sensibilidad del receptor, el receptor se denomina **ter-**

minal nerviosa encapsulada. Hay receptores de este tipo para la presión, la vibración y algunas sensaciones táctiles, tanto de tipo consciente como inconsciente. Los corpúsculos de Pacini o laminares poseen una gran cápsula oval de múltiples capas de tejido conectivo rodeando a la dendrita, que sufre deformación ante un estímulo de presión. Estos receptores que se ubican en la dermis de la piel y por debajo de ésta, en el tejido subcutáneo, son el ejemplo clásico de este tipo de estructura.

Los receptores sensitivos en la mayoría de los sentidos especiales (vista, gusto, olfato, oído) son **células especializadas**: allí, una célula estructural y funcionalmente especializada establece una conexión sináptica con la neurona sensitiva de primer orden (porque es la primera en una sucesión). En organismos complejos, los receptores sensoriales están acompañados por células asociadas sin función receptora, pero que son esenciales para que las células receptoras puedan cumplir con su rol, conformando órganos sensoriales complejos, como el ojo o el oído humano.



Tipos de receptores según su estructura.

Como se dijo, todos los receptores finalmente transducen la energía que reciben en un impulso nervioso. O casi todos, porque en algunos la acción es distinta, ya que modulan impulsos nerviosos preexistentes.

Dependiendo de su estructura, los receptores pueden generar potenciales de acción de diferente manera. Cuando las terminales nerviosas libres o encapsuladas (y las células especializadas de los receptores olfativos) son estimuladas, producen un **potencial generador**, que si es de suficiente intensidad como para alcanzar un valor umbral dispara uno o más potenciales de acción que recorren la neurona sensitiva de primer orden hacia el sistema nervioso central. En cambio, cuando es estimulada una célula especializada, produce un **potencial receptor**, que es capaz de liberar un neurotransmisor alojado en vesículas sinápticas de la célula especializada que provocará un potencial de acción postsináptico en la neurona sensitiva de primer orden al que la célula está vinculada sinápticamente.

Los potenciales receptores pueden sumarse temporal o espacialmente de manera que se alcance más rápidamente el umbral y se produzca un potencial de acción. Si se aplica un estímulo de una intensidad que supere el umbral, pero de corta duración, se producirá un solo potencial de acción. Un estímulo de la misma amplitud pero de mayor duración provocará potenciales de acción a repetición; cuanto más se eleva el potencial de receptor sobre el nivel umbral, mayor es la frecuencia de los potenciales de acción que conducirá la neurona de primer orden.

3.2.2 Del receptor a la percepción

El quid de la cuestión es dilucidar cómo, a partir de una única y exclusiva función que es transducir energía en impulsos nerviosos, la impresión de los distintos tipos de receptores permite experimentar una increíblemente amplia gama de experiencias sensoriales de diferentes tipos: el gusto, el tacto, el dolor, la visión...

La respuesta está en la otra parte del circuito: Las fibras nerviosas que conducen los impulsos nerviosos generados por los receptores finalizan en un punto específico del sistema nervioso central en donde sucede el procesamiento de la información sensorial. Si una fibra nerviosa que conduce el impulso nervioso proveniente de un receptor sensorial arriba a la corteza cerebral en un punto donde es procesado como información visual, el

individuo experimenta una sensación visual. Este esquema de organización se fundamenta en un concepto anatomofisiológico: el **sistema funcional**.

Un sistema funcional es una cadena de neuronas que cumple una función determinada en el sistema nervioso, y puede ser de dos tipos, los aferentes o sensoriales, que conducen información sensorial desde la periferia hacia el sistema nervioso central, y los eferentes o motores que llevan respuestas desde el sistema nervioso central hacia los efectores.

Estas cadenas de neuronas están conformadas tanto por elementos que se ubican en el sistema nervioso periférico, en los nervios sensitivos, motores o mixtos que intervenculan el sistema nervioso central con la periferia, como por los que se encuentran dentro del sistema nervioso central.

Veamos como ejemplo de un sistema funcional sensorial, al visual, increíblemente complejo en función de la calidad y cantidad de información (localización, forma, color, tamaño, textura, movimiento) que nos permite obtener acerca del mundo que nos rodea.

Los estímulos lumínicos son recibidos por los fotorreceptores en la retina, que es la capa más interna del globo ocular, donde se inicia la vía visual. Una parte de la retina, la capa nerviosa, inicia el procesamiento de los estímulos lumínicos que luego se dirigirán al sistema nervioso central saliendo del globo ocular a través del nervio óptico.

La retina nerviosa está formada por tres capas de células, las células fotorreceptoras, las células bipolares y las células ganglionares, por lo tanto hay entre ellas dos zonas donde se establecen los contactos sinápticos entre estas células.

La capa de células fotorreceptoras contiene los fotorreceptores (los conos y bastones) que absorben los fotones y convierten la energía lumínica en impulso nervioso. Los conos y bastones poseen una estructura similar aunque su forma difiere, lo que da lugar a su nombre (los bastones tiene forma cilíndrica, y los conos, triangular). Los bastones permiten ver con luz tenue y en forma acromática, mientras que los conos captan la luz brillante y distinguen los colores azul, verde y rojo. Los fotopigmentos son proteínas integrales de la membrana del extremo distal de los fotorreceptores que al absorber los fotones de luz sufren una modificación estructural e inician una serie de cambios tendientes a la hiperpolarización de la membrana.

Todos los fotopigmentos constan de dos porciones, una glucoproteína, la opsina y un derivado de la vitamina A, denominado retinal, que encaja estructuralmente en la opsina. Esta interacción sucede en la oscuridad; cuando absorbe un fotón de luz, el retinal cambia

a su forma isomérica, el transretinal, que se separa de la opsina. Cuando esto sucede, se activa la transducina, una proteína que a su vez activa una fosfodiesterasa de GMPc, por lo cual disminuye la concentración de este segundo mensajero en la célula fotorreceptora. Algunos canales de Na⁺ que son sensibles a las concentraciones de GMPc se cierran, disminuyendo la entrada de este ión positivo, por lo cual el potencial de la membrana de la célula fotorreceptora desciende, se hiperpolariza, ocasionando una disminución de la liberación del glutamato, un neurotransmisor inhibitorio que en la oscuridad se produce tónicamente, generando en forma continua potenciales postsinápticos inhibitorios en las células bipolares que hacen sinapsis con las células fotorreceptoras. Así, la luz modula negativamente la generación de potenciales de acción preexistentes en la oscuridad.

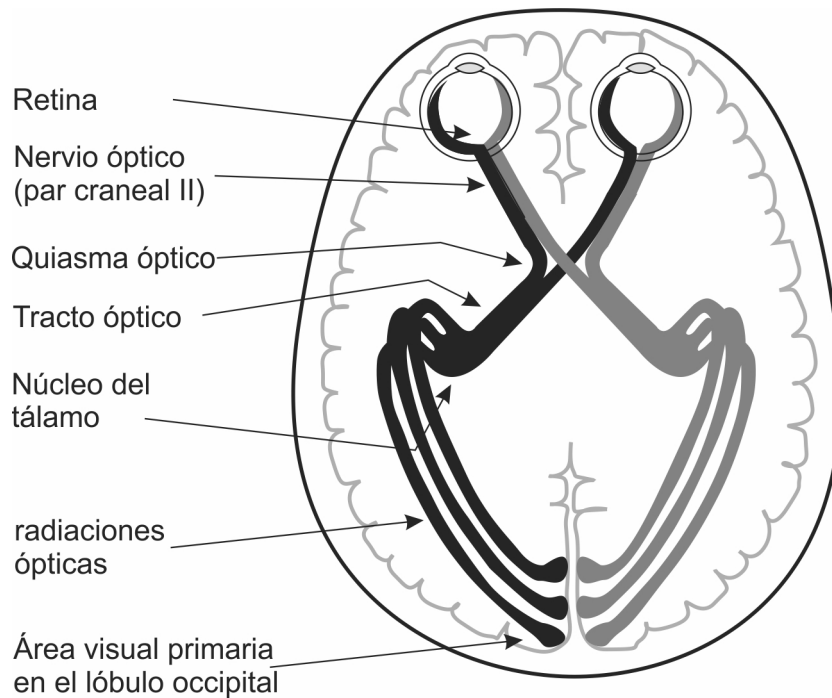
Vemos que los fotorreceptores son la excepción a la regla de la transducción a la que hacemos referencia: no generan potenciales de acción sino que modulan los preexistentes. Este efecto modulador es extraordinariamente sensible: un único fotón fotoactiva una molécula de rodopsina, que activa cientos de moléculas de transducina que interactúan con la fosfodiesterasa, que en un segundo hidroliza miles de moléculas de GMPc, amplificando así muchas veces la señal única que da el puntapié inicial.

Las células bipolares hacen sinapsis con células ganglionares, que son las neuronas eferentes de la retina. Sus axones convergen formando el nervio óptico, que se extiende desde la parte posterior del ojo hasta el quiasma óptico, donde una porción de sus fibras se cruzan y se continúan en el tracto óptico contralateral. El tracto óptico ingresa al cerebro ascendiendo lateralmente a los pedúnculos cerebrales del mesencéfalo y culmina en los cuerpos geniculados laterales del tálamo. Allí se establece sinapsis con neuronas cuyos axones forman las radiaciones ópticas, fibras que se proyectan en abanico hacia áreas homolaterales de la corteza cerebral del lóbulo occipital, el área visual primaria, conocida anatómicamente como el área 17 de Brodmann.

Todas las estructuras nerviosas que hemos nombrado, tanto periféricas como centrales, forman entonces el sistema funcional sensorial visual que sostiene anatómicamente y funcionalmente la conducción y el procesamiento inicial de los estímulos lumínicos.

Además de esta vía inherente a la función visual, las neuronas ganglionares envían ramos colaterales de sus axones a los núcleos supraquiasmáticos del hipotálamo, donde participan de la conformación de los ritmos biológicos como el circadiano del sueño y la vigilia, a los núcleos pretectales en el mesencéfalo, donde forman parte de los circuitos

neuronales que permiten la variación del tamaño de la pupila, y a los colículos superiores también mesencefálicos, donde interviene en la coordinación entre los movimientos del globo ocular y la cabeza.



Desde el área visual primaria, la información visual se distribuye en **áreas de asociación visual**, como las áreas 18 y 19 de Brodmann, también ubicadas en el lóbulo occipital, en donde la experiencia visual se relaciona con otras presentes y pasadas, lo cual permite reconocer y evaluar lo que se ve. De allí, la información se proyecta a otras áreas de integración sensorial. Una de ellas es la de **reconocimiento de rostros**, en el lóbulo temporal inferior, habitualmente más desarrollada en el hemisferio derecho que en el izquierdo, que nos permite reconocer a las personas por sus caras. El **área de integración común**, ubicada en el lóbulo temporal, recibe aferencias de otras áreas corticales de asociación sensitiva, además de la visual, y aferencias talámicas y del tronco encefálico, logrando la interpretación e integración de información de diversas modalidades sensoriales, lo cual permite la formación de los pensamientos, basados en una experiencia sensorial integrada y compleja. En

estudios en animales se han identificado por lo menos 25 áreas corticales en donde se procesa la información visual en paralelo, además del área cortical primaria.

Es entonces, en el sistema nervioso central funcionando integradamente donde se elabora la percepción sensorial, que es subjetiva e individual.

Los sistemas de captación de estímulos se han desarrollado ampliamente en el curso de la evolución, hasta lograr un importante grado de especialización en las estructuras, lo cual permite una recepción de los acontecimientos del mundo exterior con altísima definición.

Todo este complejo proceso de integración que permite la percepción y en consecuencia una diversidad de respuestas complejas, utiliza como sustrato biológico el sistema nervioso, pero se construye a través de las experiencias, durante toda la vida, y especialmente durante la infancia. Las experiencias por las que pasamos en esta etapa de la vida permiten en el establecimiento de conexiones interneuronales que siguen rutas de circulación de la información, que en forma plástica y moldeable se van consolidando conforme crecemos y aprendemos. Esto significa que cada individuo tendrá una infraestructura nerviosa única y particular, que da por resultado una gran diversidad de posibles respuestas, algunas instintivas, otras aprendidas. Esta plasticidad neuronal es mayor en mamíferos que en reptiles, y dentro de los mamíferos el ser humano es el extremo de esta cualidad ya que la maduración del sistema nervioso culmina tardíamente, ofreciendo muchas oportunidades de cambio ante una gran cantidad de aprendizajes posibles. Un claro ejemplo es el lenguaje, que se asienta en una red de neuronas que se construye a medida que relaciona el sonido con símbolos, y se elaboran respuestas sonoras a través de la fonación, todo lo cual se logra durante los primeros dos años de vida.

3.3 El comportamiento como respuesta

Una vez que los estímulos son integrados y procesados, se elaboran las respuestas, que son enviadas para su ejecución en acciones. Al conjunto de acciones que un animal realiza en respuesta a los estímulos ambientales se lo denomina comportamiento. A veces estas respuestas son simples o medianamente complejas.

Nuestra conducta como seres humanos es similar a las respuestas complejas de otros animales. Se configura por la interacción entre componentes genéticos o innatos y su

interacción con factores ambientales, y este grado de complejidad es muy interesante para la investigación científica, que trata de esclarecer el peso relativo de cada uno de estos componentes sobre el comportamiento humano.

Entre los diversos estudios que se utilizan para esta evaluación se encuentran los estudios en gemelos. Los gemelos monocigóticos derivan de un único cigoto y por lo tanto son genéticamente idénticos, mientras que los gemelos dicigóticos o mellizos son tan iguales genéticamente como cualquier par de hermanos. Por esta razón, su estudio comparativo brinda una buena ocasión para ver la contribución relativa de los efectos ambientales sobre la expresión de los componentes genéticos. Si los factores genéticos son importantes en un determinado tipo de comportamiento, los gemelos monocigóticos serán mucho más similares que los gemelos dicigóticos. Sin embargo, a pesar del gran desarrollo de este tipo de investigaciones, todavía no ha sido posible establecer con claridad cómo interactúan los mecanismos genéticos y ambientales que intervienen en el comportamiento humano, dada su naturaleza multifactorial.

Un ejemplo claro de la complejidad del comportamiento humano como respuesta a los diferentes estímulos es el **estrés**.

3.3.1 Concepto de estrés

Todo el mundo habla del estrés. Constituye uno de los fenómenos más ampliamente tratados desde la cotidianidad de diarios, noticiarios, revistas, novelas o charlas de café, pero además, muy estudiado desde el punto de vista científico abarcando múltiples y variadas áreas. Hemos elegido el estrés como ejemplo de respuesta ante los estímulos para contribuir al conocimiento de este concepto, desde una perspectiva interdisciplinaria y científica.

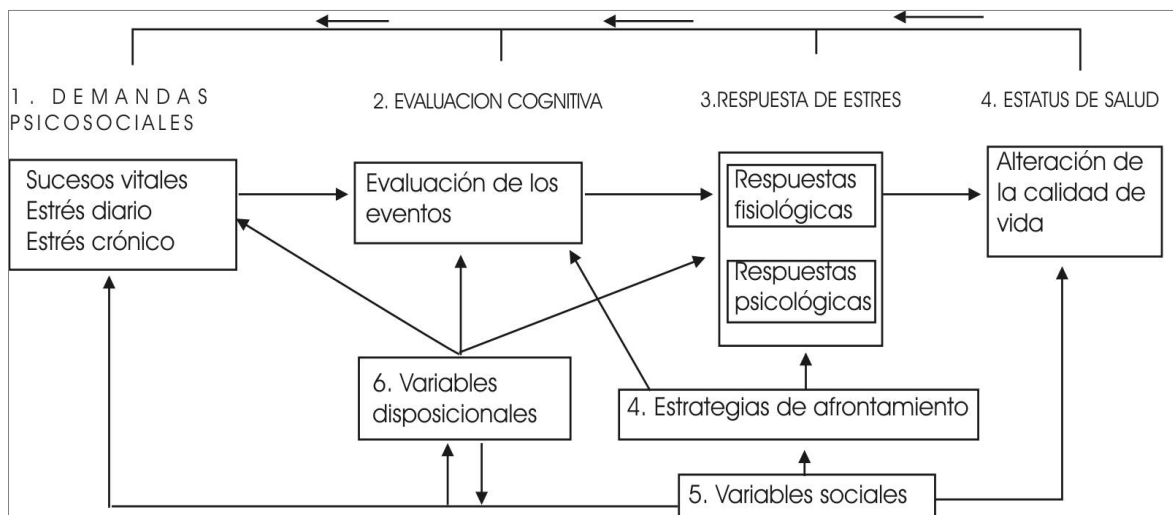
Se han establecido tres modelos para teorizar sobre el estrés: 1) modelo basado en las características del agente que genera el estrés (estresor); 2) modelo basado en la respuesta de la persona, y 3) modelo basado en la interacción entre la persona y el entorno (estímulo-persona-respuesta). Desde este último enfoque se ha desarrollado un modelo de estudio que se denomina **modelo procesual del estrés**, también denominado modelo de Sandín por ser este autor el que lo desarrolló.

El estrés implica una perturbación del funcionamiento habitual del individuo, entendido en términos biológicos o psicológicos cuya alteración es generada por algún tipo de es-

estimulación (externa o interna) que suele denominarse estresor (estímulo, suceso, pensamiento, idea, etc).

El modelo procesual del estrés asume al estrés como una ausencia de equilibrio entre las demandas del contexto y los recursos que posee la persona para afrontarlas.

El modelo de Sandín describe una relación entre el estrés y la salud a partir de siete etapas que resultan interdependientes: demandas psicosociales, evaluación cognitiva, respuesta de estrés, estrategias de afrontamiento, variables sociales, variables disposicionales y estatus de salud. El esquema clásico del modelo procesual de Sandín se observa en la siguiente figura.



Definamos y analicemos sus etapas:

Demandas psicosociales

Las demandas psicosociales se clasifican en tres clases: Sucesos vitales (situaciones extraordinarias que demandan cambios significativos en el patrón normal de adaptación), estrés diario (sucesos cotidianos relacionados con satisfacciones o contrariedades) y estrés crónico (son situaciones de tensión crónica que se mantienen en el tiempo y se relacionan con áreas tales como la laboral, la familiar y la sociocultural).

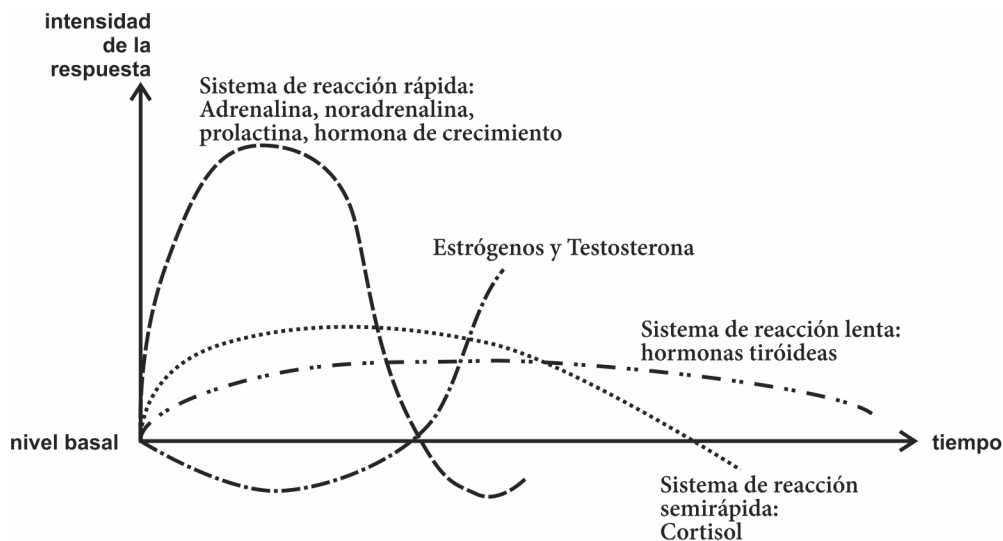
Evaluación cognitiva

El impacto estresante de los diversos agentes estresores depende, en gran medida, de cómo sean éstos evaluados y percibidos por cada persona. Tal evaluación se lleva a cabo en dos fases: evaluación automática, que es una evaluación primaria que cataloga la demanda psicosocial como aceptable o amenazante, y evaluación controlada, consistente en el análisis de las demandas psicosociales y en los recursos que se poseen para afrontarlas.

Respuestas de estrés

Una vez que la persona percibe que las demandas ambientales sobrepasan la capacidad de respuesta, se ponen en acción dos procesos interrelacionados: activación de emociones negativas y activación fisiológica a partir del sistema nervioso autónomo y el sistema neuroendócrino.

Ante las situaciones estresantes el ser humano moviliza sus recursos fisiológicos con el fin de responder a estas situaciones, lo que se denomina **respuesta multihormonal de estrés** desde el punto de vista fisiológico y que está controlada principalmente por el hipotálamo.



La respuesta inicial iniciada por impulsos nerviosos desde el hipotálamo hacia la división simpática del sistema nervioso autónomo, incluida la médula suprarrenal, moviliza rápidamente las reservas del cuerpo para la actividad física inmediata. Se vuelven accesibles grandes cantidades de glucosa y oxígeno a los órganos más activos a la hora de rechazar

un peligro: el cerebro, para agudizar el alerta, los músculos esqueléticos, para poder atacar o huir, y el corazón que debe eyectar suficiente sangre al cerebro y los músculos. Las funciones no esenciales, como la digestiva, urinaria y reproductora se inhiben.

Además, el hipotálamo libera factores de control (estimuladores o inhibidores), que afectan la secreción de diversas hormonas hipofisarias, varias de las cuales que modifican a su vez la funcionalidad de otras glándulas subordinadas. La corteza suprarrenal es estimulada para aumentar la liberación de **cortisol**, cuyos efectos comprenden el aumento de la glucemia por promoción de la gluconeogénesis a partir de aminoácidos en las células hepáticas, y la reducción de la captación de la glucosa en el músculo esquelético y el tejido adiposo. Además, aumenta la degradación de lípidos y proteínas a metabolitos utilizables por las células del cuerpo como combustible.

Se estimula además la liberación de hormona de crecimiento, que también afecta la degradación de los lípidos y del glucógeno almacenado en el hígado, estimulando el consumo de la energía disponible en todas las células metabólicamente activas del cuerpo. Es deprimida la función reproductiva por aumento de la secreción de prolactina y disminución de las gonadotrofinas. Se promueve la secreción de hormonas tiroideas, que estimulan el aumento del uso de la glucosa para la producción de energía metabólica.

Este conjunto de modificaciones neuroendócrinas promueve un mecanismo de control con ventajas adaptativas a la situación de estrés denominado *alostasis*, en reemplazo de los mecanismos homeostáticos tradicionales de control del equilibrio, de cuya diferencia hablaremos en un apartado especial.

Estrategias de afrontamiento

Las estrategias de afrontamiento son acciones conductuales y cognitivas que aplican las personas para hacer frente a las demandas estresantes, a la activación fisiológica y al malestar emocional asociado a la experiencia del estrés. Las estrategias de afrontamiento pueden dirigirse al problema, con el fin de eliminar o reducir las fuentes que producen el estrés; también pueden estar dirigidas a la reducción de los estados emocionales negativos y de la activación fisiológica. Cuando el afrontamiento no logra disminuir el proceso del estrés, entonces hay una alta probabilidad de que se produzcan alteraciones en la salud.

Variables sociales

El entorno social está implicado en las demandas psicosociales, las respuestas del estrés, su afrontamiento y la condición de salud. Dentro de esta dimensión son de especial relevancia el nivel socioeconómico y el apoyo social. El primero incluye el nivel de ingresos, el nivel educativo y el nivel ocupacional, factores asociados al proceso de salud. El segundo, con especial énfasis en la construcción de espacios públicos con participación y comunicación democrática autoorganizados, tiene efectos amortiguadores del estrés, así como efectos directos sobre la salud.

Variables disposicionales

Son factores inherentes a la persona que tienen la capacidad de modular las primeras etapas del estrés. Aquí están incluidas las dimensiones de personalidad, los tipos de reacción al estrés, los factores hereditarios y el sexo o la etnia a la que la persona pertenece. El estrés tiene mayores consecuencias negativas sobre la salud cuando hay rasgos de personalidad negativos. En la infancia, determinadas condiciones familiares y sociales (actitudes de la familia, modelización de determinadas formas de reacción frente al estrés, etc.) pueden afectar el desarrollo psicosocial, aumentando así la susceptibilidad al estrés, disminuyendo el apoyo social y desarrollando rasgos de personalidad negativos.

Estatus de salud

La calidad de vida relacionada con la salud es el resultado de cómo se manejen las situaciones de estrés y se prevengan todos aquellos factores que afectan la salud.

El modelo procesal del estrés propuesto por Sandín es un enfoque que posibilita integrar la evidencia aportada por la investigación respecto a la asociación de diversos factores psicológicos, sociales y biológicos, con el proceso de salud. Este modelo, además, permite establecer relaciones entre variables y formular hipótesis para el desarrollo de nuevas investigaciones en el campo.

3.3.2 Homeostasis y alostasis

Asociados a la respuesta a los diferentes estímulos, y en consideración especial a los que desencadenan el estrés, merecen ser analizados los conceptos de alostasis y homeostasis.

En el marco de la exposición a diferentes estímulos, las respuestas de los organismos vivos, entre ellos el ser humano, tienden a la homeostasis, entendida como la habilidad para mantener el equilibrio o la estabilidad de modo dinámico, a través del cambio permanente. En un sentido estricto del término, la homeostasis se refiere a un conjunto de variables del medio interno que son esenciales para la vida, y deben mantenerse en un estrecho rango para la supervivencia.

Para ello el organismo se sirve de todos los sistemas que lo constituyen, bajo la coordinación de los sistemas de integración y control, el nervioso, el endócrino y el inmunológico, utilizando fundamentalmente el proceso de la comunicación intercelular a través de las moléculas de señalización que hemos analizado.

Pese a mantener en equilibrio al organismo, la homeostasis no es suficiente cuando, ante un determinado estímulo, el organismo debe responder operando sus variables vitales en un rango más amplio que el equilibrio para responder en forma óptima y adaptada al estímulo.

El concepto de **alostasis** implica un proceso activo que involucra un complejo sistema autorregulado, mediante el cual el organismo responde a situaciones de estrés. Como consecuencia de la activación de los mecanismos alostáticos, el organismo experimenta **carga alostática** (CA), término empleado para cuantificar los diferentes parámetros que el organismo se ve forzado a modificar para adaptarse a estas situaciones. La CA representa a los diferentes sistemas involucrados en la respuesta alostática, que deben ser activados en tiempo y forma para permitir una adaptación efectiva, pero también deben ser inactivados en adecuado tiempo y forma para evitar daños en el organismo y en los sistemas involucrados en la alostasis.

Los principales sistemas responsables de desencadenar la respuesta alostática son el sistema nervioso autónomo simpático y el eje hipotálamo-hipofisario-adrenal (eje HPA, la P es por pituitaria, un nombre ya en desuso de la glándula hipófisis), siendo sus principales mediadores las catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) y el cortisol. Estos sistemas se activan en forma simultánea como parte de la respuesta multihormonal del estrés y se inactivan cuando el estímulo estresante se extingue. Sin embargo, si el organismo no logra controlar al estresor, y continúa expuesto a altos niveles de estos mensajeros químicos, sobreviene un desequilibrio del sistema se genera una situación de **sobrecarga alostática**, con consecuencias patológicas.

Analicemos las dos caras de la moneda de la respuesta al estrés. Al comienzo de la respuesta adaptativa los mensajeros químicos involucrados ejercen funciones reparadoras, fundamentalmente por mejorar la disponibilidad de metabolitos energéticos y el aumento de la actividad psicomotora en cerebro. Estos efectos son muy útiles en el mecanismo alostático de control en el estrés y constituyen un mecanismo fisiológico necesario que no provoca daño: nada mejor que estar alerta y poder disponer de energía para enfrentar el peligro.

Pero si el estímulo estresor es de una magnitud que supera la capacidad adaptativa del sistema o es prolongado en el tiempo, o se suceden una serie de estímulos estresores diferentes pero consecutivos, acontece el **estrés crónico**: la activación se mantiene en el tiempo, sin que los sistemas vinculados a la respuesta alostática retornen a los niveles basales, provocando un aumento de la carga alostática que no resulta adaptativo, suceden consecuencias deletéreas a nivel de las funciones fisiológicas y psicológicas ubicando al sistema en un desequilibrio que puede alterar el estado de salud.

Analizando las consecuencias de la sobrecarga alostática en algunos sistemas, vemos que a nivel del sistema nervioso, se observa déficit cognitivo por afectar el aprendizaje y la memoria, ya que la exposición crónica al cortisol altera la región hipocampal, ocasionando disminución de la neurogénesis, atrofia de la arborización dendrítica, disminución de la densidad de células gliales, y reducción del volumen de la región a través de un tamaño neuronal disminuido, aunque el número total de neuronas parece no estar alterado.

Con respecto al sistema inmunológico, se conoce que una de las funciones del cortisol es regular la respuesta inmunológica, manteniendo a este sistema bajo control mediante un mecanismo que está mediado por la interleuquina 1 (IL-1), mensajero químico secretado por los macrófagos que, a su vez, estimula el eje HPA. El aumento de cortisol resultante suprime por retroalimentación negativa la secreción de IL-1, manteniendo así bajo control al sistema inmunológico una vez que el antígeno ha sido eliminado.

La desregulación del eje HPA y el aumento sostenido del cortisol puede aumentar la vulnerabilidad de nuestro organismo a los antígenos debido a que se ve disminuido el número de linfocitos T ayudantes que circulan en la sangre y la linfa, y su capacidad de migrar hacia los lugares de estimulación antigénica.

El aumento sostenido de cortisol inhibe la formación de colágeno, esencial para la formación de la matriz mineral del hueso, por lo que ocasiona la pérdida de masa ósea conocida como osteoporosis, y la fragilidad de la piel.

La hipercolesterolemia estimula la secreción de jugo gástrico, aumentando el riesgo de desarrollar úlceras.

La sobrecarga alostática conduce a una supresión de la función gonadal, efecto que ha sido bien demostrado en los bailarines de ballet, corredores y atletas de ambos sexos, observable en manifestaciones clínicas diversas: mientras que las mujeres suelen desarrollar trastornos menstruales como amenorreas o dismenorreas, en los varones se han observado alteraciones en la fertilidad y en la sexualidad. Se especula que estas manifestaciones se deben a múltiples acciones inhibitorias que la activación del eje HPA ejerce sobre el eje hipotálamo-hipofisario-gonadal. Los glucocorticoides tienen efectos inhibitorios sobre las neuronas hipotalámicas que secretan el factor liberador de gonadotropinas (GnRH), las neuronas gonadotróficas de la glándula hipófisis, en donde inhiben principalmente la secreción de LH, y en los ovarios, donde se inhibe la esteroidogénesis.

La asociación entre el estrés y el aumento de la incidencia de la obesidad visceral y el síndrome metabólico, está fuertemente respaldada por datos epidemiológicos, que indican que el estrés psicosocial crónico, como por ejemplo el estrés socioeconómico, es un factor de riesgo importante para la instalación de estas patologías en la sociedad actual. Se conoce que el estrés crónico conduce a la centralización de depósitos de grasa abdominal o visceral, fuertemente relacionada con alteraciones metabólicas ya que esta localización del tejido adiposo se asocia con la resistencia a la insulina, la dislipidemia, la aterosclerosis, la hipertensión y la hipercoagulación.

Por otra parte, el aumento de la secreción de leptina, que actúa principalmente para suprimir el apetito y aumentar el gasto energético a nivel hipotalámico, parece jugar un papel vital en la relación entre el tejido adiposo y el eje hipotálamo-hipofisario-gonadal, regulando el inicio de la pubertad, la modulación de la capacidad reproductiva y facilitando la implantación del embrión y el embarazo.

A partir de estos datos, podemos observar la diferencia entre una respuesta alostática adaptativa y beneficiosa que nos permite enfrentar exitosamente una situación de estrés eventual, pasajera o aguda, retornando al equilibrio una vez que cesó, y una activación

descontrolada con sobrecarga alostática ocasionada por el estrés persistente o crónico que repercute fuertemente en la salud integral de la persona.

El estrés es una adaptación evolutiva muy buena, porque induce una diversidad de reacciones tendientes a modificar y transformar esa realidad. El problema no es el estrés, sino no poder modificar su origen, y cuando el origen es social, como sucede generalmente en el ser humano (laboral, familiar, cultural, etc), la solución también deberá ser social. No es en vano que la participación y la organización comunitaria sea uno de las mejores soluciones contra el estrés

Bibliografía citada, revisada (y útil para ampliar los conocimientos)

Berne y Levy (2009) Fisiología. 6ta. Edición. Barcelona: Elsevier.

Lodish H et al. (2005) Biología Celular y Molecular. 5ª edición. Buenos Aires: Panamericana.

Lopez Mato A (2004) Psiconeuroinmunoendocrinología I y II. Nuevos dilemas para viejos paradigmas, viejos dilemas para neoparadigmas. Polemos. Buenos Aires.

Sandín B (1999) El estrés psicosocial: Conceptos y consecuencias clínicas. Madrid: Klinik.

Tobón S, Vinaccia S. y Sandín B. (2004) Modelo procesal del estrés en la dispepsia funcional: implicaciones para la evaluación y el tratamiento. Revista de Psicopatología y Psicología Clínica Volumen 9, Número 2, pp. 81-98.

Tortora GJ, y Derrickson BH (2007) Principios de Anatomía y Fisiología. 13ª Edición México: Panamericana.

Actividades para el aula

En este capítulo hemos propuesto dos tipos diferentes de actividades, la primera en relación al tema mensajeros químicos y la segunda para percepción.

A: Hormonas, Sexo y Sexualidad en el ser humano

En el marco de la aplicación de ley de Educación Sexual Integral en vigencia como eje transversal para la currícula de la escuela secundaria, con foco en la Biología de 2do y 3er año, y Salud y Adolescencia de 4to año, la actividad A integra conceptos vinculados a sistema endócrino con reproducción y sexualidad.

Para eso, propone un estudio de casos a partir de relatos breves en los que se presentan situaciones que combinan problemas socioculturales y biológicos, tanto genéticos como endócrinos. A este conjunto de cinco casos se incorpora uno más, ajeno a la temática de reproducción y sexualidad pero que sirve de ejemplo para agregar otros similares con el objeto de completar el tema. La actividad permite hacer una evaluación del trabajo grupal y una evaluación integradora al finalizar las exposiciones.

Desarrollo: Se recomienda que la actividad se realice luego de una introducción sobre las hormonas como mensajeros químicos y sus mecanismos de acción. Luego se divide al curso en seis grupos, y se reparte un caso a cada grupo, junto a las siguientes consignas:

Clase 1: Cada grupo deberá realizar una lista de tres o cuatro puntos, o temas en los que necesita buscar mayor información para entender el caso en profundidad, y poder explicarlo claramente. Elaborar un informe de no más de tres carillas en donde se presenten los temas investigados.

Clase 2: Lectura de los informes en general y en voz alta para que el docente recomiende correcciones.

Clase 3 y Clase 4: Cada grupo deberá realizar una exposición del relato que deberá ser ilustrado mediante dibujos, video, presentación de Power Point, o poster, que incluya los fundamentos teóricos que explican el caso, y dando lugar a las preguntas de los compañeros;

en total debe durar no más de 30 minutos. Cada grupo debe repartir a cada compañero una copia del informe, y al docente tres preguntas de evaluación, que podrán resultar tanto en una evaluación del grupo que las generó como para ser utilizadas en la elaboración de un cuestionario evaluativo del curso.

CASOS

El mandato del macho

Sandra y Mario llevan ya 8 años viviendo juntos y hace por lo menos 4 años que buscan tener un hijo. Los dos están igualmente motivados, y como el tiempo pasaba sin novedades, desde hace dos años Sandra comenzó a atenderse con un equipo médico. En este tiempo ha pasado por un estudio tras otro, muchos de ellos tediosos y desagradables, sin resultado alguno.

Ya sin muchas opciones, el médico sugirió un siguiente paso que aún nadie había mencionado: debía examinarse a Mario. Con el resultado de un espermograma y análisis de sangre en la mano, muy nervioso como hacía tiempo no estaba, Mario esperaba la palabra del doctor. "Tus espermatozoides son pocos y se mueven lento, tenés una enfermedad que se llama hipogonadismo hipogonadotrófico", le dijo; "hay unas hormonas que son necesarias para que los testículos fabriquen los espermatozoides, y una de estas hormonas, la FSH, se encuentra en menor cantidad de lo normal en tu sangre".

Para Mario fue la peor noticia, el mundo se le venía abajo; esto parecía una de las bromas de sus compañeros de Rugby que en el vestuario suelen bromear: "¿Y? ¿Para cuándo el pibe?", "Ché Mario, pero ¿vos sabés cómo se hace?", "Si necesitás te puedo dar una ayudita".

El doctor trató de animarlo, dijo que era posible que un tratamiento hormonal le permitiera revertir la situación y con espermatozoides normales su esposa quedaría embarazada, e incluso se podía intentar un tratamiento de reproducción asistida. Pero ese ya no era el problema principal. Su orgullo de varón estaba herido.

Mujer bonita □ □ □ □

Sandra, una joven de 17 años, es alta y bonita. Tanto que sus amigas insisten en que debe presentarse a un casting para modelar.

Pero a Sandra otro tema le preocupa, y concurre a su ginecóloga por primera vez. Hace tiempo que debería haber consultado pero no le gusta ir al médico; aunque a los 14 años su cuerpo siguió un desarrollo normal, como en sus amigas, a ella no le vino la menstruación. Al principio, influida por el desinterés de su madre, trató de quitarle importancia pensando, ¡con todos los problemas que tengo, mejor que no tenga que ocuparme de este tema todavía! Y lo fue dejando pasar, pero ahora está inquieta. Hace cuatro meses comenzó a salir con un pibe del barrio, y si bien ya había tenido otro novio, a Sandra le interesa este nuevo vínculo, está contenta, y aunque es muy pronto, ha comenzado a pensar en una relación formal y en un futuro, en una familia.

La ginecóloga le realiza un examen físico completo, y le pregunta con qué frecuencia debe depilarse, a lo cual Sandra responde que cada 3 meses.

La médica le dice que necesita hacer algunos estudios, y le indica una ecografía ginecológica, análisis de sangre y un estudio citogenético, en donde se lee un pedido de confidencialidad.

A la semana siguiente, con los resultados en la mano, la ginecóloga confirma sus sospechas. En la ecografía, se observa que la joven tiene una vagina más corta, no posee trompas de Falopio, útero ni ovarios, detectándose dos masas ovoides pequeñas intra abdominales. El estudio genético indica que el cariotipo de Sandra posee un complemento cromosómico 46, XY, y en concordancia, los análisis de sangre indican la presencia de testosterona.

La médica se alegra de haber indicado que los estudios se realizaran bajo estricta confidencialidad. Ahora su problema es cómo explicar a Sandra lo que indican los resultados de sus análisis. Es la primera vez que le toca un caso así, y deberá consultar con otros colegas cuanto antes.

Guevedoche

Hasta hace muy poco, en un pueblo de la República Dominicana llamada Salinas, de unos 4.300 habitantes, se asignaba el sexo femenino de manera incorrecta a uno de cada noventa niños. Estos niños eran criados como niñas, y al llegar a la pubertad **estas niñas cambiaban de sexo y se convertían en chicos.**

Este fenómeno de cambio de sexo espontáneo era tan corriente en Salinas que sus habitantes hasta tenían un nombre para ellos: **guevedoche** (pene a los doce). Y es que literalmente les surgía pene y les bajaban unos testículos.

En Papúa, Nueva Guinea, en la otra parte del mundo, sucede algo muy similar. Existe una tribu de cazadores y horticultores llamada Sambia que se refieren a esos niños que cambian de sexo como *kwolu-aatmawol* (transformado en masculino).

En todos estos casos de conversión sexual espontánea, el problema es una enzima llamada **5-alfa-reductasa, cuya ausencia produce la falta de DHT** o dihidrotestosterona, hormona que induce el desarrollo de los genitales en la etapa fetal. Sin DHT, el cuerpo toma una forma femenina. A partir de la pubertad, cuando la testosterona comienza a ser producida en mayor cantidad por los testículos, se produce en unos pocos meses la masculinización de quien hasta ese momento era una niña; esto se conoce como **pseudohermafroditismo masculino**.

Todos los *guevedoche*, tienen la misma mutación genética debido a que su ascendencia puede remontarse a una mujer llamada Altagracia Carrasco. La misma enzima está ausente en los *kwolu-aatmawol* de Sambia.

Lo cierto es que los habitantes de Salinas no consideran a los *guevedoche* como masculinos o femenino, sino que los engloban en una tercera categoría, **un tercer sexo**, refiriéndose a ellos a veces como *machi-hembras*.

El concepto de tercer sexo o un tercer género se usa también para describir a los *hijras* de India y Pakistán, los *mahu* de la Polinesia, los *muxe* Zapotecas de México y las *vírgenes juradas* de los Balcanes. El sistema de dos géneros sexuales no es tan universal como creemos, y otras culturas lo han comprendido mejor que la nuestra.

El caso de Curtis

A *Curtis Hinkle* nadie le explicó para qué servía el tratamiento hormonal que debía seguir de por vida, según lo acordaron los médicos. Sus cromosomas son XX, es decir, Curtis es genéticamente mujer, y más o menos así fue hasta que llegó a la Universidad, cuando dejó de tomar la medicación que le habían recetado sin explicarle para qué servía. Entonces, brotó la barba y los rasgos masculinos con los que, para su sorpresa, se siente más cómodo. Sus cromosomas son de mujer, pero las hormonas que hay en su sangre no, y aquellas pastillas mantenían silenciada a la testosterona que hoy ha cubierto de vello su cuerpo. “Es curioso,

pero la mayoría de los intersexuales como yo que conozco se suelen dejar barba”, cuenta Curtis. Su caso está descrito como hiperplasia suprarrenal congénita. Es la causa más común de intersexualidad, que produce la virilización desde la infancia. Tienen un clítoris más grande y una vagina escondida debajo de la piel. “Yo siempre me vi como alguien raro. Pero no supe lo que me ocurría hasta que a los 21 años me hicieron un examen médico en la Universidad de París, donde estudié Lingüística. La doctora me preguntó: ¿Sabes que eres hermafrodita? Le dije que no, que no lo sabía”. El desarrollo depende tanto de genes, enzimas y hormonas, y por ello el sexo es mucho más complejo que solo varón y mujer.

Yo decido

“Hace solo unos años, cuando un niño nacía con genitales ambiguos su género se decidía inmediatamente en el quirófano”, explica el Dr. Godás. “Ahora, la consigna más generalizada es dejarlo crecer y esperar a que exprese su personalidad antes de reconstruir los genitales. A los tres años, la persona ya muestra claramente su identidad sexual. A esa edad ya le dan patadas a pelotas, o se abrazan a las muñecas. Es importante esperar, porque se han cometido muchos errores”.

Hay pocos estudios de seguimiento de personas intervenidas por ambigüedad genital. Es famoso el llevado a cabo en el Hospital Johns Hopkins de Baltimore, en el que se hizo un seguimiento de 27 niños que habían nacido sin pene y a quienes se les asignó quirúrgicamente un sexo femenino. Pasado el tiempo, cuando los chicos tenían entre 5 y 16 años, los investigadores encontraron que 14 de ellos, a pesar de haber sido educados “en rosa”, habían adquirido un claro rol masculino. “Se sentían varones y actuaban como tales”, según el doctor William G. Reiner, quien coordinó el estudio. En el resto de los casos, el sexo que delineó el bisturí fue el acertado.

“A nuestro hospital llegan anualmente entre tres y cuatro bebés con ambigüedad genital”, explica el doctor Gerardo A. Zambudio, coordinador de la Unidad de Hipospadias e Intersexos del Hospital Virgen de la Arrixaca, en Murcia. En la región se atienden al año unos 17.000 partos, y cuando hay un caso de duda, lo remiten a la Arrixaca. A la consulta del Dr. Zambudio llegó Álex. Su padre le había puesto un nombre que servía tanto para hombre como para mujer. Era un caso de hermafroditismo verdadero, conocido ahora como ovotesticular-DSD. “Tenía un testículo en un lado del cuerpo, y un ovario, trompa y medio útero en otro. Es decir, en un lado, los genitales eran femeninos, y en el otro masculinos”, explica el

Dr. Zambudio. En el caso de Álex, sus cromosomas eran XX (femeninos), y los genitales externos eran vulva con un solo orificio y un clítoris algo más grande de lo habitual. “En estos casos, se suelen operar para hacerles mujeres. Pero el niño había sido intervenido antes por otro equipo y se le había extirpado el ovario, muy pequeño y atrófico, y con posibilidad de transformación maligna”.

Al carecer de ovario, valoraron que no habría podido producir hormonas femeninas en su pubertad. “Decidimos que lo mejor era hacerlo niño, manteniendo la única gónada que le quedaba, el testículo derecho”. El complejo proceso se realizó en una sola intervención y utilizaron la vagina extirpada para construir parte del conducto de la orina de una forma novedosa. Álex ya tiene 4 años y recientemente acudió a consulta: “Está bien. Tiene aspecto y rol de varón. En el 80% de los casos conseguimos un resultado estético muy bueno, y los pacientes están contentos y viven sin problemas”.

Sin embargo, el irreversible bisturí es motivo de controversia. “Tras la intervención”, añade Zambudio, “hay un 20% de pacientes insatisfechos”. Algunos (los más descontentos) piden que no se opere a ningún niño hasta que sea mayor y pueda decidir libremente.

Curtis Hinkle clama al otro lado del teléfono: “Yo no quiero que me operen. Tener un clítoris más grande no es una anomalía. Es como es, y solo resulta horrible a ojos de quien lo mira con horror”. Desde la asociación que preside –OII (*Organización Internacional de Intersexuales*), con socios en todos los continentes y de todas las clases sociales– Curtis pide que su condición se entienda, social y administrativamente, como variaciones biológicas, tan normales como ser niño o niña, y que no se opere hasta que el sujeto pueda decidir por sí mismo. Preguntamos a Curtis, al margen de sus genitales, qué se siente él, si hombre o mujer. Se escucha su risa amable antes de contestar: “Ni una cosa, ni la otra”.

Ya es tarde

Juan es un niño de 5 años, el cuarto de cinco hijos. Él y todos sus hermanos nacieron en el campo, pero toda la familia hace unos meses se trasladó a un barrio periférico de Mar del Plata porque el padre consiguió un empleo en el mercado hortícola.

Su mamá lo inscribió en la escuela pública cercana a su casa, en la sala de jardín de 5, para lo que le pidieron un certificado de salud. Juan recibió atención médica alguna vez, pero nunca tuvo un seguimiento médico de control regular, dado que vivían lejos de centros urbanos.

Cuando Juan y su madre concurren al pediatra, el profesional realiza un examen clínico completo. Al volcar sus datos de peso y talla a la tabla de percentilos para el sexo y la edad correspondientes, observa que la estatura se encuentra por debajo del valor normal para su edad y que se encuentra obeso. Nota en su carita una expresión algo tosca y en ocasiones, cuando se encuentra ensimismado en alguna tarea simple, saca su lengua fuera de la boca. Pregunta a su mamá cómo le va en el jardín y la señora comenta que la maestra le dijo que aún no conoce los colores y que está desganado y poco atento. El doctor saca de un cajón un rompecabezas simple de cuatro cubos y se lo ofrece a Juan, mientras le indica unos análisis de sangre y anota en el recetario. Al finalizar la consulta, Juan no logró armarlo. Quince días después de este primer encuentro, el pediatra recibe los resultados de los análisis indicados a Juan. La concentración de T3 y T4 en la sangre es muy baja y la de TSH está elevada. Con estos datos, sumados a los resultados clínicos, el médico hace su diagnóstico, esperando que Juan vuelva pronto a la consulta para iniciar el tratamiento cuanto antes. Aunque probablemente se logren mejoras, algunos problemas en el desarrollo ya son irreversibles.

B: La propiocepción como información para la respuesta del movimiento

Si bien este capítulo hace hincapié en los sentidos exteroceptivos y su integración que luego se vuelve consciente a nivel cortical, la actividad propuesta permite trabajar con un sistema muy poco analizado, el propioceptivo.

El sistema propioceptivo nos da la posibilidad de analizar la gran complejidad del sistema nervioso y la diversidad de estímulos que debe integrar para producir una respuesta homeostática adecuada. Por esa razón esta actividad se presenta como una alternativa interesante tanto por didáctica, como por sorprendente dado su muy escaso conocimiento.

Luego de una necesaria introducción al tema, sobre todo a los conceptos y la terminología indispensable para abordar el texto, se propone una secuencia de dos clases y una actividad evaluativa de cierre.

Clase 1: Se entrega el texto, se propone una lectura comprensiva y luego un momento de puesta en común para debatir las partes que no se hayan comprendido. Luego, la consigna para los estudiantes es responder las siguientes preguntas.

- Describa la función del sistema propioceptivo.
- ¿En dónde se ubican los receptores del sistema propioceptivo?
- ¿Cuál es la respuesta que produce la integración del sistema propioceptivo?
- ¿Cómo logra solucionar su problema Christina?
- ¿Finalmente se cura Christina?

Se realiza una puesta en común de las respuestas producidas, pidiendo que se corrijan las que se alejen de las mejores. Para finalizar, el docente explica que en el texto se encuentran una serie de datos que no se han considerado y que son interesantes para ampliar el tema, para lo cual se solicita se realice una búsqueda que se sugiere que sea en internet, para lograr el acceso a la temática. A partir de la información hallada, para la siguiente clase deberán explicar oralmente los siguientes puntos:

- ¿Qué es y cómo funciona el sistema vestibular del equilibrio?
- ¿Qué es el síndrome de **Guillain-Barré**?
- ¿Qué es la neurosífilis, *tabes dorsalis*, y cómo se produce esta enfermedad?
- ¿Qué es y cómo se hace el análisis de líquido espinal, también llamado líquido cefalorraquídeo?
- ¿Por qué dice el texto que debe usar el oído para poder modular la voz?

Clase 2: Luego de corroborar quiénes trajeron la información solicitada y quienes no, se conforman grupos de 4 o 5 para que debatan y ordenen la información conseguida, y que elaboren 2 preguntas sobre alguna duda que haya surgido en el debate sobre el tema en tratamiento. Luego cada grupo expondrá, a solicitud del docente una de las respuestas elaboradas, pidiendo al resto si pueden aportar datos nuevos a lo dicho, y que lean sus preguntas, las que se anotarán en el pizarrón. Para finalizar se pide que copien las preguntas y se propone que entre todos se elaboren las respuestas, que también se copian en el pizarrón. Los textos y preguntas elaboradas serán motivo de una evaluación en la clase siguiente.

Actividad evaluativa de cierre: No se incluye en esta propuesta la evaluación sobre el tema ya que entendemos forma parte necesaria del contacto del docente con el grupo, sus posibilidades, su realidad y sus intereses, y que por ello puede tomar muy diversas formas. Ad-

herimos además a que el momento de la evaluación es uno más de los momentos del proceso de aprendizaje, y no solo persigue el objetivo de la calificación. Se sugiere sí, que se tengan en cuenta para la evaluación, la interpretación y aplicación de los conceptos de recepción de los estímulos, su transducción, la idea de complejidad, y la generación de las diversas respuestas posibles, vinculando conceptos como niveles de integración, aferencias y eferencias.

La dama desencarnada

Oliver Sacks

(Resumen de uno de los relatos de su libro “El hombre que confundió a su mujer con su sombrero”)

Los tradicionales cinco sentidos están abiertos y conscientes, son evidentes, pero hay un sentido oculto que hubo de, digamos, descubrirlo Sherrington, en la década de 1890. Le llamó «propriocepción», para distinguirlo de la «exterocepción» y de la «interocepción», y, además, por ser imprescindible para que el individuo tenga un sentido de sí mismo; porque si sentimos el cuerpo como propio, como «propiedad» nuestra, es por cortesía de la propiocepción.

¿Hay algo que sea más importante para nosotros, a un nivel básico, que el control y el manejo de nuestro propio yo físico? Y sin embargo es algo tan automático, tan familiar, que no le dedicamos jamás un pensamiento. Este relato es para ejemplificarlo.

Christina era una joven vigorosa de veintisiete años, aficionada al hockey y a la equitación, segura de sí misma, fuerte, de cuerpo y de mente. Tenía dos hijos pequeños y trabajaba como programadora en su casa. Era inteligente y culta, le gustaba el ballet y los poetas laquistas. Llevaba una vida activa y plena, no había estado enferma prácticamente nunca. De pronto, y la primera sorprendida fue ella, a raíz de un acceso de dolor abdominal, se descubrió que tenía piedras en la vesícula y se aconsejó la extirpación de ésta.

Ingresó en el hospital tres días antes de la fecha de la operación y se la sometió a un régimen de antibióticos como profilaxis microbiana. Era simple rutina, una precaución, y no se esperaba complicación alguna. Pero el día antes de la intervención tuvo un sueño inquietante de una extraña intensidad. Se tambaleaba aparatosamente, en el sueño, no era capaz

de sostenerse en pie, apenas sentía el suelo, apenas tenía sensibilidad en las manos, notaba sacudidas constantes en ellas, se le caía todo lo que agarraba.

Este sueño le produjo un gran desasosiego. («Nunca había tenido un sueño así», dijo. «No puedo quitármelo de la cabeza.»)... Un desasosiego tal que pedimos la opinión del psiquiatra. «Angustia preoperatoria», dijo éste. «Perfectamente normal, pasa constantemente.»

Pero luego, aquel mismo día, *el sueño se hizo realidad*. Christina se encontró con que era incapaz de mantenerse en pie, sus movimientos eran torpes e involuntarios, se le caían las cosas de las manos.

Se avisó de nuevo al psiquiatra, en un principio dudoso y desconcertado, «Histeria de angustia», dijo al fin, en tono despectivo. «Son síntomas típicos de conversión, pasa constantemente.»

Pero el día de la operación Christina estaba peor aún. No podía mantenerse en pie... salvo que mirase hacia abajo, hacia los pies. No podía sostener nada en las manos, y éstas «vagaban»... salvo que mantuviese la vista fija en ellas. Cuando extendía una mano para coger algo, o intentaba llevarse los alimentos a la boca, las manos se equivocaban, se quedaban cortas o se desviaban descabelladamente, como si hubiese desaparecido cierta coordinación o control esencial.

Apenas podía mantenerse incorporada... el cuerpo «cedía». La expresión era extrañamente vacua, inerte, la boca abierta, hasta la postura vocal había desaparecido.

—Ha sucedido algo horrible —balbuceaba con una voz lisa y espectral—. No siento el cuerpo. Me siento rara... desencarnada.

Resultaba muy extraño oír aquello, era horrible, desconcertante. «Desencarnada»... ¿estaba loca?

—Es un comentario muy extraño —dije a los residentes—. Es casi imposible imaginar qué podría provocar un comentario así.

—Es problema de histeria, doctor Sacks... ¿no dijo eso el psiquiatra?

—Sí, eso dijo. ¿Pero ha visto usted alguna vez una histeria como ésta?

Hagamos una prueba sensorial... y examinemos también la función del lóbulo parietal.

Lo hicimos y empezó a delinearse un cuadro. Parecía haber un déficit propioceptivo muy profundo, casi total, desde las puntas de los dedos de los pies a la cabeza... Hicimos una llamada de emergencia, pero no al psiquiatra, sino al especialista en medicina física, al fisiatra.

Llegó enseguida, ante la urgencia de la llamada. Se quedó boquiabierto cuando vio a Christina, la examinó rápida y concienzudamente, y luego hizo pruebas eléctricas de la función muscular y nerviosa. «Esto es absolutamente inaudito. » «Nunca en mi vida he visto ni leído una cosa así. Ha perdido toda la propiocepción. Tienen razón ustedes. **No tiene la menor sensibilidad de músculos, tendones o articulaciones. Hay una pérdida ligera de otras modalidades sensoriales: el roce leve, la temperatura y el dolor, y una participación superficial de las fibras motoras, también. Pero lo que ha soportado el daño es predominantemente el sentido de la posición, la propiocepción. »**

—¿Cuál es la causa? —preguntamos.

—Los neurólogos son ustedes. Determinénela.

Por la tarde Christina estaba aun peor. Yacía inmóvil e inerte; hasta la respiración era superficial. Su situación era grave (pensábamos en un respirador) además de extraña.

El cuadro que nos reveló el drenaje espinal indicaba polineuritis aguda, pero una polineuritis de un tipo absolutamente excepcional: no como el síndrome de **Guillain-Barré**, con su complicación motora abrumadora, sino una neuritis puramente (o casi puramente) sensorial, que afectaba a las raíces sensitivas de los nervios craneales y espinales a través del neuroeje.

Se aplazó la operación. Era mucho más urgente aclarar estas cuestiones: «¿Sobrevivirá? ¿Qué podemos hacer?»

—¿Cuál es el veredicto? —preguntó Christina con voz apagada y una sonrisa aun más apagada, después de que analizamos el fluido espinal.

—Tiene usted esa inflamación, esa neuritis... —empezamos, y le dijimos todo lo que sabíamos. Si nos olvidábamos algo, o eludíamos algo, sus preguntas precisas nos obligaban a aclararlo y a revelarlo.

—¿Qué posibilidades hay de mejora? —exigió.

Nos miramos, la miramos:

—No tenemos ni idea.

El **sentido del cuerpo**, le expliqué, lo componen tres cosas: la visión, los órganos del equilibrio (el **sistema vestibular**) y la propiocepción... que es lo que ella había perdido. Normalmente operan los tres juntos. Si uno falla, los otros pueden suplirlo... hasta cierto punto. Le hablé concretamente de mi paciente el señor MacGregor, que, incapaz de utilizar sus órga-

nos del equilibrio, utilizaba en su lugar la vista. Y de pacientes con neurosífilis, *tabes dorsalis*, que tenían síntomas similares, pero limitados a las piernas...

Christina escuchó muy atenta, como con una atención desesperada.

—Lo que yo tengo que hacer entonces —dijo muy despacio— es utilizar la vista, usar los ojos, en todas las ocasiones en que antes utilizaba, ¿cómo le llamó usted?... la propiocepción. ¿No? —Sí —dije— eso es.

Era una suerte que Christina mostrase tanta fortaleza mental desde el principio, porque, aunque la inflamación aguda cedió y el fluido espinal recuperó la condición normal, la lesión de las fibras propioceptivas persistió... de modo que no hubo ninguna recuperación en los ocho años que han pasado ya...

Aquella primera semana Christina no hizo nada, estaba en la cama echada, pasiva, no comía apenas.

Luego, como suele pasar, la vida se afirmó y Christina empezó a moverse. Al principio no podía hacer nada sin utilizar la vista, y se derrumbaba en una masa inerte y desvalida en cuanto cerraba los ojos. Al principio tuvo que controlarse con la vista, mirando detenidamente cada parte del cuerpo cuando la movía, desplegando un cuidado y una vigilancia casi dolorosos. Sus movimientos, controlados y regulados conscientemente, eran al principio torpes, artificiales. Pero luego, y aquí nos sorprendimos los dos muchísimo, afortunadamente, por el poder de un automatismo progresivo que crecía a diario, sus movimientos empezaron a parecer más delicadamente modulados, más armónicos, más naturales (aunque seguían dependiendo totalmente del uso de la vista).

De un modo progresivo ya, semana a semana, a la retroacción inconsciente normal de la propiocepción fue sustituyéndola una retroacción igualmente inconsciente de la visión, un automatismo visual y unos reflejos cada vez más integrados y fluidos. Y a esto podría añadirse también un incremento compensatorio de la imagen o modelo vestibular.

Había sin duda un mayor uso de los oídos al hablar... La modulación del habla es normalmente propioceptiva, se halla gobernada por impulsos que afluyen de todos nuestros órganos vocales. Christina había perdido esta aferencia, y tenía que recurrir por ello a los oídos, retroacción auditiva, como sustitutos.

Así, en el momento que se produjo la catástrofe, y durante un mes después, más o menos, Christina permaneció tan inerte como una muñeca de trapo, no era capaz siquiera de mantenerse sentada erguida. Pero tres meses después me quedé estupefacto al verla sentada

muy correctamente...como una bailarina sorprendida a media pose. Y pronto comprendí que se trataba, en realidad, de una pose. Lo mismo con la voz... al principio se había mantenido casi muda.

Y lo mismo pasaba con la cara, que aún tendía a mantenerse un tanto lisa e inexpresiva (aunque sus emociones interiores fuesen de una intensidad plena y normal), debido a la falta de postura y de tono facial propioceptivo, a menos que recurriese a una intensificación artificial de la expresión.

Pero todas estas medidas eran, como mucho, parciales. Hacían la vida posible, pero no normal. Christina aprendió a caminar, a coger un transporte público, a desarrollar las actividades habituales de la vida, pero sólo ejercitando una gran vigilancia y haciendo las cosas de un modo que resultaba extraño, y que podía descomponerse si dejaba de centrar la atención. Así, si comía mientras hablaba, o si su atención estaba en otra parte, así el tenedor y el cuchillo con terrible fuerza, las uñas y las yemas de los dedos se quedaban sin sangre debido a la presión; pero si aflojaba un poco aquella presión dolorosa, podía muy bien caérsele el cubierto... no había punto intermedio, no había modulación alguna.

Así, aunque no había rastro de recuperación neurológica (recuperación de la lesión anatómica de las fibras nerviosas) había, con la ayuda de terapia intensiva y variada (estuvo en el hospital, o en el pabellón de rehabilitación, casi un año), una recuperación funcional muy considerable, es decir, la capacidad de funcionar utilizando varios sustitutos y otras artimañas

Christina ha triunfado y ha fracasado a la vez de un modo extraordinario. Pero aun sigue y seguirá siempre enferma y derrotada. Ni todo el temple y el ingenio del mundo, ni todas las sustituciones o compensaciones que permite el sistema nervioso pueden modificar lo más mínimo su pérdida persistente y absoluta de la propiocepción, ese sexto sentido vital sin el cual el cuerpo permanece como algo irreal, desposeído.

La pobre Christina está «desmedulada» hoy, en 1985, igual que lo estaba hace ocho años y así seguirá el resto de su vida. Una vida sin precedentes. Es, que yo sepa, la primera en su género, el primer ser humano «desencarnado».

Capítulo 4:

La expresión del genoma en el proteoma

4.1 El ADN, una molécula muy particular: su rol en la autoduplicación y síntesis de proteínas

No es éste un capítulo en donde hablaremos de ya sabidos aspectos sobre la estructura de los ácidos nucleicos, su capacidad de autoduplicarse o los mecanismos en que se expresa en proteínas, ni en las técnicas de la biología molecular. En cambio, nos parece de crucial importancia abordar algunos tópicos que permitirán afianzar conceptos que resultan fundamentales para la comprensión de la circulación de la información genética dentro de la propia célula, en un organismo y en las generaciones sucesivas.

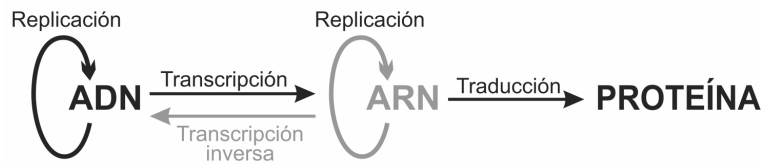
El paradigma dominante en la biología molecular, el famoso dogma central, afirma que la función de autoduplicación del ADN asegura la herencia de la información genética, mientras que la transcripción y la traducción son responsables de su expresión en moléculas diferentes, los polipéptidos.

Comprendidas en este dogma central, cabe resaltar algunas afirmaciones complementarias:

-Además de los polipéptidos, también son funcionales en las células, sin necesidad de traducción, algunas formas de ARN, el ARNr y el ARNt que participan de la síntesis proteica o son reguladores de la expresión de otros genes.

-Los organismos mayoritariamente almacenan información como ADN o como ARN, por ejemplo, algunos virus.

-La expresión génica es unidireccional: El ADN se transcribe a ARN, los que se traducen a polipéptidos, paso que no es reversible. El ARN de los retrovirus se transcribe inversamente a ADN.



Modificaciones posteriores

En los genomas de todos los seres vivos, el ADN es capaz de sintetizar todas las proteínas que cada célula o las células del organismo deben utilizar para cumplir, en forma directa o indirecta, con todas las funciones inherentes a su condición de vivas y participantes de un individuo.

La definición más simple de un gen es una “unidad de ADN que posee la información para especificar la síntesis de una única cadena polipeptídica o un ARN funcional. La mayoría de los genes del núcleo de una célula de un individuo codifican para la secuencia, y por lo tanto para la estructura y función de todas las proteínas que existen en una célula.

Desde el punto de vista molecular, un gen está conformado por la secuencia completa de ácidos nucleicos necesaria para la síntesis de un producto génico funcional (polipéptido o RNA), lo que incluye también las secuencias de regiones que controlan la transcripción, cercanas o alejadas de la región que codifica la secuencia a transcribir y traducir.

Con mayor precisión, podemos decir que un gen codifica un polipéptido, o bien versiones alternativas de un mismo polipéptido, debido al corte y empalme alternativo de sus transcritos.

Desde el punto de vista de la circulación de la información dentro de una célula, son útiles los conceptos de:

Genoma, como el conjunto de la información genética de un organismo, la secuencia de ADN.

Transcriptoma, que es el conjunto de genes que se expresan en condiciones particulares, el grupo de moléculas de ARN que están presentes en un tipo celular, o en cualquier organización compleja, hasta el nivel de organismo.

Proteoma, el grupo de polipéptidos codificados por el genoma entero de cualquier célula.

Dado que las proteínas pueden ejercer su función en forma independiente o como parte de complejos multiproteicos o multimoleculares, en asociación con otras moléculas, el conjunto de todas las interacciones proteína-proteína se denomina **interactoma**.

En base a estas consideraciones, veamos cómo relacionar estos conceptos de la genética molecular con los tradicionales de la genética clásica o mendeliana.

Todas las variantes que puede presentar un gen, de ocurrencia natural en las poblaciones humanas, se denominan alelos. Se reserva el término mutación para un cambio hereditario en el ADN, de aparición novedosa, a consecuencia por ejemplo de la aplicación de un agente mutágeno.

El genotipo es, en sentido estricto, el par de alelos que conforma un gen particular en un individuo, (cuando el individuo es diploide, claro), mientras que el fenotipo se refiere a los atributos físicos o rasgos que son consecuencia de un genotipo dado, o sea a la expresión en proteínas del gen en cuestión.

Cuando los dos alelos para un gen diploide son idénticos, se considera al individuo homocigota para ese gen, mientras que la condición de heterocigosis es disponer de alelos diferentes. Se considera a un alelo recesivo si la expresión fenotípica de la información que contiene depende de su condición de homocigosis. En cambio, un alelo es dominante si sus consecuencias fenotípicas se observan en condición heterocigota.

Una mutación en una región codificante del genoma puede tener diferentes efectos: puede tener escaso o ningún efecto, por lo que se denomina **mutación neutra**, o bien puede dañar o eliminar la función de un gen. En general, los alelos recesivos suelen ser consecuencia de una mutación que inactiva al gen afectado y lo lleva a una pérdida de función parcial o completa. Podrían eliminar la totalidad del gen, sólo una parte, interrumpir la expresión del gen o alterar la estructura de la proteína resultante y por lo tanto su función.

Si ante la ocurrencia de una mutación en un alelo, el otro alelo presente en el individuo produce la suficiente cantidad de proteína como para cumplir adecuadamente con su función, el alelo no mutado o silvestre es dominante. Si esto no sucede, el alelo mutado es dominante. Puede suceder la expresión de un fenotipo intermedio, si el individuo heterocigota produce una cantidad intermedia de proteína, inferior a la que produciría un homocigota para el alelo silvestre.

Los alelos dominantes también pueden ser consecuencia de una mutación que provoca alguna clase de ganancia de función, incrementando la actividad de la proteína codificada, conferiéndole una nueva actividad o conduciendo a un patrón de expresión inapropiado en el espacio o en el tiempo.

Algunos genes son haploinsuficientes, es decir que se requiere de ambos alelos para la función normal. La eliminación o inactivación de un alelo conduce al fenotipo mutante. En algunos casos, una mutación dominante en un alelo puede conducir a un cambio estructural en una proteína que interfiere en la función de la proteína codificada por el otro alelo, lo que se denomina **dominancia negativa**.

Algunos alelos pueden ser considerados dominantes o recesivos, ya que pueden conducir a diferentes fenotipos. El ejemplo clásico es el alelo que produce la anemia falciforme, condición fenotípica que aparece en homocigosis, lo que indica que el alelo es recesivo. Si consideramos la resistencia al paludismo que poseen los individuos heterocigotas, el alelo que la causa se considera dominante.

Las variantes diferentes de un mismo gen se denominan alelos múltiples y su existencia resulta de diferentes mutaciones que producen cambios en la estructura de la proteína expresada. Esto da lugar a que existan individuos heterocigotas con dos alelos mutantes diferentes. El fenotipo del heterocigota en este caso, depende de la actividad de cada alelo mutado.

No necesariamente hay un único alelo silvestre para un locus particular: la aparición de múltiples alelos funcionales en un gen en una población se denomina **polimorfismo**.

La mayoría de las enfermedades hereditarias son producidas por un solo gen, es decir son **rasgos monogénicos**. Sin embargo, muchas enfermedades genéticas siguen patrones de herencia complicados, lo que hace difícil la caracterización de la causa genética de la anomalía. La **heterogeneidad genética** se observa cuando una mutación en cualquiera de múltiples genes diferentes puede causar la misma enfermedad. En otros casos, los alelos de varios genes actuando en forma conjunta son responsables de la aparición o el grado de severidad de la enfermedad. Es el caso de los **rasgos poligénicos**. La diabetes, la obesidad, la predisposición al cáncer y muchos trastornos mentales pertenecen a esta categoría.

El control de la expresión de los genes en bacterias sirve para permitir que la única célula se ajuste a los cambios del ambiente para optimizar su crecimiento y división. Igual sucede en los multicelulares: cambios ambientales inducen cambios en la expresión génica.

ca. Sin embargo, el principal rol del control de la expresión génica en multicelulares es la ejecución de patrones genéticos de diferenciación que permiten el desarrollo embrionario. La generación de los tipos celulares diferentes que conforman un organismo multicelular depende de que suceda la expresión de los genes en los tipos adecuados en los tiempos adecuados. Los patrones de diferenciación sirven al organismo como un todo, ya que muchos de ellos conducen a la muerte de las células individuales. Los genes activadores o represores de la transcripción de otros genes actúan sobre la condensación y descondensación de la cromatina, permitiendo o no la unión de la enzima polimerasa que transcribe el gen para iniciar su expresión.

La herencia **epigenética** se define como la herencia de diferentes estados funcionales que pueden provocar consecuencias fenotípicas, sin ocasionar cambios en la secuencia del ADN, y es la razón por la cual dos individuos con idéntica secuencia de ADN para un rasgo o carácter pueden expresarse en diferentes fenotipos. La causa de estos fenómenos es la existencia de una estructura que se autoperpetúa en un individuo y no depende de la secuencia del ADN. Las estructuras que pueden tener efectos epigenéticos son proteínas que se ensamblan al ADN, modificaciones covalentes de la molécula como la metilación, o priones, que inducen la agregación de subunidades proteicas en una conformación inactiva. En cualquiera de los casos, el estado epigenético es el resultado de una diferencia en la función, por lo general una inactivación, que no depende de la secuencia del ADN sino de la estructura.

4.2 Genes y evolución

La comparación de diferentes genomas ha contribuido a comprender el proceso de la evolución.

El 21% de los genes que constituyen el genoma humano son comunes a eucariotas y procariotas, ya que son codificantes de proteínas esenciales a todas las formas de vida, vinculadas al metabolismo básico, la autoduplicación, transcripción y traducción proteica. Otro 32% se encuentra en los eucariotas en general, codificantes de proteínas inherentes a los eucariotas pero no a los procariotas, por ejemplo, pertenecientes a organelas o componentes del citoesqueleto. En otro 24%, los genes humanos son compartidos por los animales, codificando proteínas vinculadas a la multicelularidad y el desarrollo de los diferentes

tipos de tejido. El 22% de los genes son únicos de vertebrados, y mayormente codifican proteínas del sistema inmunológico y nervioso.

De este análisis se deduce que la evolución de estructuras y funciones especializadas requiere de la adición de nuevos genes que gobiernan las adquisiciones.

La diferencia genética entre los seres humanos y los chimpancés es muy pequeña, con un 99% de similitud. El 29% de las proteínas homólogas entre ambas especies son idénticas, y en el resto las diferencias se basan en uno o dos aminoácidos. Además, las diferencias son cambios a gran escala en la estructura de los genes, o cambios en la regulación génica.

Se denominan *genes constitutivos* a aquellos que se expresan en todos los tipos celulares, porque están involucrados con funciones celulares básicas, mientras que los *genes de lujo* son aquellos que se expresan en grandes cantidades en tipos celulares determinados, que codifican proteínas que ejercen funciones especializadas.

4.3 La universalidad del código genético: la llave de la biotecnología moderna

Hace algo más de 50 años, con una publicación que ocupaba una página, James Watson y Francis Crick pensaban que estaba dando respuesta a muchas preguntas que la biología por entonces se hacía sobre la herencia. Sin embargo, su trabajo dio origen a las preguntas que guiaron a la más importante revolución de la biología que ocupó y ocupa desde entonces el trabajo científico, la biología molecular, y su faceta de aplicación, la biotecnología.

La biotecnología es la interfase entre la ciencia y la industria; reúne al conjunto de metodologías que permiten utilizar en diferentes formas a los seres vivos para la producción de bienes o servicios.

Las bases científicas de la biotecnología interesan a biólogos, químicos, médicos, ingenieros y otras disciplinas, pero también, por su aplicación, son motivo de debate en los ámbitos de la economía, el derecho, la filosofía y la ética.

Pese a que el ser humano desde hace muchos años utiliza otros seres vivos para su provecho, la fase actual de la biotecnología existe desde hace unos sesenta años, ya que sus bases se asientan en el nuevo conocimiento sobre la bioquímica del metabolismo de los organismos y la estructura y función de los ácidos nucleicos.

La llave de la moderna biotecnología es el código genético y su función como sistema de relación entre la información genética y las proteínas. El código genético es un sistema de codificación por tripletes, en el que una secuencia de tres nucleótidos o codón especifica un aminoácido. La mayoría de los aminoácidos son codificados por más de un codón, lo que da al código la calificación de degenerado, aunque la metionina y el triptófano son codificadas por un único codón. Los codones o tripletes tienen el mismo significado en la mayoría de los organismos, por lo cual se dice que es universal. Esta generalidad en la lectura del código genético es exceptuada por muy pocas casos: en las mitocondrias, en los protozoos ciliados y en *Acetabularia*, la planta unicelular. Para la mayoría de las excepciones, el cambio significa que un codón de terminación codifica para un aminoácido, y no que un aminoácido sea leído por un codón alternativo.

El código genético universal es uno de los conceptos básicos para comprender los procesos de la biotecnología moderna, ya que a causa de esta propiedad el ADN de un ser humano puede ser expresado en una bacteria, o una planta puede interpretar la información genética de otra planta diferente. A partir de esto, es posible utilizar técnicas para transferir información genética de una especie a otra, y así poder reprogramar su metabolismo celular. Esto se realiza principalmente en bacterias, pero también en células animales y vegetales, de modo estos **organismos genéticamente modificados** pueden ser utilizados para fabricar nuevos productos o materiales en forma industrial.

La base de conocimiento que utiliza la biotecnología es la relación entre una ruta metabólica en un organismo, con las proteínas y enzima involucradas y la identificación de los genes que las codifican de entre todos los que están presentes en el material genético del organismo. Hoy día se conocen las principales vías de síntesis y degradación de las moléculas y cuáles son las principales enzimas que intervienen catalizando las reacciones básicas del metabolismo celular.

		S E G U N D A L E T R A					
		U	C	A	G		
P R I M E R A L E T R A	U	UUU Fenilalanina UUC UUA Leucina UUG	UCU UCC Serina UCA UCG	UAU Tirosina UAC UAA Codon de terminación UAG	UGU Cisteína UGC UGA Codon de terminación UGG Triptofano	U C A G	
	C	CUU Leucina CUC CUA CUG	CCU Prolina CCC CCA CCG	CAU Histidina CAC CAA Glutamina CAG	CGU Arginina CGC CGA CGG	U C A G	
	A	AUU Isoleucina AUC AUA Metionina (iniciación) AUG	ACU Treonina ACC ACA ACG	AAU Asparagina AAC AAA Lisina AAG	AGU Serina AGC AGA Arginina AGG	U C A G	
	G	GUU Valina GUC GUA GUG	GCU Alanina GCC GCA GCG	GAU Ácido Aspártico GAC GAA Ácido Glutámico GAG	GGU Glicina GGC GGA GGG	U C A G	

Además, para la industria es importante que la producción de la proteína de interés se haga en grandes cantidades, para abaratar el costo de producción.

Por eso, el gen de interés es transferido a una bacteria u otro microorganismo que pueda ser cultivado en fermentadores, donde la proteína se produce en condiciones controladas, en mucha cantidad, como un producto de gran calidad y a un costo económicamente muy ventajoso.

Se logra así un organismo modificado genéticamente que posee en su genoma la información genética necesaria para elaborar una proteína foránea para él en la naturaleza, pero de interés industrial. El organismo modificado ha sufrido una **transformación genética**, de modo que es un **organismo transgénico** y el producto de la transformación es una **molécula recombinante**.

Para este proceso biotecnológico usualmente se utilizan microorganismos que están muy estudiados y de los cuales se conocen exhaustivamente las vías metabólicas que permiten su funcionamiento. *Escherichia coli*, es la bacteria que ha sido utilizada como modelo en la ingeniería genética., debido a que su transformación genética es sencilla, se reproduce en el laboratorio muy rápidamente, y en condiciones muy simples.

Básicamente, el proceso consta de cinco etapas:

1. Verificar que una característica de interés en un organismo está codificada en el ADN, es decir que hay un gen responsable de ella.
2. El gen identificado debe ser "clonado": se lo detecta, se lo aísla y se lo obtiene en un tubo de ensayo.
3. Se debe construir un vector recombinante: utilizando enzimas de restricción y ligasas, se introduce el gen de interés en un vector, que es una molécula de ADN de mayor tamaño que es estable y puede ser utilizada tanto para su almacenamiento como para su incorporación al genoma de otra especie. El gen ahora se denomina inserto, y el vector que lo contiene, es un vector recombinante.
4. Multiplicación del vector recombinante en el laboratorio: si se transfiere el vector a una bacteria y se la hace multiplicar en el laboratorio, también se multiplica el vector. De este modo se obtienen millones de copias del gen de interés inserto en su vector.
5. El gen inserto en el vector se utiliza para transformar una bacteria dando lugar a un organismo genéticamente modificado (OGM) o transgénico.

Además de las bacterias, otros organismos pueden ser genéticamente modificados, hongos, plantas o animales. Si los organismos receptores son vegetales, puede utilizarse un bombardeo con micropartículas para introducir el gen de interés. En los mamíferos, el gen de interés se microinyecta en un óvulo fecundado, de modo que se integre al ADN del cigoto, el cual se implanta en el útero de una hembra preparada para llevar adelante la gestación.

4.4 La actualidad en biotecnología: usando de fábrica a organismos procariotas y eucariotas.

Una vez que la herramienta estuvo lista, no perdió tiempo la industria en utilizar la biotecnología en su beneficio. Algunos ejemplos de la utilización de la biotecnología en la industria son:

- En la industria textil: para el tratamiento de la seda y de la lana se utilizan proteasas obtenidas de bacilos. La catalasa es utilizada para eliminar el peróxido de hidrógeno con el que se blanquean las telas antes de proceder al teñido con los colores definitivos, y luego del proceso de coloreado, las tinturas excedentes que no han quedado fijadas a la tela, se remueven con peroxidasa. En el lavado a la piedra utilizado en la fabricación de la tela de jean se aplica la enzima celulasa, obtenida del hongo *Trichoderma reesei*.
- En la fabricación de detergentes se utilizan enzimas que facilitan la remoción de manchas, por ejemplo las proteasas de *Bacillus licheniformis* y de *Aspergillus flavus*, la lipasa producida por clonación de un gen aislado del hongo *Humicola*, transferido a *Aspergillus oryzae*, o la cutinasa del hongo *Fusarium*, que degrada ácidos grasos y es producida en una levadura genéticamente modificada.
- La industria del papel utiliza enzimas lignolíticas obtenidas biotecnológicamente que degradan la lignina de la madera para la obtención de pasta de celulosa, a menor costo y sin provocar daño al ambiente.
- En la industria alimentaria, *Bacillus subtilis* ha sido transformado para producir alfa-amilasa, que degrada el almidón a dextrinas, utilizadas para la producción de jarabes y cervezas. La glucosa isomerasa que se obtiene de la transformación del *Streptomyces lividens* permite obtener el jarabe de alta fructosa, que se utiliza en la producción de gaseosas cola. Las pectinasas, utilizadas para clarificar los jugos son producidas por un *Aspergillus oryzae* modificado. Otra transformación que ha sufrido este mismo microorganismo permite la producción a nivel industrial de lipasas que se utilizan en la fabricación de concentrados de aceites de pescado.
- *Aspergillus niger* ha sido transformado para la obtención de la enzima catalasa considerada un antioxidante o preservante.
- En la producción de leche deslactosada, se utiliza la enzima galactosidasa inmovilizada, obtenida de *Saccharomyces lactis* y *Escherichia coli* que desdobla la lactosa en glucosa y galactosa. En la fabricación del queso, *Bacillus* transformados permiten aumentar su sabor y aroma agradable y acelerar los pasos para su maduración. El edulcorante aspartamo es un dipéptido asp-fen que se elabora a gran escala a través de la transformación de una cepa de *Escherichia coli*, que posee inserto en su material genético una secuencia codificante de muchos dipéptidos asp-fen.

- En la industria farmacéutica, se elaboran **vacunas recombinantes** en donde por ingeniería genética se eliminan o atenúan los efectos de los genes de la virulencia, o se utilizan microorganismos no patogénicos como vectores, a los que se modifica incorporando una fracción del organismo patógeno que sea capaz de desencadenar la respuesta inmune. También se puede incorporar un gen de un patógeno en bacterias o levaduras que se mantienen en cultivo produciendo una proteína foránea que es utilizada como vacuna, como la desarrollada para la hepatitis B.

Muchas enzimas son utilizadas para el seguimiento de la respuesta de un individuo a un fármaco. Por ejemplo, para el análisis de la colesterolemia, es decir el nivel de colesterol en la sangre se utiliza la enzima colesterol oxidasa, que se obtiene a partir de *Pseudomonas fluorescens* en cultivo. En el tratamiento de algunas enfermedades, heridas o quemaduras, es posible utilizar las enzimas tripsina o colagenasa para eliminar tejidos afectados, o para acelerar el crecimiento de tejido nuevo y sano. El uso de anticuerpos monoclonales para sistemas de diagnóstico que permiten detectar la presencia de drogas, metabolitos o antígenos en sangre u otros fluidos biológicos, también es un desarrollo biotecnológico.

En la minería se utiliza el proceso de **biolixiviación o lixiviación microbiana**, que consiste en el ataque y la solubilización de un mineral a través de la acción directa o indirecta de distintos microorganismos. En 2004 en Chile se descubrió una nueva bacteria con capacidad biominera, se estudió profundamente su material genético y se identificaron los genes que son responsables de acelerar el proceso de extracción, especialmente los que permiten la disolución de la calcopirita, que es el mineral en el que se encuentra el cobre.

El desafío para las nuevas técnicas es hacer más eficiente el proceso de la obtención de los metales, al costo más bajo posible y con el menor impacto ambiental.

Actualmente se están desarrollando bacterias para recuperar el oro presente en el descarte tecnológico o para evitar la contaminación por el cobalto y el litio que se desprende de las baterías de los celulares en desuso.

Los biocombustibles como el bioetanol y el biogás se producen biotecnológicamente. El bioetanol puede producirse a partir de desechos agrícolas, utilizando levaduras del género *Saccharomyces* genéticamente modificadas. El biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales por transesterificación usando enzimas recombinantes cuyos genes fueron transferidos a bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Corynebacterium* y *Bacillus*. Otro pro-

yecto biotecnológico consiste en lograr bacterias transformadas para obtener metanol de la pulpa de la remolacha azucarera.

La biorremediación también ha sido mejorada mediante el desarrollo de organismos descontaminantes modificados. Por ejemplo, la enzima reductasa del ion mercúrico, interviene en la transformación de las formas altamente tóxicas del mercurio en sustancias menos nocivas. Se ha introducido exitosamente el gen de esta enzima presente en bacterias en una especie de álamo, el cual así modificado crece cómodamente en ambientes con altos niveles de mercurio, transformando este tóxico en un gas inocente.

Se han desarrollado biotecnológicamente plantas transgénicas de tabaco que poseen genes bacterianos que permiten detoxificar los suelos contaminados con municiones o explosivos provenientes de minas. A algunas cianobacterias se les ha introducido genes de *Pseudomonas* para generar microorganismos con capacidad de degradar hidrocarburos o pesticidas.

4.5 Los transgénicos en debate. Ventajas y desventajas. La biología y la política

Los organismos genéticamente modificados tienen muchos detractores, y han sido puestos en el banquillo de los acusados en ocasiones con argumentos basados en la percepción y la incertidumbre que genera un nuevo desarrollo, más que en base a argumentos científicos sólidos. La verdad es que no es fácil saber qué riesgos conllevan y a qué se deben. Analicemos algunos fundamentos que pueden ayudarnos a generar un criterio propio respecto de las ventajas y desventajas de su utilización.

En principio, los riesgos asociados son inherentes a la misma tecnología que los desarrolla, ya que se parte de algunas premisas tradicionales de la biología molecular:

- Los genes determinan las características de un organismo en una forma unidireccional e irreversible;
- Los genes y el genoma son estables, la información se transmite sin cambios, excepto cuando existen mutaciones;
- Los genes no son modificados por el medio ambiente, ni actúan en respuesta a él sino que cambian al azar;
- Luego de ser insertados en un organismo nuevo los genes no cambian de lugar, permanecen donde fueron introducidos.

Sin embargo, a inicios de los años ochenta, estos principios básicos comienzan a cuestionarse, apareciendo el concepto del “genoma fluido”, con algunas premisas en contradicción con los preceptos tradicionales:

- Los genes funcionan en una red bastante más compleja en donde la causalidad no es lineal sino multidimensional y existe retroalimentación, es decir que todo el sistema está conectado: los genes influyen en otros genes, las proteínas en otras proteínas e inclusive las proteínas pueden influir en los genes;
- Los genes están sujetos a una regulación e influencia de la fisiología del organismo y del ambiente;
- Los genes son fluidos dinámicos que cambian de acuerdo a la presión del medio ambiente;
- Los genes saltan de forma horizontal entre especies no relacionadas, es decir no solo por la transferencia vertical de genes de padres a hijos que se da en la reproducción, sino a través de procesos infecciosos.

La técnica aplicada para la creación de los OGM parte del principio de que los genes tienen una función en sí mismos, sin tener en cuenta ningún otro factor interno o externo al organismo. El conocimiento científico sobre el funcionamiento fluido del genoma es todavía muy limitado y desde esta perspectiva resulta imposible predecir el comportamiento de los nuevos genes introducidos en ecosistemas complejos.

En segundo lugar, ocupa la atención de los detractores, la utilización de la biotecnología en la agricultura. En este campo, se han generado construcciones artificiales que rompen las barreras de las especies, y que pueden dar lugar a efectos impredecibles, como la aparición de toxinas y alérgenos inesperados. En la actualidad sólo una docena de alimentos pueden producir reacciones alérgicas, principalmente debido a proteínas presentes en esos alimentos, pero con la transgénesis este número puede aumentar considerablemente, puesto que se incorporan en los alimentos proteínas no tradicionales de las cuales no existe información alguna sobre sus propiedades alérgicas. Por lo tanto, es posible que la comercialización de alimentos que contengan productos genéticamente modificados, ocasione que los individuos particularmente sensibles desarrollen alergias a alimentos que anteriormente consumían sin peligro. De allí, la necesidad del adecuado etiquetado de los OGM para consumo humano.

La aplicación de la transgénesis a la agricultura y ganadería puede disminuir la utilización de productos químicos, tiempo y herramientas, y esto contribuiría a reducir la contaminación ambiental, las emisiones de gases de efecto invernadero y la erosión del suelo. En contraposición a estos supuestos beneficios ambientales, se menciona que en la actualidad se están utilizando muchos más productos químicos en los cultivos transgénicos que en los convencionales.

Los OGM que poseen alguna ventaja competitiva respecto de sus variantes naturales, como por ejemplo la mayor resistencia a la salinidad, a la sequía o a las bajas temperaturas, pueden ocasionar la invasión de hábitats que no les son propios y cuyo equilibrio se vería entonces amenazado al desplazar a otras especies o favorecer su extinción.

Las variedades transgénicas contaminan genéticamente a otras variedades de la misma especie o a especies silvestres emparentadas, en forma impredecible. La polinización depende de factores naturales y por lo tanto es imposible de ser controlada. Un riesgo relacionado con esto es que el escape de animales y vegetación genéticamente modificados pueden crear nuevos organismos que puedan dejar fuera de competencia a los animales y las poblaciones de plantas naturales, provocando la extinción de especies y la disminución de la biodiversidad.

Los más cautos en la incorporación de los organismos transgénicos indican que su aprobación rápida ha resultado de un análisis liviano tanto de la de la comunidad científica como de de las entidades reguladoras. Los estudios en los cuales se basa su aprobación están fundados en conclusiones sobre la inocuidad de los transgénicos obtenidos en trabajos que han sido criticados por omitir ciertas consideraciones, por ignorar evidencia científica y por ser realizados por las mismas empresas.

Aunque no podemos decir que estos posibles riesgos de tipo biológico no son poco importantes, hoy sabemos fehacientemente que las consecuencias más terribles del uso de los OGM se encuentran vinculadas a cuestiones económico-sociales.

Los OGM refuerzan el control de la alimentación mundial por parte de unas pocas empresas multinacionales, y no constituyen en absoluto un medio para luchar contra el hambre. El problema del hambre se debe al mal reparto de los recursos y debe resolver con decisiones políticas⁷. En las condiciones actuales de organización de los mercados, un

⁷ Durante la crisis alimentaria argentina del año 2001, en la que los casos de desnutrición fueron tan graves que la ONU abrió una oficina de control en Buenos Aires, las exportaciones de soja y maíz argentinos siguieron

aumento de la producción no serviría para abastecer a quienes lo necesitan, sino para aumentar la concentración de la riqueza.

Los países que han adoptado masivamente el uso de cultivos transgénicos son claros ejemplos de una agricultura no sostenible. Esto se cumple en el caso de Argentina, en referencia al cultivo de la soja. Esta especie es una oleaginosa de mucha importancia económica ya que su contenido proteico es alto y de calidad. Dentro de la composición química de las proteínas que contiene, hay 8 aminoácidos esenciales.

Hasta la década de 1970, la soja casi no se cultivaba en nuestro país. En la actualidad esta oleaginosa constituye la mitad de todos los granos que se producen en Argentina. Esta expansión ha colocado a nuestro país como uno de los principales países productores del poroto de soja como materia prima, pero también como el principal abastecedor mundial en aceites y pellets de soja, que resultan de una primera industrialización de esta oleaginosa.

La soja que hoy se cultiva en nuestro país es un desarrollo de la biotecnología moderna, ya que fue el primer producto obtenido por transgénesis que se incorporó al mercado nacional. El objetivo de su mejoramiento mediante la ingeniería genética fue lograr una planta resistente a un herbicida, el glifosato. Este químico elimina malezas, dado que inhibe la acción de enzimas sustanciales para la síntesis de algunos aminoácidos. La soja transgénica es tolerante al glifosato, ya que posee inserto en su material genético un gen aislado de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* que produce una enzima que no es inhibida por el glifosato.

Por lo tanto, si se aplica a una parcela este herbicida, todas las hierbas mueren, salvo aquellas resistentes o tolerantes, como lo es la soja transgénica.

En nuestro país, la superficie sembrada con soja ha sufrido un aumento exponencial. A partir del inicio la siembra de la soja transgénica en 1996, ha llegado a superar los 16 millones de hectáreas sembradas en el año 2008, e incrementándose en medio millón de hectáreas cada año. Este proceso exacerbó la crisis de la agricultura argentina, ya que se produce a partir de la ampliación de la frontera agropecuaria, con un alarmante incremento de la destrucción de sus bosques primarios para aprovechar el terreno para la siembra de soja, el importante desplazamiento de campesinos y trabajadores rurales, un aumento del uso de herbicidas y una grave sustitución de producción de alimentos para consumo.

alimentando a las ganaderías de los países ricos.

Este fenómeno es particularmente marcado en las provincias de Santiago del Estero, Salta, Córdoba y Chaco. Paralelamente, el área destinada a campos de producción ganadera se ha reducido en un 15%, con la consiguiente disminución del número de cabezas de ganado que se crían.

Esta reorganización de la agricultura de nuestro país, que conduce hacia una forma de cultivo único o monocultivo, ha deteriorado otras producciones tradicionales provocando el desabastecimiento del mercado interno de productos agrícolas que ahora deben ser importados o se han encarecido de modo notable.

Paralelamente al crecimiento del cultivo de la soja, se observa un proceso de despoblamiento de las áreas rurales como consecuencia del menor requerimiento de mano de obra.

Cuando los profesionales del INTA son consultados acerca de los beneficios de la soja transgénica, en todos los casos la respuesta es que no hay mayores rindes, sólo mayor comodidad en la labor del productor y una reducción de los costos que ronda el orden de un 15 por ciento. Si bien este beneficio es atendible, la realidad es que los que hacen el verdadero negocio son las corporaciones multinacionales que venden las semillas genéticamente adaptadas a los químicos que también venden. La introducción de los OGM en la agricultura exacerba el monopolio: una gran proporción de nuestra agricultura se ha tornado altamente dependiente de insumos importados cuya disponibilidad y precios son controlados monopólicamente por empresas multinacionales extranjeras. Los productores sólo son parte del negocio.

4.6 Terapia génica en humanos.

Otro campo para la aplicación de la biotecnología es el de la salud humana. Es muy tentador y deseable que, en vez de aplicar un medicamento que intente paliar una enfermedad, se elimine la causa genética que la provoca. La terapia génica se define como el conjunto de técnicas que permiten vehiculizar secuencias de ADN o de ARN al interior de células diana, con el objeto de modular la expresión de determinadas proteínas que se encuentran alteradas, revirtiendo así el trastorno biológico que ello produce.

Esta definición general permite dos estrategias posibles: la terapia génica somática, en donde la corrección de un defecto genético se realiza en células somáticas, por lo

cual la terapia no se transmite a los descendientes, o bien la terapia génica germinal, donde la inserción de un gen terapéutico se dirige a óvulos, espermatozoides o a un óvulo fecundado.

La terapia génica somática ha centrado sus esfuerzos en el tratamiento de enfermedades hereditarias monogénicas, como las hemofilias, fenilcetonuria, deficiencia de ADA (adenosina desaminasa), fibrosis quística, distrofia muscular, hipercolesterolemia familiar, etc. Las enfermedades poligénicas, por el momento no son objeto de la terapia génica. Una consideración especial es el caso del cáncer, ya que aunque esta patología se considera poligénica, porque responde a la acumulación de errores o mutaciones durante la vida del individuo en más de un gen de aquellos que controlan la división celular, la muerte celular programada (apoptosis) o los sistemas de reparación de errores, se ha experimentado en la terapia génica mediante diferentes estrategias.

Se han hecho ensayos de terapia génica con dos técnicas diferentes: la terapia génica *in vivo*, en donde la modificación genética de la célula sucede en el interior del organismo, por ejemplo, la incorporación de una copia sin errores del gen de la alfa-1 antitripsina en células pulmonares o hepáticas en pacientes con enfisema pulmonar o cirrosis, fruto de la deficiencia de esta enzima, o en la introducción del gen de la distrofina en tejidos musculares en pacientes con distrofia muscular.

En la estrategia *ex vivo* de la terapia génica, la manipulación genética ocurre fuera del organismo, dado que se extraen las células del paciente, se cultivan en el laboratorio, se les introduce el gen terapéutico y se reintroducen en el paciente. Este proceso es más fácil de realizar sobre células del sistema hematológico, a través de una punción de médula ósea, la purificación de células madre, la transferencia a ellas del gen funcional, y su reintroducción al paciente. Esta metodología se ha utilizado para el tratamiento de la inmunodeficiencia combinada severa (SCID) por deficiencia de ADA (los conocidos como chicos de la burbuja).

La principal dificultad técnica de la terapia génica se centra en la introducción del gen terapéutico en las células, problema que la biología molecular está tratando de resolver arduamente.

Por cuestiones de accesibilidad a los tejidos u órganos blanco, este proceso es aún más difícil en la terapia génica *in vivo*. Otro punto clave a considerar en la terapia génica *in vivo* es la reacción inmunológica que puede atacar las células genéticamente modificadas.

Para cualquier tipo de transferencia génica es necesario un vector que transporte, proteja y transfiera el gen terapéutico de forma segura y eficaz y que además le confiera la especificidad de alcanzar únicamente a las células blanco. Tradicionalmente se han utilizado los virus humanos con especificidad natural para determinados tejidos como vectores, aunque esto puede conllevar riesgos porque debido a la recombinación pueda activarse un oncogén o generarse nuevos virus con capacidad infecciosa desconocida.

La inserción de un gen suele ocurrir casi al azar: si lo hacen en regiones de cromatina muy condensada, su expresión puede no suceder o hacerlo en niveles insuficientes.

En algunas ocasiones, la integración puede provocar la muerte de la célula receptora, cuestión que no tendría mayor inconveniente salvo para la única célula receptora, pero si la integración perturba los patrones normales de expresión de genes que controlan la división o la proliferación celular, puede descontrolarse el ciclo celular generando un cáncer.

Inicialmente se deseaba que el objetivo de inserción del gen terapéutico sucediera en el lugar preciso que naturalmente ocupa en el genoma, lo cual es muy difícil de controlar. Sin embargo, hoy se conoce que no es necesario, y que el gen terapéutico puede ser funcional desde otras localizaciones, ya sea dentro de cromosomas o de forma extracromosomal, como en episomas o minicromosomas autónomos. Si el gen terapéutico tiene esta localización extracromosómica y las células tratadas están dividiéndose activamente, podría suceder que el gen introducido no segregue igualmente en las células hijas, por lo cual la expresión a largo plazo puede resultar comprometida. En ese caso, harán falta tratamientos repetitivos para sostener la expresión de la proteína terapéutica.

Aunque aún quedan pendientes serias cuestiones técnicas para ser utilizado terapéuticamente, un fenómeno natural, la interferencia por ARN o silenciamiento génico se encuentra en amplio desarrollo como método para inactivar o silenciar cualquier gen celular o viral en forma específica. Básicamente, la técnica consiste en generar un oligonucleótido que por complementariedad de bases interactúe con el ARN mensajero del gen en cuestión, impidiendo su traducción.

El oligonucleótido puede administrarse directamente, o bien promoverse su expresión.

Para la administración se ha ensayado la microinyección directa y diversos métodos de liberación a partir de su incorporación al interior de liposomas o la formación de complejos con lípidos cargados positivamente.

Hoy, esta técnica se encuentra en fase de desarrollo avanzada para el tratamiento de infecciones virales y bacterianas, y también para el tratamiento de enfermedades genéticas causadas por mutaciones dominantes. Las investigaciones se han centrado en citomegalovirus, HIV-1, virus respiratorio sincicial, hepatitis B y C, el virus del papiloma humano, y cánceres en general.

Cuando el objetivo de la terapia génica es la oncología, el carácter multigénico de esta patología, como indicábamos, requiere de diferentes abordajes: en líneas generales, sería útil aumentar la actividad antitumoral por medio de citoquinas, incrementar la inmunogenicidad del tumor introduciendo antígenos foráneos, introducir genes supresores de tumores, o un gen "suicida" o de sensibilidad aumentada a determinados fármacos, bloquear la expresión de oncogenes, o bien eliminar las células tumorales mediante adenovirus oncolíticos, o tratar de reducir la angiogénesis que promueven los tumores mediante la terapéutica con genes de efecto antiangiogénico.

La realidad es que los esfuerzos científicos en el desarrollo de la terapia génica llevan 30 años, aunque los resultados son aún limitados. A medida que se consigan avances en la biología molecular y los sistemas de transferencia génica, se podrá incrementar el éxito en el uso de la terapia génica.

Bibliografía seguida y para seguir:

Alberts B et al. (2004) *Biología Molecular de la Célula*. Edit. Omega. 4ª edición

Castillo-Carvajal L y Barragán-Huerta BE. 2011. Aplicaciones biotecnológicas de microorganismos

Figura 4: halófilos. Revista Sistema Ambientales, Vol. 4, No 2, p. 45-54

De Robertis E Hib J. *Biología celular y molecular* (2012) Promed, Buenos Aires, 16 edición

Lodish H et al. (2005) *Biología celular y molecular*. 5ta. Edición, 1088 pp. Panamericana, Buenos Aires.

Actividad para el aula

Juego “Síntesis de proteínas”

El objetivo de esta actividad es el de llegar hasta el nivel molecular en la secuencia de respuestas posibles, ante un estímulo determinado, tal como lo es la expresión génica. Corresponde a la tercera unidad del tercer año de Secundaria, que aborda el concepto de la expresión génica como respuesta celular, el código genético, la regulación génica, y las diversas funciones de las proteínas.

La enseñanza de esta parte de la biología suele ser complicada y tediosa, y la mayoría de las veces queda a mitad de camino. Es por eso que se propone una actividad lúdica que permite recrear y ejemplificar con acciones corporales y esquemáticas algunos de los mecanismos generales que nos interesa que sean incorporados.

Es de destacar que el “Juego de síntesis de proteínas” requiere de un esfuerzo inicial del docente en cuanto a que todos los elementos del juego deben ser impresos en autoadhesivo a color, pegados sobre cartón o goma imantada y recortados. De todos modos es un esfuerzo que entendemos que vale la pena dada su utilidad y que le queda al docente, y/o a la escuela, como material didáctico. Los materiales para armarlo se disponen al final del libro.

Sección 3:

Energía y materia en movimiento

Introducción

Como ya lo hemos mencionado, en la escuela secundaria la materia Biología se enmarca en los propósitos generales de la Educación Secundaria y en el más específico de “Alfabetización Científica” (A.C.) de las Ciencias Naturales. El actual diseño curricular orienta la enseñanza de la Biología invitando a superar la habitual transmisión “aséptica” de conocimientos disciplinares, incluyendo una aproximación a la naturaleza de la ciencia, a la práctica científica y, sobre todo, pone énfasis en las relaciones ciencia-tecnología-sociedad (CTS), con vistas a favorecer la participación ciudadana en la toma de decisiones fundadas en argumentos científicos.

Biología de cuarto año está centrada en los procesos que involucran las transformaciones de la materia y la energía en los distintos niveles de organización, desde el celular, pasando por los sistemas de órganos (con énfasis en el organismo humano) hasta los ecosistemas. En este sentido se retoma con mayor profundidad el enfoque sistémico. Por otra parte, en cuarto año se continúa con otra de las dimensiones fundamentales que estructuran la enseñanza de la Biología y que reúne contenidos vinculados con las implicancias éticas, culturales y sociales de la producción de conocimiento biológico.

La ecología es una ciencia autónoma con herramientas conceptuales y metodológicas particulares que permiten el estudio holístico y sistémico de la vida y sus complejas interacciones. A partir de este enfoque integrador, el diseño curricular incentiva a que el docente haga énfasis en las siguientes nociones: las interacciones entre subsistemas de

un sistema mayor; las interacciones entre los sistemas y su entorno; las propiedades emergentes de los sistemas en los distintos niveles de organización; la relación estructura/función; la complejidad de los sistemas en función tanto de la variedad de elementos que los componen como de las interacciones que se establecen entre ellos; la definición de los límites de un sistema en función del objeto de estudio; el equilibrio y la regulación de los sistemas biológicos.

Al estudiar la dinámica de los ecosistemas, se recomienda promover instancias de reflexión y debate relacionadas con el impacto de la actividad del ser humano sobre el ambiente junto con el abordaje que conceptos científicos. Una oportunidad para realizar este acercamiento lo brinda el análisis de los ecosistemas artificiales, principalmente los llamados agroecosistemas. Se debe destacar el hecho de que el hombre requiere de su producción agrícola para maximizar la productividad primaria neta y coartar la posibilidad de que la biomasa producida se incorpore a las cadenas tróficas naturales, lo cual produce inmensos impactos ambientales. El primero y principal de ellos es la pérdida de la biodiversidad. El docente debe proponer el análisis de casos en los que la agricultura introduce factores que inciden en la modificación de los ecosistemas, como por ejemplo la contaminación asociada a la utilización de diversos agroquímicos y su incorporación en los cursos de agua. La exposición y el análisis sobre casos concretos de las perspectivas complementarias y divergentes aportadas desde la ecología científica y la ecología política (o ecologismo) resultará de particular interés en el abordaje de estos contenidos.

Por otra parte, el diseño curricular indica que al estudiar al organismo humano en relación con la función de nutrición, se quiere enfatizar el estudio del hombre como fenómeno biológico ya que comparte sus funciones universales con el resto de los seres vivos, y a la vez como parte de un fenómeno cultural y social que es propio de nuestra especie y que por lo tanto nos caracteriza. La temática nutrición humana presenta un "status de múltiple", es decir, sus niveles de complejidad responden a diversas zonas de contenidos (bioquímico, psicológico, productivo, biotecnológico, etc.). Esto lleva a pensar en la importancia de abordar el tema desde los diversos aspectos que conforman este contenido, acordando con la propuesta del diseño curricular.

Este capítulo se basa en el análisis del modelo agrario actual como caso de estudio, su impacto sobre los ecosistemas y un acercamiento a modelos alternativos de producción agrícola. Finalmente se consideran aspectos vinculados a la nutrición, su relación con el

modo actual de producción de alimentos, las problemáticas de un acceso desequilibrado a estos y la función digestiva como el principal sistema relacionado con la alimentación humana.

Capítulo 5:

La ecología en acción: el modelo agroexportador bajo la lupa

Introducción

¿Cuánta gente puede identificar más tipos de aves que de autos? ¿Cuántos pueden identificar más especies de plantas nativas que logos de marcas comerciales? Probablemente la respuesta sea desalentadora. Hay ciudades en las que los adolescentes pueden reconocer un arma automática por el sonido de su disparo antes que a un ave por su canto. En parte, esto puede deberse a que para la mayoría de la gente no le son familiares los conceptos de “ecología” y “conservación de la biodiversidad” y las variables e ideas asociadas a ellos. En principio, la palabra “ecología” se usa con distintas acepciones, ya sea desde la escuela, los medios de comunicación, el sentido común, los programas de formación docente o los libros de texto. En la actualidad, la ecología se circunscribe básicamente a dos significados: como disciplina científica o como movimiento social (o ecologismo). Este último, también llamado *ambientalismo*, encarna un conjunto de pensamientos, acciones y comportamientos acerca del medio natural, pero en el que no siempre están presentes los conocimientos científicos. A su vez, el desconocimiento de éstos conceptos vinculados a la ecología puede deberse a un creciente sentimiento de *ecofobia* en los estudiantes, como en el público en general, cuando en el tratamiento didáctico o en los medios de comunicación se pone énfasis en los problemas del ambiente y sus secuelas (como por ejemplo, la deforestación, la contaminación, la desertización, etc.). En este caso, es posible que los niños y los jóvenes

se alejen del mundo natural en lugar de vincularse con él; porque si la naturaleza es maltratada no querrán acercarse a ella.

Por su parte, los ecólogos han resaltado que los conceptos disciplinares más relevantes que un ciudadano o funcionario debe saber, cuando se trata de comprender el funcionamiento de un ecosistema y las acciones que se deben realizar para lograr un manejo adecuado de éste, son: las conexiones múltiples que ocurren en los ecosistemas, el equilibrio dinámico de los sistemas biológicos, el contexto y la escala en la que ocurren los procesos ecosistémicos, la complejidad de las comunidades y las relaciones emergentes de sus componentes. El concepto de *biodiversidad* también ha ido ganando protagonismo en distintos ámbitos, como en política, administración y ciencia. Pero usualmente se asocia a la biodiversidad únicamente con el número de especies, cuando en realidad el concepto abarca distintos niveles de organización, desde el nivel genético hasta el nivel de comunidades.

En la enseñanza de la ecología en la escuela se espera que los estudiantes puedan desarrollar capacidades e instrumentos cognitivos y afectivos necesarios para comprender, formar opinión y actuar ante problemáticas socioambientales que incluyen componentes de conocimiento biológico.

Cuando en las clases de ciencia se abordan temas ambientales, surgen algunos obstáculos, como el desconocimiento de las problemáticas ambientales locales, el escaso tiempo de los docentes para trabajar con otras disciplinas y las ideas previas que tienen los estudiantes frente a temas ecológicos estructurantes. Con referencia a este último aspecto, se pueden citar varios ejemplos: el término *ecosistema* es definido por el alumnado como un “trozo” de naturaleza de límites rígidos, en el que cuesta encontrar relaciones de causa-efecto y muchas veces asignado solo a los seres vivos; aflora una presunción de bondad y armonía de los elementos de la naturaleza por el solo hecho de ser “naturales”; hay dificultades en la comprensión de las *redes tróficas*, y las interrelaciones que conforman el ciclo de la materia y el flujo de energía. Por lo general, se reconocen interacciones lineales y unidireccionales. A su vez hay dificultades en comprender que los seres humanos formamos parte de esas interacciones y que nuestras actividades también modifican los ecosistemas. En cuanto a las ideas previas asociadas a las *perturbaciones*, aparece el pensamiento mágico para el ganado y los nutrientes del suelo (“si son elementos de la naturaleza no harán daño al ambiente”); o que los disturbios como las lluvias, inundaciones o in-

endios siempre tienen consecuencias catastróficas. Los estudiantes suelen pensar que los contaminantes solo producen efectos cuando tienen contacto directo con los organismos y que los “problemas ambientales” se restringen a la contaminación. Finalmente, algunas ideas previas asociadas con la *biodiversidad* muestran que los estudiantes la limitan a la diversidad de plantas y animales; que tanto los niños como los jóvenes van perdiendo las oportunidades que tienen de experimentar con la naturaleza para amarla y comprender su diversidad y que no reconocen el vínculo entre la biodiversidad y la capacidad de amortiguamiento que tiene un ecosistema para resistir a una perturbación.

Por todo esto, es importante que la escuela considere el fuerte vínculo que existe entre lo social y lo ecológico. Es necesario fortalecer el vínculo emocional de los jóvenes con las criaturas de la naturaleza, buscar oportunidades para explorar los alrededores urbanos y rurales, para finalmente trabajar sobre los problemas de la propia comunidad. Se debe tener en cuenta que la ecología, como disciplina científica, le otorga validez a los problemas ambientales en tanto ofrece conocimientos y métodos para su descripción, solución y control; aporta elementos sólidos al debate social como una visión biocéntrica que supera al antropocentrismo que predomina en nuestra cultura. Comprender la ecología como disciplina permite hacer un uso político y social de ella, nos permite intervenir como ciudadanos para hacer valer nuestros derechos e intereses. En este sentido, los agroecosistemas aparecen como un modelo interesante para analizar desde la perspectiva de la ecología, estudiando sus componentes y las interacciones entre ellos. Sobre todo, el rol de la especie humana en la modificación y administración de los recursos naturales, los problemas emergentes y las alternativas para que las políticas públicas garanticen la sustentabilidad del sistema de producción y la soberanía alimentaria de los pueblos.

1. Manejo y transformación de la naturaleza por el humano: agroecosistemas

El origen del cultivo de plantas en América del Sur puede ubicarse, según hallazgos arqueológicos, hace casi 8000 años a.C. Según los investigadores, las mujeres fueron las creadoras de los cultivos. Hay ilustraciones que reflejan la participación de las mujeres en las actividades agrícolas del imperio incaico, y siempre son ellas quienes siembran las semillas,

plantan y luego cosechan; mientras que los hombres son representados labrando la tierra con la "taclla", una herramienta con forma de bastón que utilizaban para cavar. En algunas sociedades de Australia, la mujer cava en búsqueda de los tubérculos pidiendo a la planta que sea buena, generosa y de gran tamaño. Una vez fuera de la tierra, es costumbre que la mujer se lamente y riña a la planta ordenándole volver y producir algo mejor; mientras realiza esto, corta la parte superior, luego la vuelve al hoyo y orina encima de ella.

Los antiguos humanos, debido a sus hábitos nómades, conocían muy bien los recursos alimenticios que les proveía la naturaleza y, dotados de su palo recolector que utilizaban también como palo de sembrar o de plantar, comenzaron a modificar su entorno, creando los agroecosistemas que le aseguraron una relativa independencia del ambiente. La extensión de los cultivos era de cerca de unos 4 m² a unos 16 m² como máximo, y eran trasladados de acuerdo con el recorrido de los agricultores, promoviendo así distintas vías por las que se podía mantener la variabilidad de las especies cultivadas.

Bastante alejada de estas prácticas se encuentra la agricultura moderna que conocemos hoy, en la que la tecnología dejó de ser un simple bastón de madera, incorporando en sus rutinas el uso de maquinarias más sofisticadas, la aplicación de agroquímicos y el uso de variedades híbridas de alto potencial de rendimiento.

Las formas en las que la sociedad ejerce la apropiación de la naturaleza puede ocurrir de distintas maneras, pero entre una amplia variedad, se pueden distinguir dos formas completamente opuestas: el **modelo campesino** y el **modelo agroindustrial**. La distinción de estos modelos a través de distintos criterios representa formas extremas del uso de los recursos (Tabla). En la realidad existen una amplia gama de situaciones para cada uno de los criterios y de sus combinaciones que muestran el grado de complejidad que se puede encontrar. Estas combinaciones evidencian el distinto grado en que el modelo campesino sufre la transformación por procesos "modernizadores" para cambiar hacia un modelo agroindustrial. Pero queda claro que bajo el concepto de "modernización", "desarrollo" o "progreso" se está destruyendo el modo campesino de manejar la naturaleza, con todas las consecuencias y los problemas que eso implica.

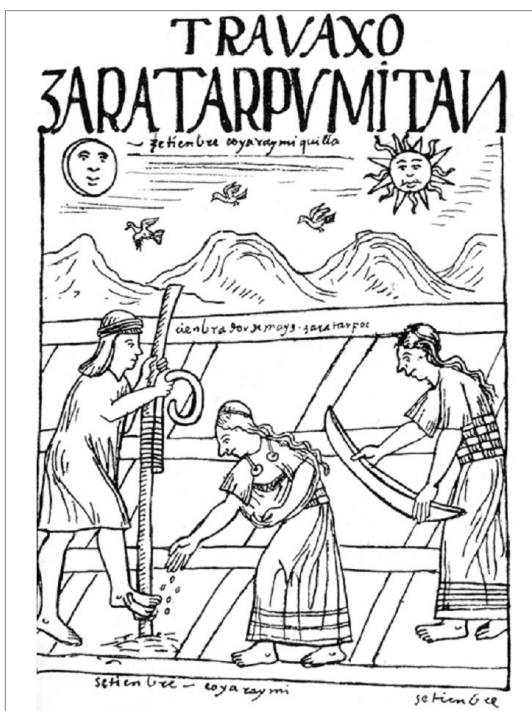


Figura: Siembra de maíz en septiembre.



Figura: Cosecha de maíz en mayo

Tabla: Atributos del modo campesino y agroindustrial (tomado de Martínez Castillo, 2004)

Crterios	Modelo campesino	Modelo agroindustrial
Tipo de energía usada durante la producción	Energía solar, leña.	Predomina energía fósil (gas, petróleo).
Escala de la actividad productiva	Pequeñas parcelas o áreas de producción.	Áreas medianas o grandes de producción.
Grado de autosuficiencia de la unidad productiva rural	Alta. Cubre necesidades colectivas. Uso de pocos insumos externos.	Baja o nula. Cubre intereses privados. Alto uso de insumos externos.
Fuerza de trabajo	Familiar, comunal.	Asalariada, peón.
Diversidad eco-geográfica, productiva, biológica, genética	Policultivo, con alta diversidad ecogeográfica, genética y productiva.	Monocultivo, con muy baja diversidad por especialización.

Criterios	Modelo campesino	Modelo agroindustrial
Productividad ecológica o energética	Alta productividad ecológico-energética. Baja en el trabajo. Regular en el tiempo.	Irregular en el tiempo. Muy alta productividad en el trabajo. Baja productividad ecológica y energética.
Producción de desechos	Baja producción de desechos orgánicos, propios.	Alta producción de desechos externos, agroquímicos.
Tipo de conocimiento empleado durante la producción	Local, tradicional. Holístico, ágrafo, basado en hechos y creencias de transmisión limitada y altamente flexible.	Especializado, ciencia convencional, basado solo en objetivos, transmitido por vía escrita, de amplia difusión, estandarizado.
Cosmovisión (visión del mundo que prevalece como causa oculta de la racionalidad productiva)	Ecocéntrica: la naturaleza es una entidad viva y sacra. El elemento natural se encarna en deidad con quien es necesario dialogar durante la apropiación.	Mercadocéntrica: la naturaleza es un sistema (o máquina) separada de la sociedad, cuyas riquezas deben ser explotadas a través de la ciencia y la técnica.

Si bien la tecnificación de la agricultura facilitó la producción de alimentos en el mundo, esto no ha ocurrido de manera inocua, y mucho menos ha solucionado el problema de la distribución de alimentos en la población.

2. Los problemas de la agricultura moderna

Los problemas derivados de las prácticas agrícolas modernas generan impactos sobre otros sistemas como las ciudades, los cuerpos de agua o las personas; y también producen consecuencias que a primera vista pueden pasar desapercibidas, como el deterioro de la capacidad productiva de los propios agroecosistemas y la consiguiente disminución de su sustentabilidad. En el libro "Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable", Santiago Sarandón enumera los problemas que citamos a continuación.

- **Contaminación por plaguicidas.** Las cualidades de los plaguicidas de síntesis, como su bajo costo, fácil aplicación, y la ignorancia acerca de su impacto sobre la salud de los humanos y los ecosistemas, favorecieron su difusión y uso masivo. Incluso le valió el premio Nobel en Fisiología o Medicina en 1948 al químico Paul Müller “por su descubrimiento de la alta eficiencia del DDT como un veneno de contacto contra varios artrópodos”. Los plaguicidas de síntesis eran considerados como un triunfo del humano sobre la naturaleza. De hecho, varios de los productos más peligrosos que existen fueron utilizados como insecticidas o fungicidas en la agricultura: el Aldrin, Clordano, DDT, Dieldrin, Endrin, Heptacloro, Hexacloro, “Mirex” y “Toxafeno”. Estos productos son considerados contaminantes orgánicos persistentes, ya que son muy tóxicos y se acumulan en los organismos que forman parte de las redes tróficas, son persistentes en el ambiente y pueden viajar largas distancias desde el punto de su aplicación. Si bien la actualidad estos compuestos están prohibidos o restringidos en varios países del mundo, están presentes en los tejidos de muchos organismos. Por ejemplo, en 1999 y 2002, científicos del Laboratorio de Ecotoxicología, de la Universidad Nacional de Mar del Plata, publicaron los resultados de estudios de contaminación en la Laguna de Los Padres. Las investigaciones demostraron la existencia de residuos de pesticidas en suelos naturales (por ejemplo, residuos de DDT y endosulfán entre otros); mayormente en la desembocadura del arroyo Los Padres, zona de aporte de agua a la laguna. Los resultados de los análisis en los organismos evidenciaron que el junco triangular, una planta acuática, incorpora y almacena los pesticidas a través de sus raíces. Los investigadores también detectaron residuos en invertebrados, como en el camarón de agua dulce, las lombrices de tierra y los escarabajos. Incluso los peces, como el dientudo y el bagre negro, presentaron restos de pesticidas.

El glifosato es otro de los pesticidas de amplio espectro muy usados en la agricultura. El Dr. Andrés Carrasco era investigador principal del CONICET y director del Laboratorio de Embriología Molecular de la Facultad de Medicina de la UBA, lideró las investigaciones que confirmaban efectos nocivos del glifosato en la salud de los organismos. En 2010, su grupo de investigación dio a conocer que bajas dosis de herbicidas comerciales basados en glifosato causan anomalías en embriones de *Xenopus laevis*, principalmente en el desarrollo de las crestas cefálicas y neurales y

provoca el acortamiento del eje antero-posterior del cuerpo, debido a que el glifosato genera un incremento en la actividad del ácido retinoico endógeno, un derivado de la vitamina A que regula la expresión génica de la construcción de los ejes embrionarios y la morfogénesis cefálica. Este incremento en el ácido retinoico está asociado con malformaciones causadas por la inhibición cefálica de los genes *shh* y *otx2* durante la gastrulación de los vertebrados, que correspondería con las semanas 3 y 4 de la gestación de los humanos. El Dr. Carrasco cuestionó “el modelo de base tecnológica de los agronegocios” y reclamó la urgencia en la búsqueda de nuevos criterios que precedan el uso de químicos en el territorio. Como no podía ser de otra manera, sus estudios le trajeron críticas de las empresas de agroquímicos, las descalificaciones del Ministerio de Ciencia y amenazas anónimas. Recién el 20 de marzo de 2015, la Organización Mundial de la Salud emitió un comunicado en el que el herbicida glifosato fue clasificado como “probable carcinogénico en humanos”. En 2015 se publicaron los resultados de una campaña llevada adelante por la Fundación BIOS, que analizó muestras de orina de doce voluntarios que viven en cercanías de zonas agrícolas, como de aquellos que viven en la ciudad, que no comen soja y no están expuestos a las pulverizaciones. Se detectó presencia de glifosato y AMPA (un metabolito del glifosato) en el 70% de las muestras de orina. Solo una persona dio negativo para ambos analitos.

- **Contaminación de los cuerpos de agua.** Este es probablemente el mayor tipo de impacto ambiental de la agricultura sobre el ambiente. Hay cada vez más evidencias acerca de la contaminación de las aguas destinadas al consumo con plaguicidas y/o derivados de fertilizantes (por ejemplo nitratos), principalmente en países desarrollados en los que el consumo de agroquímicos es intenso. Son la principal fuente de contaminación no puntual del agua subterránea debido a la lixiviación desde suelos agrícolas así como de los suelos no cultivados, y han sido ampliamente detectados a nivel mundial tanto en agua superficial como en agua subterránea.

Hay varios estudios que evidencian la presencia de distintos pesticidas en las aguas de nuestro país. Desde los años '70 se han detectado residuos de pesticidas organoclorados en la costa atlántica y en el Sector Antártico Argentino, y en los últimos años siguen sumándose reportes de la presencia de agroquímicos en distintos cuerpos de agua dulce de distintos puntos del país, que confirman el riesgo de con-

taminación, ya sea por deriva durante la aplicación de plaguicidas o por los flujos de lixiviación, generando posibles riesgos para la biota acuática y los seres humanos, especialmente por los plaguicidas cipermetrina, clorpirifos, endosulfán y el glifosato.

- **Colmatación y/o eutroficación de los embalses.** La colmatación de los embalses ocurre por arrastre de sedimentos o deposición de nutrientes, sobre todo en zonas de regadío donde se hace un uso intensivo de fertilizantes. Los sedimentos arrastrados deterioran la calidad de los cuerpos de agua, aumentando la turbidez, afectando la captación de la luz por las plantas acuáticas y, en consecuencia, a quienes se alimentan de ellas. Este tipo de inconvenientes a su vez afecta al uso recreativo navegable del recurso y también eleva los costos de procesamiento del agua para consumo humano. Además, el exceso de nutrientes, debido al uso masivo de fertilizantes nitrogenados y fosforados, provoca la eutroficación de los cuerpos de agua, alterando su calidad por la proliferación de algas y plantas acuáticas. Hay casos en los que estos organismos liberan toxinas que ocasionan mortandad masiva de peces, aves o mamíferos. En estos casos, las medidas de remediación también implican elevados costos económicos.
- **Disminución de la eficiencia energética.** Si bien el rendimiento de los cultivos ha ido en aumento en las últimas décadas, cuando se miden en la balanza todos los costos que existen para la producción de un cultivo se advierte que en realidad ha disminuido la eficiencia energética, es decir la energía cosechada por unidad de energía utilizada. Por ejemplo, en Estados Unidos, desde el año 1700 hasta 1900, el uso de energía (principalmente fósil) aumentó 17 veces, mientras que los rendimientos del maíz sólo aumentaron tres veces. Si se incorporan los costos del uso de fertilizantes sintéticos, pesticidas y maquinaria, las cuentas elevan a unas 100 veces la inversión de energía, para incrementar sólo en tres veces el rendimiento de la cosecha. En síntesis: estamos usando cada vez más energía para producir aumentos en los rendimientos.

Cabe recordar que la agricultura moderna es una gran consumidora de combustible fósil, un recurso que NO se produce, sino que se extrae de la tierra tras millones de años de haberse acumulado.

- **Pérdida de la capacidad productiva de los suelos.** Este problema se ve agravado por el uso excesivo y/o inadecuado de la maquinaria agrícola. La pérdida de la estructura del suelo entorpece la capacidad de infiltración del agua. A su vez, el exceso de laboreo disminuye el contenido de materia orgánica y así su fertilidad, provocando el incremento en el uso de fertilizantes sintéticos para restaurarla. Esto, por supuesto conlleva aumentos en la demanda de energía para sintetizar y fabricar dichos fertilizantes. En la Pampa Ondulada encontramos ejemplos de este problema. Desde que se reemplazó el maíz por el cultivo de soja y comenzó la agricultura permanente con rotación trigo-soja, el uso del arado de reja y vertedera se perdieron de 5 a 20 cm de la capa superficial del suelo a través de 1.280.000 ha. La siembra directa, sin remoción del suelo, ha disminuido algunos de estos problemas, pero pueden traer aparejados otros, como cambios en la comunidad de malezas que significan mayores costos para aplicar herbicidas, insecticidas, fungicidas y fertilizantes. Actualmente, esta técnica se implementa en 90 millones de hectáreas en el mundo, entre las cuales 45 millones se encuentran en América del Sur: la mitad en Argentina y la otra mitad distribuida entre Brasil, Paraguay y Uruguay.
- **Pérdida de nutrientes.** El hecho de que cada vez mayores superficies respondan positivamente a la aplicación de fertilizantes fosforados es un indicio de que existe un déficit creciente de ese nutriente, principalmente por falta de reposición en cantidades adecuadas. La Pampa Húmeda en nuestro país es un ejemplo claro de ello. La erosión de los suelos por las prácticas agrícolas inadecuadas también puede causar la pérdida de nutrientes en zonas con pendientes.
- **Deterioro de los acuíferos.** Las actividades agrícolas consumen más de 85% del agua del planeta. El riego causa que el agua se consuma a una velocidad mucho mayor a su recarga, disminuyendo los niveles de agua subterránea, sobre todo en casos en los que se busca maximizar el rendimiento de cultivos de alto valor pero poco eficientes en el uso de agua. Los países con mayores superficies destinadas al riego son China e India, con 19 Mha y 39 Mha, respectivamente. En Argentina ha avanzado la superficie destinada a riego complementario, especialmente para el cultivo de maíz, por lo que se hace necesario un estudio para evaluar el impacto que su masificación originaría en el territorio. El uso de riego también va asociado a una

mayor aplicación de fertilizantes, incrementando también el riesgo de contaminación de los acuíferos.

- **Dependencia creciente de los agroquímicos.** Cuando surgieron los plaguicidas, apareció la promesa de la erradicación de plagas. Hoy, muchos años después sabemos que las plagas no solo no se han erradicado sino que cada vez se consumen más plaguicidas. Incluso hay gente que cree que es imposible producir sin ellos.
- **Resistencia a los plaguicidas.** Hay reportes que indican que para el año 1989 ya existían 504 especies de insectos resistentes a uno o más plaguicidas. Esto implica el desarrollo y uso de nuevos productos y/o de la aplicación de mayores dosis a intervalos más cortos para lograr los mismos resultados que antes. El uso indiscriminado de plaguicidas no sólo afecta a las especies plaga, sino a los depredadores naturales que son los que las regulan naturalmente, por lo que se aumenta la posibilidad de aparición de nuevas y más vigorosas plagas.
- **Pérdida de la biodiversidad y erosión genética.** La frontera agropecuaria se expande a expensas de los hábitats naturales que albergan gran cantidad de especies. Hay estudios que evidencian los efectos nocivos de las prácticas agropecuarias convencionales sobre la abundancia y/o biodiversidad. Por ejemplo, las estrategias de manejo basadas en un alto uso de insumos químicos en los invernáculos del cinturón hortícola de La Plata afectan la presencia de las familias de arañas, componentes de la fauna “benéfica” por sus conocidos hábitos predadores. En los invernáculos con manejo orgánico, en los que se utilizan preparados caseros para combatir las plagas, hay mayor diversidad de cultivos y la abundancia de arañas se duplica en comparación con los invernáculos de manejo convencional.

La agricultura en sí se basa en la reducción de la biodiversidad natural de los ecosistemas, para establecer una población artificial de uno o unos pocos cultivos en grandes áreas. Se considera que existen cerca de 80000 especies de plantas comestibles, pero actualmente se usan sólo 200, y de ellas 12 son tenidas en cuenta como alimentos básicos importantes para la humanidad. Por ejemplo, el trigo es uno de los cultivos de cereales más importantes del mundo, y representó el 31% del consumo mundial entre 1997 y 1999, seguido por el arroz con el 21%. La presencia de monocultivos en amplias superficies aumenta la fragilidad del agroecosistema debido al riesgo de que una plaga o patógeno pueda provocar efectos devastadores

en la producción de alimentos. La falta de variabilidad genética también restringe las fuentes potenciales de resistencia a plagas, enfermedades y adaptación a condiciones ambientales desfavorables, como las sequías, la salinidad o las bajas temperaturas. En contra de estas tendencias reduccionistas en el consumo de ciertas especies vegetales cultivables, Eduardo Rapoport y colaboradores publicaron un libro llamado “Malezas comestibles del Cono Sur y otras partes del planeta”. En esta obra se describen 237 especies, de las cuales el 60% han sido introducidas en la región desde Europa y Asia. Muchas de ellas son consideradas “malezas” por los productores y el común de la sociedad, seguramente por desconocer sus amplios usos o “virtudes”.

- **Erosión cultural.** Los problemas del modelo actual de agricultura no sólo traen problemas en la salud y el ambiente, sino también en la esfera cultural. Principalmente por el menosprecio y el desconocimiento de técnicas tradicionales de cultivo, de sus bases ecológicas y culturales, que fueron reemplazadas por las nuevas tecnologías. El cultivo de unas pocas variedades modernas ha causado la pérdida de variedades y ecotipos de plantas cultivadas que han desaparecido para siempre. Es importante revalorizar la cultura de los agricultores tradicionales, porque ellos saben conservar el germoplasma *in situ* en coevolución con los cambios del ambiente.

Todos estos problemas emergen de una visión que prioriza el incremento del rendimiento de la producción a un corto plazo y con el menor número de especies cultivadas, bajo el paradigma de que el ambiente está al servicio del cultivar y de que la tecnología es la solución a todos los inconvenientes. En vista de los perjuicios potenciales y reales de una agricultura que se basa en el uso de recursos no renovables, con prácticas intensivas del uso del suelo, agotamiento de las reservas de agua y un limitado número de variedades cultivables, se hace evidente la urgencia de cambiar hacia un estilo de agricultura que sea sustentable y que preserve los recursos para las generaciones futuras.

3. Un nuevo paradigma de agricultura sustentable: la agroecología

A pesar de lo que muchas personas creen (entre ellas, muchos profesionales), es posible pensar y realizar una agricultura diferente. Pero para ello es necesario integrar otras disciplinas científicas a la agronomía, como la ecología y la sociología. En este contexto, alcanzar una agricultura sustentable significa lograr la capacidad de mantener la producción en el tiempo. Es decir, dejar de priorizar la maximización de la ganancia en el corto plazo para buscar una nueva perspectiva que considere la habilidad de mantener la producción en el tiempo y el espacio. Esto supone la creación de sistemas productivos que no destruyan los ecosistemas, que son la base estructural de la producción.

Para que el manejo de un agroecosistema sea realmente sustentable, su funcionamiento debe comprenderse en profundidad, y esto implica estudiarlo como un tipo particular de ecosistema, es decir considerando las interacciones de todos sus componentes físicos, biológicos y socioeconómicos y el impacto ambiental que estos producen. El aporte de las áreas sociales es muy importante porque es el humano el que decide modificar los ecosistemas naturales para transformarlos en agroecosistemas. Así nace el nuevo paradigma de la **agroecología**, que es el desarrollo y la aplicación de la teoría ecológica para el manejo de los sistemas agrícolas, de acuerdo con la disponibilidad de recursos. Es el manejo sustentable ecológico de los agroecosistemas, mediante la acción social colectiva, como alternativa al modelo de manejo agroindustrial; con propuestas de desarrollo participativo desde los ámbitos de la producción y circulación de sus productos, estableciendo formas de producción y consumo que contribuyan a encarar la crisis ecológica y social, generada por el neoliberalismo y globalización económica. La agroecología incorpora los saberes tradicionales y locales con el conocimiento técnico moderno para producir con métodos respetuosos del ambiente y la sociedad, para alcanzar no solo metas productivas, sino también igualdad social y sustentabilidad ecológica en el agroecosistema.

La agroecología se vislumbra entonces, como un pilar para reconstruir la soberanía alimentaria, entendida como “el derecho de los pueblos a definir sus propias políticas sustentables de producción, distribución y consumo de alimentos, garantizando el derecho a la alimentación para toda la población, con base en la pequeña y mediana producción, respetando sus propias culturas y la diversidad de los modos campesinos, pesqueros e indígenas de producción y comercialización agropecuaria, y de gestión de los espacios rurales, en

los cuales la mujer desempeña un papel fundamental. La soberanía alimentaria debe asentarse en sistemas diversificados de producción basados en tecnologías ecológicamente sustentables”.[1]

El proceso de transformación de los sistemas convencionales de producción hacia sistemas con base agroecológica constituye lo que se conoce como **transición agroecológica**. Esto no implica sólo un proceso de índole técnica, sino la consideración de que la producción está íntimamente relacionada con las condiciones ambientales de cada agroecosistema y que ésta debe adaptarse a dicha realidad y, como mencionábamos antes, está profundamente vinculada con los procesos socioculturales.

En la transición agroecológica se transitan distintas etapas que pueden distinguirse de la siguiente manera:

- **Reducción del consumo y del uso de insumos** costosos o ambientalmente nocivos, mediante el incremento en la eficiencia de las prácticas convencionales. Por ejemplo, se reducen dosis y frecuencias de aplicaciones a las cantidades adecuadas según la etiqueta de los agroquímicos, densidades óptimas de siembra, maquinaria renovada, monitoreo de plagas para una mejor aplicación de los plaguicidas, precisión en la aplicación de fertilizantes y riego.
- **Sustitución de prácticas e insumos** convencionales por prácticas alternativas sostenibles. Por ejemplo, incorporar fijadores de nitrógeno para reemplazar fertilizantes sintéticos nitrogenados, el uso de agentes de control biológico en lugar de plaguicidas, y el cambio a la labranza mínima o reducida.
- **Rediseño del agroecosistema** de forma que funcione sobre la base de un nuevo conjunto de procesos ecológicos, lo que favorece la prevención de la aparición de plagas. Por ejemplo, la diversificación del manejo y estructura de la unidad de producción mediante el uso de rotaciones, cultivos múltiples, agroforestería y borduras. La conservación de la vegetación espontánea, y principalmente nativa, funciona como refugio de la fauna “benéfica”, como por ejemplo artrópodos predadores (arañas, escarabajos carábidos, etc.) o parasitoides (moscas y avispas específicas) que son importantes controladores de plagas; y es una fuente de alimento para los herbívoros, que prefieren alimentarse de las plantas nativas o arvenses en lugar de las plantas cultivadas.

- **Cambio de ética y de valores** hacia una cultura de sustentabilidad, que realza el vínculo entre quienes producen los alimentos y quienes los consumen.

Estas etapas suelen presentarse gradualmente en los productores familiares capitalizados, que permiten que pierdan algunos prejuicios y puedan recuperar de a poco las propiedades ecológicas de su sistema para avanzar hacia uno más equilibrado. Pero hay casos en que comenzar por la primera de las etapas no es una buena estrategia para otros productores familiares más descapitalizados, porque ya hacen un uso limitado de los agroquímicos, aunque esto no necesariamente indique que los usen correctamente. Hay situaciones dentro de la horticultura familiar que permiten adoptar estrategias combinadas para solucionar problemas de plagas, como la combinación del uso de agroquímicos con algunos preparados realizados con recursos locales.

Como podemos apreciar, iniciar la transición agroecológica no significa cambiar drásticamente un modo de producción convencional ni disminuir a cero el uso de agroquímicos. Algunos productores se sienten más seguros si inician esta experiencia reemplazando gradualmente los insumos químicos por otros biológicos o de menor toxicidad, y así pueden tomar confianza y evaluar el sistema y las posibilidades que aparecen cuando se disminuye el uso de agroquímicos.

Algunas experiencias de transición agroecológica en productores familiares del cinturón hortícola del partido de La Plata han avanzado hacia la validación de purines de ortiga (*Urtica urens*) y suico (*Tagetes minuta*) para el control de plagas, o purines de cola de caballo (*Equisetum giganteum*) como biofertilizante en plantineras. En otros casos, se incorporan recursos locales como las semillas que los productores comienzan a seleccionar y producir considerando aquellos cultivos más simples de hacer, o aquellos en que hayan observado mejor resistencia a una enfermedad, o más rusticidad, etc. En este sentido, hay productores familiares que comenzaron a usar maíz de variedades de polinización libre o hijos de híbridos para cultivar. También hay mayor predisposición a sembrar flores y plantas repelentes en las borduras, o de mantener bordes con la vegetación espontánea en los lotes cultivados que ofician como refugio de los predadores naturales. Hay casos de productores que prefieren seleccionar sólo un sector del predio para aplicar el modelo agroecológico y probar los cambios.

La población de productores y los sistemas de producción que trabajan son muy variados, por eso es que la transición agroecológica se adapta a cada situación particular y, más allá de que se diferencian distintas etapas durante el proceso, su aplicación no sigue un orden o aparición estricta. El enfoque agroecológico dista mucho de transmitir recetas, ya que éstas no siempre funcionan para la realidad heterogénea de la agricultura familiar. Aquí importa reconocer el problema, identificar sus causas y buscar múltiples alternativas en función de los criterios agroecológicos para encontrar una solución.

4. El Estado y el “yuyo”: El rol de las políticas públicas en la consolidación del modelo agroexportador

Durante uno de sus discursos, en el marco del conflicto del gobierno con “el campo” en el año 2008, la presidenta Cristina Fernández de Kirchner se refirió a la soja como “un yuyo que crece sin ningún tipo de cuidados especiales”. Paradójicamente, ese “yuyo” es hoy uno de los íconos del modelo agrario vigente en Argentina. Múltiples políticas fueron las que incidieron para llegar al actual modelo agroexportador, cuyo producto estrella es, precisamente, la soja transgénica.

Podemos volver en el tiempo, hacia la década del '70, cuando las leyes de arrendamiento que habían sido reguladas durante el primer gobierno de Perón (1946-1955) con el propósito de proteger a los pequeños y medianos productores agropecuarios, comenzaron a flexibilizarse durante el gobierno militar autodenominado Proceso de Reorganización Nacional (1976-1983). La posibilidad de establecer contratos accidentales por una cosecha permitió a los grandes propietarios obtener el concurso de contratistas para sembrar soja y otros cereales y oleaginosas y, así, lograr rentas que no hubieran podido lograr de otra manera. Los pequeños y medianos productores también percibieron más beneficios económicos al arrendar sus campos a contratistas, ya que no tenían los medios como para impulsar una producción a gran escala. A su vez, a partir de esta época, comenzaron a desarrollarse los *pools* de siembra, que luego se masificaron en la década del '90, en que cobraron más notoriedad en los medios de comunicación, como una nueva forma de organizar la agricultura en la Argentina. El *pool* de siembra hace referencia a una reunión de bienes y servicios que pertenecen a varios actores, de escalas y formas jurídicas muy diferentes, cuyo interés

común es realizar una actividad agrícola durante un período determinado para obtener el mayor rendimiento económico. La mayoría de los *pools* no son propietarios de las tierras ni de las maquinarias, tienen una fuerte presencia de capitales externos al emprendimiento y una gestión financiera y económica muy profesional.

Una de las principales decisiones políticas que influyó en la organización de la actividad agrícola fue el decreto de desregulación de 1991, que otorgaba más importancia a los mecanismos de autorregulación del mercado que a las posibles interferencias desde el Estado. Esta política se llegó a definir como una “privatización de la economía privada” debido al desarrollo de mecanismos tendientes a suprimir las trabas, las regulaciones, los subsidios y las dificultades que existían en una gran cantidad de mercados. Concretamente se eliminaron las normas que limitaban el libre funcionamiento de los mercados, se suprimieron los límites a las importaciones y a las exportaciones (con algunas excepciones), se eliminaron los impuestos al comercio agrícola, se derogó la legislación que regulaba estos mercados (granos, carne, azúcar, vinos, yerba mate) y se eliminaron los organismos encargados (como la Junta de Granos, la Junta Nacional de Carne, la Dirección Nacional del Azúcar, etc.), entre otras medidas. De esta forma, el sector agrario argentino se transformó en uno de los menos regulados del mundo, sujeto a los vaivenes de la economía mundial. Esta y otras decisiones contribuyeron a la desaparición de numerosas explotaciones agrarias, sobre todo las que tenían superficies menores a 200 ha.

Junto con estas medidas, en 1991 se creó un organismo de asesoramiento y control, la Comisión Nacional Asesora de Bioseguridad Agropecuaria (CONABIA), que actúa en simultáneo con la Dirección de Biotecnología (creada en 2008), ambos dependientes del Ministerio de Agricultura y con un objetivo en común: “garantizar la bioseguridad del agroecosistema”. Específicamente, la función oficial de la CONABIA es analizar y evaluar las solicitudes presentadas para desarrollar actividades con organismos genéticamente modificados (OGM) y emitir un dictamen, con base en información científico-técnica y datos cuantitativos, para la continuación o rechazo de la solicitud de la empresa. Actualmente, la CONABIA está conformada por representantes del sector público y privado, pero de las 47 personas que la integran, 27 pertenecen a las mismas empresas (por ej. Monsanto, Bayer, Syngenta y Dow) que impulsan el modelo transgénico, o son investigadores “independientes” pero muy vinculados a ellas.

En 1996, la CONABIA aprueba la liberación al mercado de la semilla transgénica Roundup Ready (RR) (un producto biotecnológico, como explicamos en el capítulo 4). Esto, sumado a la práctica de la doble cosecha (trigo-soja) que venía creciendo desde la década del '70, condujo a la sustitución progresiva del maíz y el sorgo y de las actividades ganaderas que antes coexistían con los cultivos en un sistema de explotación mixta en la región pampeana. Esta situación vino acompañada de todo el paquete tecnológico de alto costo asociado a la producción de soja: siembra directa, semillas transgénicas (resistentes a los agroquímicos) y agroquímicos, principalmente el glifosato para eliminar las malezas. Si bien la semilla transgénica, al igual que el glifosato, son producidos por Monsanto, la distribución de la semilla pasó a manos de su licenciataria Asgrow, luego adquirida por Nidera. Todo ello derivó en que los productores agrícolas se volvieran dependientes de estas empresas para trabajar sus cultivos.

La generación de conocimiento aplicado al mercado y el desarrollo de biotecnologías también es fomentado desde el Estado. El problema es que los ámbitos donde se regulan estas tecnologías, como la CONABIA no muestran una apertura crítica ni espacios de debate. Por ejemplo, aunque hay abundante evidencia científica de las consecuencias negativas que trae el uso de transgénicos sobre la economía local, o sobre la desarticulación de sociedades enteras por migración y desempleo, estos elementos no son considerados al momento de evaluar el riesgo de los transgénicos a liberar. A su vez, aunque se corrobore la asociación entre los Organismos Vegetales Genéticamente Modificados con el creciente uso de agroquímicos, esto no es tomado en cuenta al evaluar los riesgos sobre la salud. De hecho, los agroquímicos son evaluados independientemente de su uso y no hay una legislación que regule su uso a nivel nacional, sino que las que existen son de carácter provincial o municipal.

Desde la aprobación del uso de la soja RR en 1996, el accionar de la CONABIA fue cuestionado por organizaciones sociales y científicos no vinculados al sector privado. Desde el gobierno se desestima la incidencia empresaria en la toma de decisiones, nunca precisaron la forma en que funciona el organismo y no se han publicado las actas y la forma en que se aprueban los pedidos empresarios. En 2013, el Centro de Estudios Legales del Medio Ambiente (CELMA) denunció ante la Justicia federal la forma irregular en la que se aprobó la semilla de soja "Intacta RR2" de la empresa Monsanto. La denuncia cuestionó que no se haya realizado una consulta pública, según indica la legislación argentina, que no

se realizaron estudios de impacto ambiental y que se omitieron muchas fuentes bibliográficas de trabajos científicos que alertaban de los efectos nocivos de los transgénicos sobre la salud y el ambiente. A su vez, advirtieron que la aprobación se sustenta sólo con estudios de Monsanto y que no se realizaron investigaciones desde el Estado.

Otra de las consecuencias del actual modelo agroexportador es la deforestación. A pesar de que en 2007 se aprobó la Ley de Bosques, en Argentina se produce el 4,3% de los desmontes mundiales, a razón de una hectárea cada dos minutos. Salta es una de las principales provincias que sufren este problema, la causa: el avance de la frontera agraria sobre los montes nativos. En el año 2000, existían en la provincia 210 mil ha sembradas con soja, y en 2006 la superficie aumentó a 600 mil ha. El maíz transgénico creció de 61 mil hectáreas (en el 2000) a 162 mil (en 2013). A su vez, la frontera ganadera es desplazada por la soja, avanzando sobre las tierras campesinas, indígenas y el monte nativo: en el 2000 había 420 mil cabezas de ganado bovino, en 2010 llegó a alcanzar a un millón de cabezas. En noviembre de 2014, las organizaciones sociales y un grupo de científicos enviaron un documento a la Secretaría de Ambiente de la Nación y al Consejo Federal de Medio Ambiente para que intervengan frente a los desmontes en Salta. En diciembre, el gobierno salteño derogó dos decretos que permitían esquivar la Ley de Bosques y pasar topadoras en territorios protegidos. Sin embargo, el 29 de diciembre de ese mismo año volvieron a desmontar.

Actualmente, las semillas están en el centro del debate. Los productores suelen realizar la siembra con las semillas de la cosecha anterior y, si requieren más cantidad de semillas, cambian de cultivo o se abastecen comprando a las empresas semilleras (por ejemplo Don Mario, Cargill, Bunge y Born, etc.). En general, los productores de soja compran la semilla transgénica de criadores de semilla locales que las venden a bajos costos; esto se conoce como “bolsa blanca” y es considerado un mercado ilícito por el sector agroempresarial. Las grandes empresas semilleras internacionales como Monsanto, están ejerciendo presión para que el productor agropecuario esté obligado a pagar regalías por el uso de sus semillas y para que se prohíba la posibilidad de reproducirla incluso para uso propio. La soja RR nunca fue patentada en Argentina, por lo que quedó en dominio público y se difundió masivamente. Pero desde 2002, la empresa Monsanto intima a los productores por el supuesto uso ilegal de las semillas, cobrando regalías en los puertos de destino de exportación de la soja de aquellos países donde sí tienen la patente. A su vez, cuando en 2014 se comenzó a comercializar la soja “Intacta RR2”, Monsanto intentó desalentar el sistema de

la bolsa blanca realizando convenios con las semilleras, mediante los cuales éstas realizan un contrato con el productor, en el momento de la venta, en el que el productor además de pagar por la semilla debe pagar un canon según el resultado de la cosecha para reconocer la reproducción de una tecnología desarrollada por Monsanto. Entonces, al momento de cobrar, se les descuenta a los productores el costo de la semilla más un extra (14 dólares por bolsa) para pagar ese canon. El reclamo de los productores agrarios se hace escuchar. En mayo de 2015, un comunicado del Ministerio de Agricultura indica que solo los mayores productores pagarían un canon sobre el resultado de la cosecha, mientras que los pequeños y medianos abonarían sólo el costo de la semilla. Pero se reconocen los derechos de las empresas sobre los organismos biológicos. En 2012, Cristina Fernández decía: “Como ahora nosotros hemos logrado patentes propias, nos hemos convertido también en defensores de las patentes”, en el marco de las negociaciones con Monsanto. Ese mismo día, la presidenta anunció la apertura de plantas experimentales y de producción (una de ellas rechazada por el pueblo donde se asienta, en Malvinas Argentinas, Córdoba). En contraposición a estas tendencias, el movimiento internacional Vía Campesina manifiesta que “las semillas son el inicio y fin de los ciclos de producción campesina. La diversidad y existencia de semillas campesinas permite asegurar la abundancia y la diversidad alimentaria en cada localidad, sirviendo de base para una nutrición adecuada y permitiendo el desarrollo de las formas culinarias culturalmente adecuadas y deseadas. Por tanto, las semillas y el conocimiento asociado a ellas son parte fundamental e insustituible de la soberanía alimentaria de los pueblos. Las semillas son obra campesina e indígena, una creación colectiva que refleja la historia de los pueblos. [...] Entendemos que la semilla es muchísimo más que un recurso productivo. Las semillas son simultáneamente fundamento y producto de culturas y sociedades a través de la historia. En ellas se incorporan valores, afectos, visiones y formas de vida que las ligan al ámbito de lo sagrado. Sin las semillas, es imposible el sustento y la soberanía de los pueblos. Al desaparecer las semillas, desaparecen las culturas y los pueblos rurales y comunidades; la desaparición de las culturas, a su vez, lleva a la desaparición de las semillas. Por lo anterior, las semillas no son apropiables. [...] La Campaña Mundial de la Semilla de Vía Campesina, por lo tanto, se opone a la propiedad intelectual y a toda forma de apropiación de la vida.”

La Argentina fue uno de los mayores exportadores de carne vacuna y cereales (trigo, maíz, girasol, entre otros) durante el siglo XX. A su vez, esos productos formaban parte del

alimento básico de consumo popular en el mercado interno, y su producción se centraba en la región pampeana, ya que otras regiones estaban dedicadas a cultivos industriales, como por ejemplo la caña de azúcar en el Noroeste y los frutales en el Valle de Río Negro y Cuyo. En nuestro país se producían casi todos los alimentos consumidos por la población, salvo algunos productos tropicales (palmitos, café, etc.). Quienes llevaban adelante esta producción eran los pequeños y medianos productores, que ocupaban el 45% de la superficie y generaban el 47% de la producción nacional. En la actualidad, la Argentina es el segundo productor mundial de Organismos Vegetales Genéticamente Modificados (OVGM). Durante 2010, el 100% de la soja sembrada fue transgénica, el 90% en el caso del maíz y el 75% en el algodón. En ese mismo año, se recibieron 230 solicitudes para la liberación de OVGM, la mayoría asociados con resistencia a enfermedades o tolerancia a herbicidas. Paralelamente, desde 2007 a 2011, el uso de agroquímicos en la actividad agraria se incrementó de 28 a 300 millones de litros y solo el 4% de los productores poseen el 65% de las tierras cultivadas. Queda claro como las decisiones políticas tomadas desde el Estado favorecieron el modelo de producción, que está consolidado económica y políticamente y se desarrolla en detrimento de la biodiversidad, los recursos naturales y las comunidades indígenas.

5. Instituciones estatales comprometidas en la transición agroecológica

Si bien es evidente que las políticas públicas distan mucho de guiarse por un paradigma agroecológico, esto no ha sido un impedimento para movilizar autoridades y referentes de distintas instituciones estatales. Desde sus orígenes, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), tuvo como propósito la generación de conocimientos para transferirlos a los productores. En esa dirección, se crearon programas nacionales o regionales para el sector rural desde distintos organismos e instituciones. En 1987, el INTA promueve el primero de sus programas: el Programa Unidad de Minifundio, dirigido a los productores minifundistas, financiado con fondos del Tesoro Nacional. En 1990, nace el ProHuerta, con la participación y el financiamiento del Ministerio de Desarrollo Social de la Nación y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGPyA), cuyo objetivo es la asistencia alimentaria de los sectores pobres, principalmente urbanos, promoviendo la auto-producción de alimentos. En 1993, surge el programa Cambio Rural, que brinda asistencia técnica y financiera a los productores agropecuarios pequeños y medianos. Con fondos del

Estado nacional, en 2003 se pone en acción el Programa para Productores Familiares (Pro-Fam), destinado a productores de reducida escala que trabajan familiarmente su establecimiento. El PROINDER (con fondos del Banco Mundial) y el Programa Social Agropecuario de la SAGPyA, se presentaron como una forma de intervención para la resolución de los problemas de los sectores más vulnerables, ante el crecimiento exponencial de los niveles de pobreza durante el período de la década de los 90'. En 2004, el Plan Estratégico Institucional (PEI) 2005-2015 del INTA, a pesar de reforzar la tradicional búsqueda del desarrollo productivista (la competitividad), incorpora nuevas cuestiones en la agenda como la sustentabilidad ecológica de los ambientes y la sustentabilidad económica y social (equidad social) de las producciones medianas y pequeñas. En agosto de 2005 se hace efectiva la creación del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Pequeña Agricultura Familiar (CIPAF), con tres institutos regionales correspondientes a las áreas Pampeana, Noreste y Noroeste para "planificar e implementar actividades de investigación básica y aplicada, mediante enfoques y/o procesos participativos, para la generación de tecnología apropiada para la Pequeña Agricultura Familiar". En el 2010 se crea el IPAF región Cuyo y en septiembre de 2011 fue creado el IPAF región Patagonia. En este contexto, las organizaciones campesinas y los productores rurales, periurbanos y urbanos organizados tienen mayores espacios de participación en la institución, de la mano de los Consejos Asesores de los IPAFs y los Comités Técnicos de los Proyectos de Investigación y Extensión. En estos espacios tienen lugar investigaciones que se desarrollan dentro del paradigma agroecológico, en el que los investigadores trabajan en conjunto con los productores, integrando conocimientos y experiencias que permitan restaurar el equilibrio de los agroecosistemas y lograr una transición desde la producción convencional hacia un modo sustentable, como las que se describieron anteriormente en este capítulo. En adición a esto, cabe destacar que dentro de las instituciones académicas, numerosas facultades de agronomía vienen incorporando, bajo distintas estrategias la agroecología, tanto en la currícula de grado, como a partir del desarrollo de cursos de posgrado y maestrías.

La Revolución del hambre

En el transcurso de este capítulo y el anterior, hemos mencionado que los avances tecnológicos en la agricultura se han desarrollado aclamando ser la solución para el problema

del hambre y la pobreza del mundo. A mitad del siglo XX, la selección genética de nuevas variedades de cultivos de alto rendimiento, junto con la explotación intensiva y el uso masivo de agroquímicos y maquinaria constituyó un desarrollo para el sector agrario que fue conocido como la Revolución Verde. Si bien es cierto que tras la Revolución Verde se incrementó el rendimiento de determinados cultivos, claramente no lograron terminar con la pobreza rural ni favorecer a los pequeños productores. Una segunda Revolución se originó a partir de las innovaciones biotecnológicas en la década de los '90, con la creación de los OGM, que se describieron en detalle en el capítulo 4. De acuerdo con los grupos económicos que promueven esas "revoluciones", el problema radica en mejorar la productividad agrícola, ya que al resolver muchos problemas que afectan a la agricultura industrial, se logrará liberar de la baja productividad, la pobreza y el hambre a los países en vías de desarrollo. Pero como vimos, la mágica solución de la biotecnología no es más que un intento de tapar con un dedo los problemas ambientales de la agricultura sin cuestionar las causas reales que ocasionaron los primeros problemas.

Las empresas de biotecnología insisten en que los OGM son hallazgos científicos necesarios para alimentar al mundo y terminar con la pobreza. Esta idea se basa en dos puntos centrales: que el hambre surge de una brecha entre la producción de alimentos y la densidad de la población humana o la tasa de crecimiento, y que la ingeniería genética es la única o la mejor forma de aumentar la producción agrícola para cubrir las necesidades de alimento. Es necesario tener en claro que estos supuestos son falsos, porque hoy en día el mundo produce más alimento por habitante como nunca antes. En la actualidad se podría abastecer diariamente a cada persona con casi 2 kg de alimento: 1 kg de granos, porotos y nueces; cerca de medio kilo de carne, leche y huevos y otro medio kilo de frutas y verduras. La cantidad de granos que se produjo en el mundo durante 1999 habría alcanzado para alimentar a 8000 millones de personas (considerando que en el 2000 éramos cerca de 6000 millones de habitantes), si éstos se hubieran distribuido equitativamente o no se hubieran destinado para la cría de animales. Miles de hectáreas dedicadas a la producción de soja y yuca tienen como propósito final alimentar al ganado europeo. Las principales causas del hambre son la pobreza, la desigualdad y la falta de acceso a los alimentos y a la tierra. Casi 2000 millones de personas viven con menos de un dólar por día, por lo que no logran abastecerse adecuadamente de alimentos o carecen de la tierra y los recursos para sembrarla. Si las nuevas tecnologías apuntaran a reducir esas causas antes que a mejorar el rendi-

miento de unas pocas variedades de especies cultivables, es posible que las tendencias comiencen a revertirse.

A partir del estudio teórico del funcionamiento de los ecosistemas, queda claro que la energía fluye a través de todos los niveles tróficos y que la materia recircula formando parte de los componentes de los cuerpos de los seres vivos. Pero, según lo que acabamos de analizar, los humanos tenemos la habilidad de modificar notoriamente los rumbos a través de los que se mueven la materia y energía, si no ¿de qué otro modo se puede explicar tanta desigualdad en el acceso al alimento? El desequilibrio en este acceso a los recursos, como los nutrientes, trae aparejado una serie de problemas al cuerpo humano, como veremos a continuación.

Malnutrición: hipernutrición y desnutrición

Uno de los problemas que causa el desequilibrio en la ingesta de nutrientes es la **malnutrición**, que afecta el normal funcionamiento del organismo alterando nuestra salud.

La ingesta insuficiente de alimentos o un desbalance en el contenido nutricional del alimento genera la **desnutrición**. Esto significa que la desnutrición puede suceder si los alimentos son energéticamente insuficientes o si la proporción de proteínas o micronutrientes es escasa. Si consideramos que en los primeros años de vida el crecimiento es muy rápido, la desnutrición en esta etapa puede tener consecuencias terribles para la salud, que incluyen la muerte. Según la UNICEF, es la principal causa de muerte de lactantes y niños pequeños en países en desarrollo. Particularmente en los primeros años de vida del ser humano suceden un importante crecimiento y desarrollo del cerebro por lo cual la desnutrición puede afectar su evolución normal, con efectos críticos y permanentes en el desarrollo intelectual de la persona, la memoria y el aprendizaje. Es muy importante destacar que la desnutrición puede suceder porque la ingesta es pobre en cantidad o en calidad. Si los alimentos son insuficientes en aporte calórico o en la proporción de proteínas o micronutrientes se genera un retraso en el crecimiento que puede afectar el desarrollo mental y físico en forma permanente.

En el otro extremo, la malnutrición también implica la acumulación excesiva de grasa corporal producida por un desequilibrio entre la ingesta calórica y el gasto energético, más conocida como **obesidad**. Actualmente, la obesidad constituye una de las alteraciones me-

tabólicas de mayor repercusión desde el punto de vista sociosanitario, ya que se debe en gran medida a cambios ambientales y sociales que han tenido lugar en las últimas décadas (los hábitos alimentarios, el sedentarismo...). Es una enfermedad de creciente prevalencia que varía en distintos países en torno al 10%, (aunque el sobrepeso asciende hasta el 30%), y considerada como una grave amenaza para la salud pública, debido a su asociación con la diabetes, hipertensión, alteraciones inflamatorias, por el elevado costo sanitario que se deriva de las mismas. La Organización Mundial de la Salud nos dice que en el año 2008 había en el mundo 1400 millones de personas mayores de 20 años con sobrepeso, y dentro de este grupo más de 200 millones de hombres y cerca de 300 millones de mujeres eran obesos. También sufren obesidad los niños: alrededor de 40 millones de menores de 5 años la padecen. Hoy constituye el quinto factor de riesgo de muerte en el mundo.

La función digestiva en la alimentación

Desde el punto de vista científico, la alimentación en los animales es un proceso que involucra la transferencia de materia desde el cuerpo del organismo que es comido hasta el cuerpo del organismo consumidor. A su vez, esto trae aparejada la disponibilidad de energía para los procesos vitales del organismo consumidor.

Aunque tanto el sistema digestivo, por las funciones de los órganos del tubo digestivo y anexos en la digestión de los alimentos, como el sistema respiratorio por la tarea de intercambiar el oxígeno con el aire atmosférico son sistemas involucrados en la nutrición humana, es la función digestiva la más necesaria de analizar a la luz de las implicancias bio-psico-sociales que tiene la alimentación humana.

El sistema digestivo tiene protagonismo ya que facilita las funciones de digestión, motilidad y secreción, las que confluyen en la función resultante de la absorción.

Analizando estas funciones por separado, diremos brevemente que:

- la **digestión** consiste en la conversión de los alimentos ingeridos en moléculas pequeñas a través de procesos mecánicos y químicos.
- la **secreción** consiste en la producción de jugos digestivos hacia la luz del tracto gastrointestinal, pero también de sustancias endócrinas regulatorias del proceso de la nutrición en general.

- mediante la **motilidad**, el tracto gastrointestinal colabora en la mezcla de los alimentos y las secreciones, y su propulsión en el sentido boca-ano.

Todos estos procesos confluyen en el ingreso de los jugos secretados, los iones y los productos de la digestión dentro de las células epiteliales que revisten la luz del tracto gastrointestinal, función denominada **absorción**. Las sustancias absorbidas, para llegar hacia las células de todo el cuerpo utilizarán tanto la vía del sistema circulatorio como la del sistema linfático.

Dado que la descripción de la mayoría de estos procesos se encuentra ampliamente detallada en la bibliografía académica que da cuenta de las características anatomofisiológicas del sistema digestivo, consideramos que este apartado debe versar sobre un trío de conceptos desvalorizados: el **control neuroendócrino** de la función digestiva, el **proceso de la absorción** y las **funciones hepáticas**.

El tracto gastrointestinal está regulado finamente en su función mediante una red de más de 100 millones de neuronas organizadas en dos plexos dentro de la pared del tubo digestivo: el plexo mientérico o plexo de Auerbach que se localiza dentro de las capas musculares y el plexo submucoso o plexo de Meissner, que se encuentra dentro de la capa submucosa. Su distribución se asocia claramente a que el primero regula sobre todo la motilidad gastrointestinal, afectando la frecuencia y la fuerza de la contracción de los músculos, mientras que el segundo controla las secreciones debido a que inerva las células secretoras de la mucosa epitelial.

La acción de los plexos es tanto sensitiva como motora en un circuito de información similar al que ya hemos descrito en el capítulo 3. Quimiorreceptores y mecanorreceptores se ven estimulados química y mecánicamente debido a sustancias químicas y al estiramiento que se produce al ingresar los alimentos al tubo digestivo, siendo la respuesta mótil o secretora.

Los plexos mencionados forman el sistema nervioso entérico, que funciona en forma parcialmente independiente ya que establece con el sistema nervioso central un complejo de comunicación bidireccional mediante múltiples conexiones neuronales y endocrinas, que involucran tanto al sistema nervioso central como al periférico. Muchos reflejos que regulan las funciones viscerales como la sensación de hambre son procesados en el núcleo del tracto solitario de la médula espinal. Adicionalmente, este centro actúa como estación de relevo de la información sensorial con destino al hipotálamo, donde se estimula la ex-

presión de neuropéptidos orexígenos y anorexígenos que participan en las sensaciones del apetito y la saciedad, es decir en la regulación de la ingesta.

La ingesta alimentaria involucra distintos aspectos del comportamiento, como pueden ser el hambre y la decisión de empezar a comer. La complejidad de la sensación de hambre se demuestra en la diversidad de hormonas, neuropéptidos, neurotransmisores y áreas cerebrales que entran en juego a nivel del sistema nervioso. El hipotálamo y otras regiones extrahipotalámicas poseen receptores para diversas moléculas de señalización, que se originan tanto en el sistema nervioso como en el tracto gastrointestinal y los órganos anexos del sistema digestivo, en el sistema inmunológico y el tejido adiposo. La lista es muy grande, pero a título de ejemplificación de lo que mencionamos citaremos algunas.

Entre las citoquinas del sistema inmunológico, el factor de necrosis tumoral (TNF- α) y las interleuquinas 1 y 6, están implicadas en estados de anorexia y pérdida de peso asociados a infecciones graves o neoplasias.

La **ghrelina** es un mensajero químico secretado en el estómago que se une al receptor del factor de liberación de la hormona del crecimiento, con funciones endócrinas en el tracto gastrointestinal y orexígenas, actuando sobre el núcleo arcuato hipotalámico.

La **leptina** se sintetiza mayoritariamente en el tejido adiposo y también en el estómago, y su efecto principal es la inhibición del apetito y regulación del peso corporal a largo plazo.

La **insulina** secretada por las células beta del páncreas, posee un doble efecto sobre la ingesta y peso corporal: a nivel central, estimulando neuronas del hipotálamo, con efecto orexigénico, además de regular el metabolismo energético inhibiendo la gluconeogénesis y estimulando la lipogénesis y el gasto calórico.

La **gastrina** es una hormona peptídica producida por las células G del estómago, que estimula su motilidad la secreción de ácido gástrico, actuando además como hormona anorexigénica.

La **Colecistoquinina (CCK)** es producida por las células enteroendócrinas del intestino delgado en respuesta a la presencia de nutrientes en el lumen. La

CCK es también un neurotransmisor de amplia distribución, incluyendo el hipotálamo y la médula espinal ejerciendo un efecto inhibitor de la ingesta en humanos favoreciendo procesos de saciedad en coordinación con la leptina.

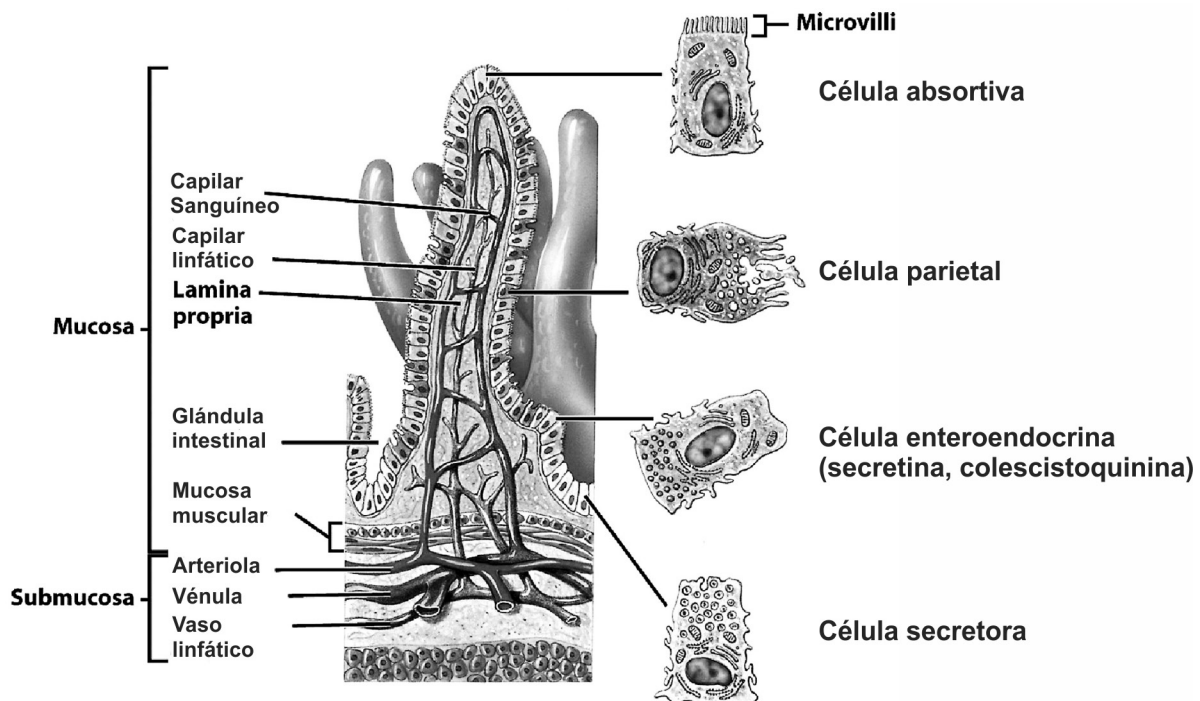
El **Péptido insulíntrópico dependiente de glucosa (GIP)** se libera en el intestino delgado como respuesta a una ingesta ricas en grasas, con efecto sobre la secreción de insulina y el metabolismo de los ácidos grasos en el tejido adiposo.

Endocannabinoides. La molécula más relevante de este grupo con efecto orexígeno es la **oleiletanolamida (OEA)** que se sintetiza en el intestino delgado y ejerce su función a nivel hipotalámico como inhibidor de la acción de la CCK en el hipotálamo.

El proceso de la **absorción** es propiciado por la membrana absorbiva que caracteriza particularmente a mucosa del intestino delgado. En el estómago prácticamente no se absorben sustancias, salvo algunas muy liposolubles como el alcohol y algunos fármacos como la aspirina.

El gran órgano de absorción es el **intestino delgado** en donde existen estructuras anatómicas que aumentan considerablemente la superficie de absorción, denominadas pliegues circulares y vellosidades intestinales de la mucosa, y microvellosidades o ribete en cepillo (o chapa estriada), de las células epiteliales.

Estructura de las vellosidades intestinales



Dentro de cada vellosidad intestinal una asociación circulatoria y linfática, organizados en capilares sanguíneos y capilares linfáticos o vasos quilíferos asegura la distribución de las sustancias que atraviesan la membrana de las células intestinales o enterocitos (del lado luminal y del lado basal).

La absorción de los nutrientes se fundamenta en los principios básicos del transporte de sustancias a través de la membrana: se ponen en juego estrategias de difusión, difusión facilitada y transporte activo. Adicionalmente, pequeñas cantidades se absorben mediante pinocitosis.

Los **hidratos de carbono** se absorben en forma de monosacáridos, aunque una porción pequeña lo hace como disacáridos. La glucosa ingresa al enterocito por un mecanismo de cotransporte con el ion sodio, que es un proceso en dos etapas: inicialmente los iones sodios atraviesan la membrana basolateral del enterocito hacia la sangre por transporte activo, lo que genera un descenso en la concentración intracelular de este ión. Esta disminución ocasiona un gradiente para el ingreso de sodio desde la luz intestinal, que utiliza un cotransportador con glucosa (SGLT1). El transporte de este monosacárido a través de la membrana basolateral es facilitado por proteínas (GLUT2). Este tipo de mecanismo es denominado transporte activo secundario ya que el transporte activo inicial del sodio en la membrana basolateral del enterocito proporciona la fuerza necesaria para el desplazamiento de la glucosa en el borde apical.

La absorción de los productos de digestión de las **proteínas** se realiza como aminoácidos libres, usualmente debido al mismo mecanismo descrito para la glucosa, y como dipéptidos y tripéptidos mediante un contrtransportador con H^+ denominado PepT1. Se han detectado al menos cinco proteínas de transporte para aminoácidos, debido a las diferencias en las propiedades de unión de los mismos.

Los productos de degradación de las **grasas** se asocian en el intestino con las sales biliares formando micelas, son solubles en el quimo. De esta manera, los monoglicéridos y ácidos grasos se transportan hacia la superficie de las microvellosidades del borde en cepillo, difundiendo hacia el interior de las células intestinales por su solubilidad en los fosfolípidos de la membrana. Recientemente se han descubierto transportadores específicos de la membrana, tanto para ácidos grasos de cadena larga como para el colesterol. Ya en el interior del enterocito, son captados por el REL para formar nuevos triglicéridos, fosfolípidos y ésteres de colesterol que se asocian con apolipoproteínas también sintetizadas por

los enterocitos, formando los quilomicrones, que se exocitan de la membrana basal los vasos quilíferos, ingresando a la circulación linfática desde la cual luego se volcarán a la circulación sanguínea. Una pequeña porción de ácidos grasos de cadena corta pasa directamente a la sangre.

El transporte activo mediante la bomba de Na^+/K^+ en la membrana basolateral del enterocito genera su circulación desde la luz, fenómeno que provoca un gradiente osmótico para el agua, que se transporta en su totalidad por este mecanismo, ya que el quimo usualmente llega allí bastante diluido.

Las **funciones del hígado** son de gran importancia vital para el organismo humano: funciona primordialmente como el primer lugar de procesamiento de la mayoría de los nutrientes absorbidos, ya que los vasos sanguíneos intestinales se reúnen en la circulación portal hepática.

Desde el punto de vista metabólico, ejerce un rol detoxificante eliminando productos de desecho y xenobióticos del organismo mediante su conversión a formas excretables. Este mecanismo tiene dos niveles, el primero de ellos es físico, ya que la sangre entra en contacto en los sinusoides hepáticos con células fagocíticas, las células de Kupffer, que por ejemplo pueden eliminar bacterias o partículas. El segundo nivel es bioquímico: Los hepatocitos poseen una gran variedad de enzimas que metabolizan toxinas de origen endógeno y exógeno, haciéndolas metabólicamente más hidrosolubles y menos susceptibles a ser recaptadas por el intestino. Fundamentalmente existen reacciones de oxidación, hidroxilación y otras, catalizadas por enzimas de la familia del citocromo P450 (denominadas de fase I) y reacciones de conjugación con otras moléculas como ácido glucurónico, sulfato, aminoácidos o glutatión (de fase II). Las toxinas así modificadas se excretan con la bilis o vuelven a la sangre para ser filtradas en la nefrona.

Los hepatocitos también metabolizan catabolitos hidrosolubles de gran tamaño y moléculas ligadas a proteínas plasmáticas como los metabolitos y xenobióticos lipófilos, las hormonas esteroideas y los metales pesados, debido a la presencia de transportadores para estas sustancias en la membrana basolateral, luego de lo cual se vuelcan a la bilis para ser eliminadas con las heces.

Son ampliamente conocidas las acciones de tampón de glucosa del hígado, regulando su liberación cuando se necesita a partir de los depósitos de glucógeno.

Los hepatocitos también participan del metabolismo lipídico por ser fuente de enzimas que participan de la oxidación de los ácidos grasos. También convierten los productos del metabolismo de los hidratos de carbono en lípidos, que pueden almacenarse en el tejido adiposo, y sintetizar lipoproteínas, colesterol y fosfolípidos. Además convierten el colesterol en sales biliares, esenciales en la absorción de los lípidos.

El hígado sintetiza todos los aminoácidos no esenciales y todas las proteínas plasmáticas, como la albúmina y factores de coagulación, a excepción de las inmunoglobulinas. Además, en el hígado se convierte el amoníaco generado en el catabolismo proteico en urea, que luego se excreta en el riñón.

Bibliografía

- Altieri, M. A. 2003. Dimensiones éticas de la crítica agroecológica a la biotecnología agrícola. *Acta Bioethica*, IX (9): 47-61.
- Aranda, D. 2015. Los desmontes de la soja. <http://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-263860-2015-01-14.html>
- Aranda, D. 2015. Transgénicos en la Argentina: Un negocio atendido por sus dueños. www.darioaranda.com.ar/2015/01/transgenicos-en-la-argentina-un-negocio-atendido-por-sus-duenos/
- Baloriani, G.; Marasas, M.; Benamú, M. y Sarandón, S. 2010. Estudio de la macrofauna edáfica (orden Araneae). Su riqueza y abundancia en invernáculos sujetos a un manejo convencional y en transición agroecológica. Partido de La Plata, Argentina. *Agroecología*, 5: 33-40.
- Bedmar, F.; Gianelli, V.; Angelini, H y Viglianchino, L. 2015. Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. RIA, <http://ria.inta.gov.ar/wp-content/uploads/2015/03/Bedmar-Castellano-1.pdf>
- Bermudez, G. y De Longhi, A. L. 2008. La Educación Ambiental y la Ecología como ciencia. Una discusión necesaria para la enseñanza. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 7 (2): 275-297.
- Cap G.; De Luca, L.; Marasas, M.; Pérez, M. y Pérez, R. 2012. El camino de la transición agroecológica. 1era edición. Ediciones INTA, CABA. 90 pp.
- Carrasco, A. 2011. El glifosato: ¿es parte de un modelo eugenésico? *Salud Colectiva*, 7 (2): 129-133. <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s08.htm>
- <http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/MonographVolume112.pdf>
- http://www.programa-ecos.com.ar/2015/editoriales/editorial_15-07-11.html
- Krapovickas, A. 2010. La domesticación y el origen de la agricultura. *Bonplandia*, 19 (2): 193-199.
- Martínez Castillo, R. 2004. Atributos agroecológicos de sustentabilidad: manejo comparativo indígena y convencional. En: V Congreso Centroamericano de Antropología, febrero 23-27, Managua.
- Noss, R. 1990. "Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach", *Conservation Biology* 4: 355-364.

- Otero, M. 2015. Argentina - Patentamiento de la semilla: una expropiación de la vida. Disponible online: www.biodiversidadla.org/Portada_Principal/Documentos/Argentina_-_Patentamiento_de_la_semilla_una_expropiacion_de_la_vida
- Paganelli, A.; Gnazzo, V.; Acosta, H.; López, S. y Carrasco, A. 2010. Glyphosate-Based Herbicides Produce Teratogenic Effects on Vertebrates by Impairing Retinoic Acid Signaling. *Chem. Res. Toxicol.* 23, 1586–1595.
- Perelmuter, T. y Poth, C. 2013. El rol del Estado en el modelo de desarrollo biotecnológico agrario. El caso de la Argentina de 2003 a 2010. <http://www.vocesenelfenix.com/content/el-rol-del-estado-en-el-modelo-de-desarrollo-biotecnol%C3%B3gico-agrario-el-caso-de-la-argentina>
- Rapoport, E.; Marzoca, A. y Drausal, B. S. 2009. Malezas comestibles del Cono Sur y otras partes del planeta. INTA.
- Revista Mu: <http://www.lavaca.org/notas/andres-carrasco-cientifico-y-militante-gracias/>
- Sarandón, S.J. 2002. La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la Agricultura intensiva de la Revolución Verde. En: *Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable*. S.J. sarandón (ed.). Ediciones Científicas Americanas E.C.A. La Plata. pp. 23-47.
- Teubal, M. 2006. Expansión de la soja transgénica en Argentina. <http://www.vocesenelfenix.com/content/expansi%C3%B3n-de-la-soja-transg%C3%A9nica-en-la-argentina>
- Tito, G. y Marasas, M. 2014. Actividad agropecuaria y desarrollo sustentable. ¿qué nuevos paradigmas para una agricultura agroecológica? *La Agroecología desde el concepto a la política pública*. En: Hernández, V.; Goulet, F.; Magda D. y Girard, N. (eds.). *La Agroecología en Argentina y Francia: miradas cruzadas*. INTA, Buenos Aires. pp: 89-100.
- Villaamil Lepori, E.C.; G. Bovi Mitre y M. Nassetta. 2013. Situación actual de la contaminación por plaguicidas en Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (Número especial sobre plaguicidas) 25-43.

[1] Texto de la ponencia de Vicent Garcés, en la Conferencia sobre Soberanía Alimentaria en el Foro Social Mundial de Porto Alegre 2002

Actividades para el aula

Para este capítulo hemos propuesto dos actividades, de distinto nivel de complejidad, siendo la actividad B aplicable a un trabajo con adultos o en un nivel terciario, donde los estudiantes tengan una capacidad analítica mayor, dado que requiere una integración más amplia entre los contenidos disciplinares con las problemáticas sociopolíticas involucradas en el tema.

A. Agroecología y Soberanía Alimentaria

La presente actividad se sugiere como parte del desarrollo de la Unidad N° 3, Agroecología, de 4to año de la escuela secundaria, para que cada docente adapte según su criterio. Se propone como una actividad de desarrollo, dado que su lectura requiere del conocimiento de conceptos generales como la sustentabilidad y las consecuencias ambientales del monocultivo y los agrotóxicos.

El material para la lectura consta de dos textos: uno aborda de un modo integral diversos conceptos vinculados a la agroecología y la soberanía alimentaria, e incorpora las discusiones respecto de las políticas agroeconómicas y la biodiversidad producidas por el cultivo de Soja Transgénica. El otro, es un fragmento de un informe publicado por la revista Investigación y Ciencia, con motivo de que la OMS (Organización Mundial de la Salud) declaró al Glifosato como “probablemente cancerígeno”.

Se sugiere un desarrollo en dos clases (de dos horas cada una) pudiendo emplearse como disparadora de nuevas actividades como un juego de roles. La presente actividad permite realizar una evaluación individual y una evaluación de participación e integración grupal.

Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina

Biología ES4 Santillana. Edición 2010, Pag. 228.

La expansión de un cultivo determinado puede ocurrir en detrimento del cultivo de otras especies y variedades, lo cual lleva a una homogeneización del paisaje y a la pérdida de numerosas especies silvestres que pueden ser exitosas o subsistir en mosaicos agrícolas o

mixtos, debido al uso extensivo de herbicidas asociados. Se puede considerar que esta menor diversidad agrícola es un indicador de deterioro ambiental, donde no sólo la diversidad de cultivos sino también la diversidad de especies y procesos ecológicos asociados a paisajes heterogéneos se ven afectados negativamente.

Además de los costos ambientales, la menor diversidad de cultivos tendría consecuencias sobre las estructuras productiva y social. La disminución de la diversificación productiva conduciría a que el crecimiento económico se torne más dependiente de las fluctuaciones de precios asociados a uno o unos pocos cultivos genéricos (commodities), lo que aumenta la vulnerabilidad de la estructura económica.

El poroto de soja y sus derivados (pellets, aceites, etc.) constituyen el principal rubro de exportación de la Argentina, uno de los países productores líderes a nivel mundial. La significativa expansión de la soja que se observa a partir de los '90 ha determinado que este cultivo sea el más importante de la Argentina, tanto en área sembrada como en producción económica.

Las causas de esta expansión, además de la aptitud de muchos de los biomas de nuestro país para este cultivo, deben buscarse en los precios crecientes de este *commodity* en el mercado internacional, altos rendimientos de las variedades modificadas genéticamente, tiempos cortos de rotación, y costos bajos de labranza, ya que este cultivo se presta al método de "siembra directa".

La expansión del cultivo de soja en el campo argentino trae aparejado un alto costo ambiental a causa de diversos procesos. El primero, la expansión de la frontera agrícola debido al acelerado desmonte y reemplazo de sistemas naturales o seminaturales por soja implica una pérdida directa de biodiversidad nativa. El segundo, la expansión virtual resultante de la combinación trigo y soja conlleva una intensificación en el uso de la tierra. Esta rápida rotación agrícola usualmente acelera distintos procesos de degradación ambiental, particularmente de erosión y pérdida de nutrientes del suelo. El tercero, la homogeneización del paisaje agrícola. La menor heterogeneidad espacial dentro del paisaje agrícola puede también afectar negativamente los servicios ecosistémicos importantes para la agricultura como el control de plagas y la polinización, incluso otras actividades derivadas como la producción de miel y hasta la actividad turística. Finalmente, el proceso de especialización sojera tiene impactos ambientales propios de esta leguminosa, que deteriora más el suelo que otros cultivos agrícolas monoespecíficos, ya que deja poco rastrojo en superficie.

Pero además la soja, como cultivo predominante podrían afectar la seguridad alimentaria. El trigo, cultivo dominante en décadas anteriores, es en nuestro país (y en gran parte del mundo) un alimento de consumo popular. Por el contrario, la soja no es un producto que se consuma de manera masiva en la Argentina. Más de 90% de la producción total se exporta, y sólo una porción es utilizada como alimento humano. Por otro lado, el grado de la dominancia de la soja se dio en parte en detrimento de la producción de otros alimentos básicos. De mantenerse la tendencia a la baja en la diversidad de cultivos podría inducirse a aumentos en los precios de algunos alimentos con el consecuente efecto negativo sobre el salario real y, eventualmente, a la necesidad de importarlos para satisfacer la demanda.

En la actualidad, nuestra sociedad debate el modelo de desarrollo a seguir, y en el campo agrícola se contraponen el modelo de especialización sojera, con objetivos cortoplacista y con costos ambientales altos, a otro más diversificado, posiblemente con una producción inferior de dinero a corto plazo para el productor, pero más sustentable y seguro en el largo plazo. Este texto no pretende resolver este debate, pero sí alertar de algunas consecuencias sobre las cuales se ha discutido pero que hasta el momento no habían sido cuantificadas. Nuestros resultados indican que la diversidad de cultivos para la alimentación en la Argentina es menor en la actualidad que en toda su historia reciente y que, de continuarse esta tendencia, es muy probable que se profundicen los múltiples costos sociales y ambientales, como la soberanía alimentaria, la dependencia económica y el deterioro del suelo.

¿Cuál es la evidencia? Revista Investigación y Ciencia

(<http://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/widely-used-herbicide-linked-to-cancer/Noticias>)

La semana pasada, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC), perteneciente a la Organización Mundial de la Salud, anunció que el glifosato –el herbicida más utilizado en el mundo– es probablemente carcinógeno para los seres humanos. Esta afirmación ha despertado una inmediata respuesta por parte de las agrupaciones industriales.

El 23 de marzo, Robb Fraley, director de tecnología de la compañía agroquímica Monsanto en St. Louis (Missouri), que vende gran parte del glifosato mundial, acusó a la IARC de "elección selectiva de datos".

¿Qué dice el informe de la IARC?

La IARC revisa regularmente la carcinogenicidad de los productos químicos industriales, alimentos e incluso de los puestos de trabajo. El 20 de marzo, un grupo de expertos internacionales convocados por la agencia informó sobre los resultados de una revisión de cinco productos químicos organofosforados. Un resumen del estudio fue publicado en *The Lancet Oncology*.

El glifosato es el herbicida más utilizado del mundo, en volumen. Su uso es muy común en agricultura y también se encuentra en productos de jardinería de muchos países.

Crédito: Chafer Machinery via Flickr . Dos de los pesticidas –tetraclorvinfos y paratión– fueron calificados como "posiblemente cancerígenos para los seres humanos", y etiquetados en la categoría 2B. Otros tres herbicidas –malatión, diazinón y el glifosato– fueron calificados como "probablemente cancerígenos para los seres humanos", y etiquetados como categoría 2A.

Actividades a realizar:

1ra. Clase

1. Lectura individual y comprensiva, con realización de un resumen de los textos, destacando los puntos más relevantes y subrayando los términos de difícil comprensión.
2. Puesta en común de los fragmentos que a cada estudiante le parecieron relevantes, discutiendo el significado de los términos que presentaron dificultad, intentando que su significado surja de la interpretación contextual. Esta actividad además de una evaluación individual, nos permite realizar un rastreo de saberes previos (Tiempo estimado, 1 hora).
3. En grupos de tres o cuatro estudiantes, se responde y discute el siguiente cuestionario, que será entregado al final de la clase junto con los resúmenes individuales.

- a. ¿A qué se refiere con “pérdida de numerosas especies silvestres que pueden ser exitosas”? ¿Cuál es su importancia?
- b. Confeccione una lista con las causas y otra con las consecuencias ambientales y socioeconómicas de la expansión sojera, incluyendo los dos textos.
- c. Basados en el texto, defina los problemas del actual modelo para la sustentabilidad, bioseguridad y la soberanía alimentaria. ¿Qué ventajas estimularon su expansión?
- d. Discuta y realice un cuadro de dos columnas enumerando en una los diferentes actores involucrados en el actual modelo de producción agrícola en Argentina, y en la otra los intereses políticos, sociales y/o económicos de cada uno de los actores. (Antes de que lleguen a este punto, el docente deberá invitar a una reflexión general respecto de todos los actores y sus intereses. Por ejemplo: Estado Nacional a través de sus ministerios de economía, relaciones exteriores, salud, cultura y trabajo; pequeños agricultores, grandes propietarios de tierras, empresas de agroexportación, multinacionales como Monsanto y Singenta, Estados Unidos a través de organismos internacionales como OMC y el BM; organizaciones sociales y populares involucradas en la producción, el consumo y la salud).
- e. Considerando que en el texto se menciona la necesidad de plantear un nuevo modelo de producción más sustentable, establezca las diferencias que deberían encontrarse entre los actores y los intereses priorizados en cada modelo.

Tiempo estimado para el trabajo grupal, 1 hora)

Se deja la tarea de investigar para la clase siguiente en los sitios web correspondientes a cada actor mencionado, o en informaciones periodísticas, las posturas expresadas por cada uno respecto del modelo de cultivo de soja transgénica.

2da. clase

El docente devuelve los trabajos individuales y los grupales y se propone una puesta en común y un debate respecto de las diferencias entre las respuestas producidas para los tres últimos puntos.

- ¿Cuáles actores de los mencionados defienden y están a favor del actual modelo y cuáles lo cuestionan? ¿Por qué?
- ¿Qué información extra necesitan buscar para fundamentar con datos de la realidad las posiciones de cada actor?

Se asigna a cada grupo la identidad de alguno de los actores.

- Realizar un informe grupal con la posición del actor asignado, para participar en un debate o juego de roles en el que cada grupo defienda su posición.

B. Políticas agroalimentarias y movimientos sociales

La siguiente actividad está basada en una nota escrita por un representante de movimientos campesinos, y plantea los problemas que el actual modelo de agronegocios ofrece para los pueblos y naciones en desarrollo. El texto permite articular los conceptos de agroecología, soberanía alimentaria y sustentabilidad, atravesados por las políticas de estado, el poder de las multinacionales y los intereses en juego por los que los gobiernos ceden a las presiones, generando la reacción de campesinos y consumidores. Las consecuencias de estas políticas tanto para la sustentabilidad agroecológica como para la desigualdad social y la calidad de vida de las comunidades son los debates que surgen al problematizar estos conceptos.

Clase 1: Leer el texto en grupos de 2 o 3, y responder:

- Describa brevemente los problemas que plantea el texto respecto de la Sustentabilidad, de la Soberanía alimentaria y Soberanía Política.
- Interprete el cuadro, destacando el motivo por el cual se incorpora al texto.
- Realice una lista de los actores sociales (Grupos de personas que realizan una misma actividad laboral) y organizaciones populares que se mencionan en el texto.

- ¿Cuáles son los grupos mayoritarios? ¿Cuáles los que tiene mayor poder económico y político? ¿Con qué grupo se identifican según su modo de vida?
- ¿Qué conclusiones trata de producir el texto?

Terminada la actividad de los grupos, se realiza una puesta en común en la que cada grupo lee su respuesta y se abre el debate si hay otras respuestas alternativas, buscando consensos.

Tarea de búsqueda: cada grupo deberá buscar, mediante noticias periodísticas u otro tipo de publicaciones, qué situaciones como las planteadas en el texto podemos encontrar en nuestra ciudad o provincia, y cuáles grupos sociales de la realidad local confrontan en estas problemáticas planteadas.

Clase 2: Se realiza una puesta en común de las búsquedas, incluyendo experiencias personales, mientras el docente construye un cuadro territorial sobre la situación planteada en las notas (las semillas, agrotóxicos, tierras, empresas monopólicas, soberanía alimentaria, soberanía política). El cuadro se construye en un diálogo interactivo que incorpore los siguientes interrogantes:

- ¿Podemos hacer una lista de actores sociales y organizaciones populares como la anterior? ¿Conocemos alguna de ellas? ¿Podemos realizar una lista de problemas y posibles soluciones, según los planteos y reclamos de esas organizaciones? (Completar información buscando en páginas web de las organizaciones campesinas, de consumidores, ambientalistas, etc)

Semillas, multinacionales y movimientos sociales

Paco Puche - Septiembre, 2011

Los movimientos de resistencia a las multinacionales de la agroalimentación (de semillas, transgénicos, pesticidas, industrias de transformación, agua, etc.) lo tienen muy claro: las semillas son la base de la alimentación y de la soberanía alimentaria de los pueblos, por lo que un objetivo estratégico de primera importancia para estos movimientos está puesto en la lucha contra estas multinacionales, unas pocas empresas que controlan las semillas comerciales en el mundo, entre otras cosas.

Semillas, campesinas y campesinos

Las semillas constituyen la realidad y el símbolo de la promesa de una nueva vida. Ellas mantienen el lazo entre la vida conservada y la vida por venir. Son el eslabón fuerte en la trama de la vida. Constituyen la gran metáfora de la creación.

“Por eso son muchísimo más que un recurso productivo, son simultáneamente fundamento y producto de culturas y sociedades a través de la historia. En las semillas se incorporan valores, afectos, visiones y formas de vida que las ligan al ámbito de lo sagrado... No son apropiables..., son un patrimonio de los pueblos campesinos e indígenas, quiénes las creamos, diversificamos y protegimos a través del tiempo y las ponemos al servicio de la humanidad.”⁸ La industrialización agrícola, que nos parece tan natural en Occidente a través del *agribusiness*, no es la regla sino la excepción:

“Existen 1500 millones de campesinos en 380 millones de fincas, ranchos, chacras, parcelas; 800 millones más cultivan en las ciudades; 410 millones recolectan la cosecha oculta de nuestros bosques y sabanas; hay 190 millones de pastores y bastante más de 100 millones de campesinos pescadores. Por lo menos 370 millones de todos ellos pertenecen a pueblos indígenas. Juntos, esos campesinos son casi la mitad de la población mundial y cultivan al menos el 70 por ciento de los alimentos del planeta. Mejor que nadie,

⁸ CLOC-Vía Campesina (2010), “ Documento final de la reunión de la campaña de semillas”, Quito, octubre 2010, consultada en: <http://www.grain.org/article/entries/4089-documento-final-reunion-de-la-campana-de-semillas-cloc-via-campesina>

ellos alimentan a quienes sufren hambre. En el futuro, para alimentarnos, necesitamos de ellos y de toda su diversidad”⁹.

Podemos decir, aproximadamente, que los sistemas de cultivo vigentes en los países más industrializados alimentan a unas 1.200 millones de personas, la agricultura de la “revolución verde” en el Sur a unas 2.500 millones y la agricultura de subsistencia o campesina a otras 2.200 millones de personas en el mundo. Los mil millones de subalimentados se las arreglan como pueden.

Pero históricamente sabemos también que los cambios tecnológicos introducidos en la agricultura durante miles de años, desde el neolítico hasta la era industrial, fueron realizados por campesinos/as (e indígenas) que supieron innovar adaptándose a ecosistemas diferentes. El estadounidense F.H. King, en un viaje que realizó a principios del siglo XX por el continente asiático, observó “que los sistemas no industriales permitían alimentar a 500 millones de seres humanos en una superficie más pequeña que la totalidad del área agrícola de EEUU y sobre suelos que habían sido utilizados durante cerca de 4.000 años”¹⁰.

Durante ese tiempo, que constituye la mayor parte de la historia de la agricultura, los campesinos y principalmente las campesinas trabajaron para mejorar los rendimientos, el sabor, el valor nutricional y la adaptación a los ecosistemas locales, a partir de sus semillas tradicionales. Históricamente, la conservación, la resiembra y el intercambio gratuito de semillas han sido la base de la biodiversidad y de la seguridad alimentaria. Este intercambio campesino incluía también una difusión de conocimientos, ideas, costumbres y culturas heredadas. “Hoy día la diversidad y el futuro de las semillas se encuentra amenazado. De 8.000 plantas comestibles utilizadas para la alimentación, sólo 150 son cultivadas actualmente y nada más que ocho son comercializadas a nivel mundial. Esto implica la desaparición irreversible de las semillas y de la diversidad de los cultivos”¹¹. Y según datos del Convenio de Diversidad Biológica, sólo quince variedades de cultivos y ocho de animales representan el 90% de nuestra alimentación.

⁹ Grupo ETC (2010), “ Quién alimenta al mundo” , Biodiversidad , Abril 2010, consultado en : <http://www.grain.org/article/entries/4110-quien-alimenta-al-mundo>

¹⁰ Pérez-Vitoria (2010), o.c. p. 76

¹¹ Vandana Shiva, Martini, Altieri y otros (2006) “Manifiesto sobre el futuro de las semillas”, por la Comisión Internacional para el Futuro de los Alimentos y de la Agricultura, consultado en : http://www.agroeco.org/socla/archivospdf/futurosemi_spa.pdf

Semillas y multinacionales

El grupo alternativo ETC (Grupo de Acción sobre Erosión, Tecnología y Concentración, de origen canadiense) nos advierte que “las 10 principales compañías controlan dos tercios del mercado mundial de semillas patentadas. La mayor empresa semillera del mundo, Monsanto, tiene casi un cuarto del mercado mundial de semillas patentadas. Juntas, las 3 principales compañías (Monsanto, DuPont, Syngenta), tienen casi la mitad del mercado mundial de semillas patentadas”. El siguiente cuadro nos permite ver una visión detallada del oligopolio agroalimentario:

Las 10 empresas más grandes del planeta según su participación en el mercado mundial por sectores

Sectores	Porcentajes %
Semillas comerciales	67% de marcas registradas
Agroquímicos	89%
Farmacéuticas	55%
Farmacéuticas veterinarias	63%
Biotecnologías	66%
Alimentos y bebidas	26%

(Fuente: ETC, “De quién es la naturaleza. El poder corporativo y la frontera final de la mercantilización de la vida”, 2008).

En cuanto a propiedad intelectual, solamente Monsanto, DuPont y BASF acumulan el 66% de todas las patentes, tanto otorgadas como solicitadas en las oficinas de patentes del mundo, entre 2008 y 2010, relacionadas con la resistencia a la crisis climática.¹²

Además, en los últimos veinte años se está produciendo una integración vertical por parte de las corporaciones de todos los sectores agroalimentarios. Incorporan en sus procesos grandes segmentos de la cadena alimenticia o toda ella, desde el diseño y comercio de semillas hasta la distribución y venta al por menor, incluyendo la infiltración en los movimientos sociales de resistencia. Esta integración, que queda bajo su control directo, se

¹² Grupo ETC (2011), “A la caza de genes climáticos”, consultada en: <http://www.etcgroup.org/es/node/5252>

logra sobre todo mediante contratos. También se hacen más grandes por fusiones o compras, por ejemplo Cargill, en 1998 adquirió Continental, una gran empresa de comercio de grano, y se convirtió la comercializadora de bienes de exportación agrícola más grande del mundo. Multiplicó por seis veces su cifra de negocios en los últimos diez años¹³.

Pese a lo dicho, la mayoría de las semillas no se siembra en aras de objetivos empresariales. La mayor parte de los campesinos no son parte de este sistema corporativo, la mayor parte de la gente no se alimenta de este sistema. Y aunque esta concentración ha crecido enormemente en estos últimos veinte años, todavía el 85% de los alimentos que se producen es consumido en la misma región ecológica o por lo menos dentro de las fronteras nacionales, la mayor parte se cultiva fuera del alcance de la cadena de las multinacionales e, igualmente, la mayor parte de esta comida se obtiene a partir de variedades campesinas, sin utilizar los fertilizantes químicos que promueve la cadena industrial¹⁴. No está todo perdido ni mucho menos.

Por eso, **por medio de normas y leyes se intenta privar a los pueblos de su capacidad de mantener, reproducir, mejorar e intercambiar semillas como siempre han hecho.** GRAIN¹⁵ señala: “No es fácil para los Estados implementar estas leyes porque es mucha la gente a la que tienen que controlar: gente que lleva siglos resistiendo, batallando y produciendo comida. Por lo tanto estas leyes, a pesar de lo terribles que son, son aún sólo papel y letra y seguirán siéndolo en la medida que sigamos produciendo alimento de manera independiente. La pelea va a ser dura, pero por otro lado no hay que olvidar que el ataque es así de feroz e implacable porque la capacidad que hoy día tienen los pueblos campesinos e indígenas del mundo de seguir produciendo comida es sumamente importante. Si la comida que producen los pueblos campesinos e indígenas fuese marginal, no se necesitarían estas leyes. Por eso hoy en día es más importante que nunca mantener las semillas propias y todos los sistemas colectivos que permiten que esa semilla se mantenga viva y se man-

¹³ Ironías del destino, la citada multinacional ha llegado a un acuerdo (*joint venture*), al 50%, con la empresa Hojiblanca de la comarca de Antequera (Málaga) para la comercialización del buen aceite de oliva de la citada zona. Uno de los almacenes de embotellado y distribución lo ha instalado la multinacional en la que fuera antaño la Casería Eslava, finca de mi familia y lugar en el que hasta los 17 años frecuentaba en verano, participando a mi escala en las faenas del campo, en ese tiempo en que aún estábamos fuera de la “revolución verde”. Allí se cultivaba trigo, cebada y maíz con algo de huerta y frutales, combinado con ganadería de labor y de consumo. Todo ecológico.

¹⁴ Grupo ETC (2010), o. c.

¹⁵ GRAIN (2010), “Leyes para acabar con la agricultura independiente”, Biodiversidad, abril 2010, consultada en: <http://www.grain.org/article/entries/4109-leyes-para-acabar-con-la-agricultura-independiente>

tenga caminando". El ataque seguirá siendo feroz y por todos los medios al alcance de las multinacionales, porque la promesa de negocio de este sector estratégico es mayor que la del petróleo y los automóviles juntas.

Así ha de ser, por ejemplo, frente a normas como las implantadas en Colombia en 2010, por las que hay que pedir autorización para guardar semillas y resembrarlas, o permitir la inspección administrativa por parte de los funcionarios autorizados, se ha corrido la voz de esconder las semillas para ocultarlas de la policía de genes. Esto recuerda la distopía inventada por Bradbury, en su novela "Fahrenheit 451", en la que cada resistente debería memorizar un libro, una las obras inmortales escritas por la humanidad, solo que ahora se tratarían de semillas clandestinas de variedades locales autoproducidas o intercambiadas, guardadas con celo por cada campesino/a.

Igual pasa en México, en donde a partir de la Ley de Semillas de 2007 toda semilla tiene que ser de producción propia o comprada, no hay otra alternativa, eso significa que intercambiar o regalar semillas es ilegal. También en Chile acaban de aprobar (en el Senado, y ratificado después por el Tribunal Constitucional el pasado 24 de junio) la adhesión del país al Convenio UPOV 91 (Organización Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales, que trata de proteger la propiedad intelectual) que al decir de los opositores a esta ley "restringe y prohíbe el uso, mantención, multiplicación e intercambio de las semillas. Con ello privatiza un bien naturalmente común, lo que es expresamente prohibido por la Constitución chilena"¹⁶. Según el Convenio UPOV 91, una planta que no circule en el comercio general o no aparezca en un registro oficial puede ser considerada nueva o distinta y patentada.

En Europa asistimos, igualmente, a una privatización galopante de las semillas convencionales. El próximo mes de octubre la Oficina Europea de Patentes (OEP) en Múnich dictará el fallo definitivo sobre patentes sobre el brócoli y sobre tomates que abarcan las semillas, las plantas y los alimentos obtenidos a través de cultivos convencionales. No se trata de transgénicos. Hay un precedente inquietante y es que en marzo de este año la OEP otorgó a Monsanto una patente sobre melones obtenidos a través de cultivos convencionales. Si estas patentes se siguen otorgando empresas como Monsanto no solo tendrán el control de las semillas transgénicas sino también sobre cultivos y crías normales.

¹⁶ De la declaración de Camila Montesinos, investigadora de GRAIN, ante el Tribunal Constitucional de Chile, junio 2011

Juego:

Síntesis de proteínas

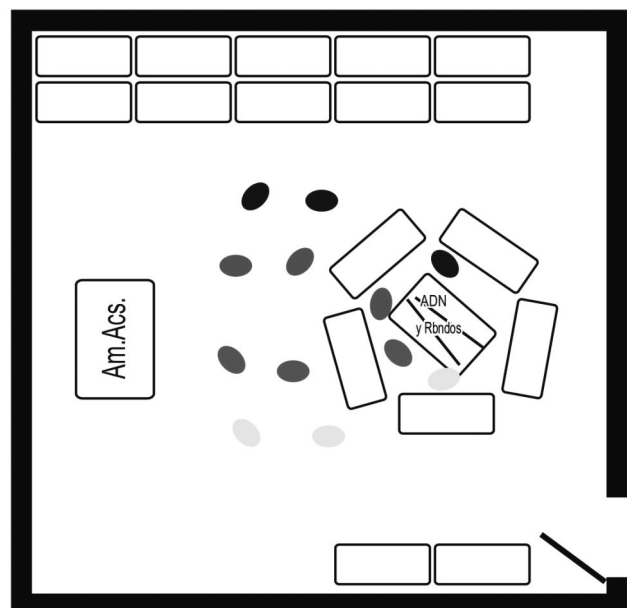
Reglamento

De este Juego participan cuatro equipos de tres jugadores cada uno; cada equipo estará fiscalizado por un cuarto participante.

El aula se presenta como una célula, y el juego se desarrolla dentro de ella. Se disponen cuatro bancos que demarcarán el núcleo de la célula, y un banco central en donde se encuentra el ADN (ver gráfico). Formando parte del ADN, se encuentran los **genes**, representados por 8 secuencias de desoxirribonucleótidos, designados según la proteína que cada uno codifica. Al lado, en una caja, se encuentran los ribonucleótidos.

En el exterior del núcleo, sobre otro banco, se disponen los aminoácidos, y equidistantes de los aminoácidos se disponen los cuatro equipos.

Un jugador de cada equipo deberá sacar una **tarjeta OBJETIVO** que indica la proteína a sintetizar (que mostrará al fiscal), y una **tarjeta BASE** sobre la que se armará el ARNm, y la proteína. Otro jugador deberá tener el cuadro con el código genético. El fiscal debe buscar y ocultar, el modelo de la proteína indicada en la tarjeta, sin que nadie la vea.



Ya dispuestos, el juego comienza a la cuenta de tres: el **jugador 1** con ambas tarjetas ingresa al núcleo y procede a formar el ARNm con los **ribonucleótidos**, de modo complementario al gen que le indica la tarjeta. Terminada la transcripción, el **jugador 1**, sin salir del núcleo, le entrega la tarjeta con el mensajero al **jugador 2** quien además tiene la tabla con el código genético. Es el jugador 2 quien deberá hacer la traducción, pidiendo al **jugador 3**, los aminoácidos correspondientes de a uno, según la secuencia de tripletes del ARNm.

Completada la proteína, el jugador 2 deja la tarjeta sobre un banco para que el fiscal compare la secuencia de Aminoácidos con la modelo, que él posee; si no coincide, el **jugador 3** deberá corroborar junto al jugador 2 si el error está en la **Traducción**, y si no es así, deberá alcanzársela al jugador 1 para que corrija la **Transcripción**.

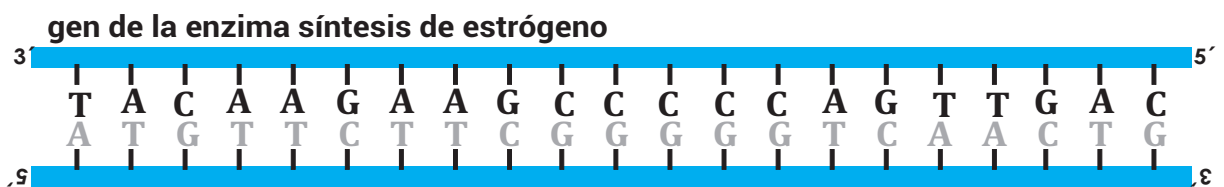
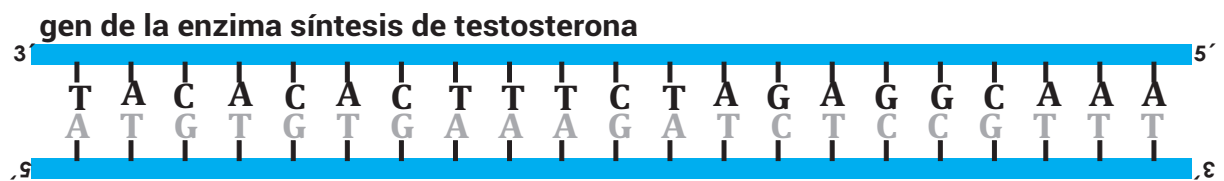
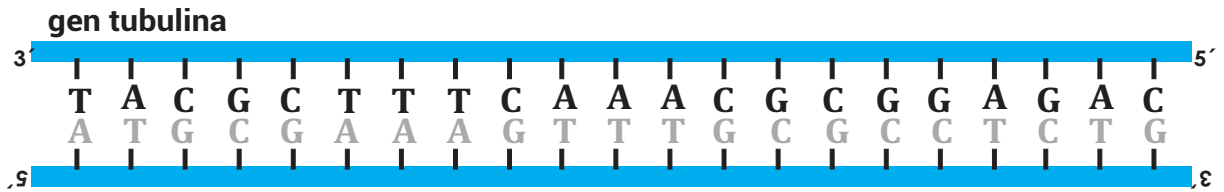
El primer equipo que complete la síntesis de la proteína, es el ganador.

Jugadores: 4 equipos de tres jugadores cada uno

Elementos:

- **Tarjeta OBJETIVO:** indica un proceso metabólico y la *proteína a sintetizar*.
- **Tarjeta MOLDE:** es la base sobre la que se arma el ARNm y la Proteína.
- **Genes:** secuencia de ADN que codifica una proteína determinada en el núcleo de la célula.
- **Ribonucleótidos:** están en el núcleo junto al ADN para sintetizar el ARNm.
- **Aminoácidos:** están fuera del núcleo para sintetizar la Proteína.

Estos son los genes, deben pegarse uno a continuación del otro formando dos tiras dando la idea de cadenas continuas de ADN



Esta célula, que se está por dividir, sintetiza la proteína **tubulina**, esencial en el movimiento de los cromosomas.

Esta célula pertenece a la glándula mamaria, y sintetiza **proteínas de la leche** importantes para la alimentación del bebe.

Esta es una célula salival, sintetiza la **enzima amilasa**, que inicia la digestión en la boca.

Esta célula del riñón, sintetiza la enzima **renina**, para disminuir la producción de orina.

Esta célula muscular sintetiza la proteína llamada **actina**, que forma parte de las fibras contráctiles

Esta célula del testículo sintetiza una **enzima para la síntesis de testosterona**, la hormona sexual masculina

En esta célula intestinal, se sintetiza una **proteína transportadora** para aumentar la incorporación de calcio.

Esta célula del ovario sintetiza una **enzima para la síntesis de estrógenos**, una de las hormonas sexuales femeninas.

Proteína muscular actina

Met — Gly — Ile — Tyr — Leu — His — Arg

Proteína estructural tubulina

Met — Arg — Lys — Phe — Ala — Pro — Leu

Enzima salival amilasa

Met — Lys — Pro — Val — Cys — Ala —

Enzima para la síntesis de testosterona

Met — Cys — Glu — Arg — Ser — Pro — Phe

Enzima para síntesis de progesterona

Met — Phe — Phe — Gly — Gly — Gln — Leu

Proteína transportadora de calcio

Met — Thr — Asn — Ile — Phe — Gly — His

Enzima renina, controla la presión sanguínea

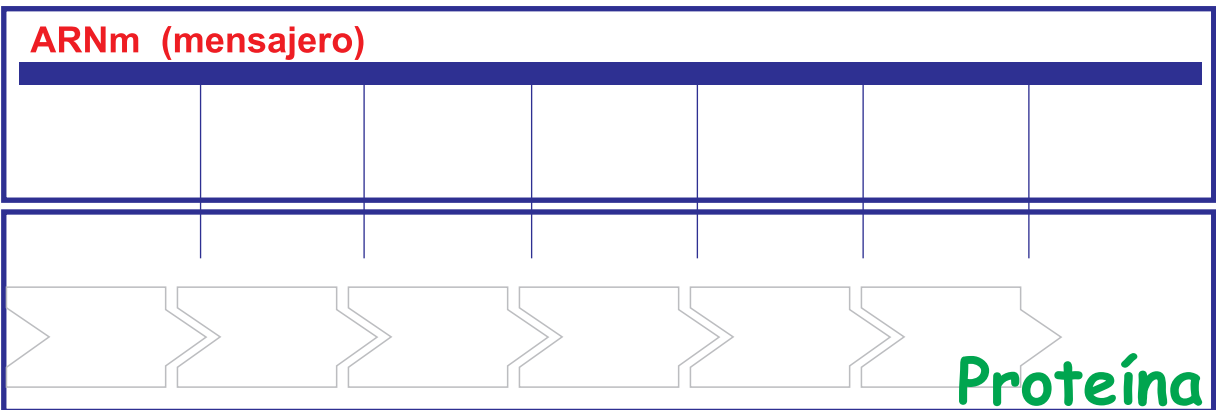
Met — Asn — Glu — Thr — Arg — Phe — Asp

Proteína presente en la leche materna

Met — Phe — Gly — Pro — Gln — Cys — Gln

Esta página y la posterior debe copiarse cuatro veces y se recomienda se imprimen sobre papel autoadhesivo para luego pegarlos sobre una placa de goma imantada, excepto el código genético que se lo pegará sobre cartón. Los ribonucleótidos deben cortarse con un cutter individualmente, al igual que los aminoácidos.

A	U	G	C	A	U	G	C	A	U	G	C
A	U	G	C	A	U	G	C	A	U	G	C
A	U	G	C	A	U	G	C	A	U	G	C
A	U	G	C	A	U	G	C	A	U	G	C



U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U C A G		
	UUC	Leu	UCC	Pro	UAC	Stop	UGC	Arg			
	UUA		UCA		UAA		Stop			UGA	Stop
	UUG		UCG		UAG		Stop			UGG	Trp
C	CUU	Leu	CCU		Pro	CAU	His		CGU	Arg	U C A G
	CUC		CCC	CAC		Gln	CGC				
	CUA		CCA	CAA			CGA				
	CUG		CCG	CAG			CGG				
A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U C A G		
	AUC		ACC		AAC	Lys	AGC	Arg			
	AUA		ACA		AAA		AGA				
	AUG	Met	ACG		AAG		AGG				
G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU		Gly	U C A G	
	GUC		GCC		GAC	Glu	GGC				
	GUA		GCA		GAA		GGA				
	GUG		GCG		GAG		GGG				



