

INTRODUCCIÓN

En el cortometraje [La Biología del Color de la Piel](#), la antropóloga Dra. Nina Jablonski de la Universidad Penn State presenta evidencia de que las distintas tonalidades de la piel humana son adaptaciones evolutivas a la variación en intensidad de radiación ultravioleta (UV) en diferentes partes del mundo. Es lo más probable que nuestros ancestros humanos modernos en África tuvieran piel oscura, producida por la abundancia del pigmento eumelanina en las células cutáneas. En el ambiente con alto nivel de radiación UV del África sub-sahariano (o ecuatorial), una piel más oscura ofrece protección contra los efectos dañinos de la radiación UV. La Dra. Jablonski explica que la variación en el color de piel que evolucionó a partir de la emigración de algunas poblaciones humanas de África se puede explicar mediante el punto de equilibrio entre la protección contra la radiación UV y la necesidad de absorber cierta cantidad de rayos UV para la producción de la vitamina D.

CONCEPTOS CLAVE

- A. Las características biológicas no son inherentemente buenas o malas. Algunas características pueden dar una ventaja a un organismo en un ambiente, pero ser una desventaja en otros ambientes.
- B. Las características heredadas que otorgan una ventaja para la supervivencia y la reproducción en un determinado ambiente tienen mayor probabilidad de ser transmitidas a la próxima generación y, por lo tanto, volverse más comunes a medida que pasa el tiempo.
- C. Diferentes poblaciones humanas que han vivido durante muchas generaciones en un lugar del mundo en particular pueden presentar variaciones en ciertas características. A pesar de estas diferencias, todos los seres humanos están muy cercanamente emparentados y comparten la mayoría de sus características biológicas.
- D. Evidencia proveniente de diferentes disciplinas, como la antropología, la biología evolutiva, la fisiología, la genética y la biología celular, pueden aportar conocimientos sobre qué es lo que hace que una característica humana resulte beneficiosa o dañina en determinado ambiente.
- E. Las variaciones en los genes pueden generar diferencias en características biológicas. Mediante el estudio de las secuencias de ADN en personas provenientes de diferentes poblaciones, se puede estimar cuándo y dónde surgieron esas variaciones.
- F. La evolución puede involucrar compensaciones: una modificación en un gen que resulte en una adaptación a una característica del medioambiente podría significar una desventaja con respecto a otra característica de ese mismo ambiente.
- G. Las células de organismos pluricelulares se especializan para satisfacer diferentes funciones en el individuo.
- H. Las moléculas en los organismos vivos absorben o reflejan ciertas longitudes de onda de la luz solar. Cuando una molécula absorbe luz, la energía se transforma en otras formas de energía.

CONEXIONES CURRICULARES (ESTADOS UNIDOS)

| Estándares | Conexiones Curriculares |
|---|---|
| NGSS (2013) | LS3.A, LS3.B, LS4.A, LS4.C |
| AP Biology (2015) | 1.A.1, 1.A.2, 1.C.3, 3.A.1, 3.C.1, 4.C.1, 4.C.2 |
| AP Environmental Science (2013) | I.A, III.B |
| IB Biology (2016) | 1.2, 2.6, 3.4, 5.1, 10.2 |
| IB Environmental Systems and Societies (2017) | 8.1 |
| Common Core (2010) | ELA.RST.9-12.2, WHST.9-12.4 |
| Vision and Change (2009) | CC1, CC2 |

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Los estudiantes deberían

- estar familiarizados con el concepto del árbol de la vida y saber que los humanos pertenecen al grupo de los primates y que los chimpancés son los parientes vivos más cercanos a nuestra especie,
- saber que los humanos modernos evolucionaron en África y luego migraron hacia diferentes partes del mundo, y
- saber que existen métodos científicos para analizar y comparar el ADN de diferentes individuos dentro de una especie y entre especies.

PUNTOS DE PAUSA

Esta película puede proyectarse sin interrupciones o con pausas en momentos específicos con el fin de analizar contenidos con los estudiantes. El cuadro a continuación sugiere momentos o puntos de pausa e indica el minuto de la película en el que comienza y termina cada uno de ellos.

| | Inicio | Fin | Descripción del contenido | Preguntas de discusión |
|---|--------|------|--|--|
| 1 | 0:00 | 3:54 | <ul style="list-style-type: none"> • Las características biológicas no son ni buenas ni malas. Son características que han ido evolucionando dentro de poblaciones porque mejoran las probabilidades de que un organismo sobreviva y transmita sus genes a su descendencia. • El color de la piel es un marcador de variabilidad fácilmente observable. La ausencia de pelaje (pelo en el cuerpo) y el color variable de la piel son algunas de las características que nos distinguen de nuestros parientes primates más cercanos. • Las longitudes de onda de la luz son reflejadas o absorbidas por un pigmento de la piel llamado melanina. La melanina es sintetizada en estructuras llamadas melanosomas producidas por células llamadas melanocitos. • En los humanos hay dos tipos principales de melanina: la feomelanina, de color amarillo rojizo y la eumelanina, de color negro marrón. | <ul style="list-style-type: none"> • ¿Puede pensar en otras características que sean altamente variables, como el color de la piel humana? • ¿Qué es una adaptación? • ¿Cuál es la conexión entre el ADN y las características visibles? |
| 2 | 3:55 | 9:07 | <ul style="list-style-type: none"> • La radiación UV puede penetrar células vivientes y provocar mutaciones en el ADN. • La melanina absorbe rayos UV, protegiendo a las células humanas de los efectos dañinos de la radiación UV. • Existe una clara correlación entre la intensidad de la radiación UV y la latitud. La radiación UV es más intensa en el ecuador y menos intensa en los polos. • La intensidad de radiación UV predice el color de la piel de las poblaciones indígenas. Una radiación UV más fuerte se correlaciona con un color de piel más oscuro. | <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué es una mutación? • La Dra. Zalfa Abdel-Malek dice que las cubiertas formadas por la melanina sobre los núcleos funcionan como “pequeñas sombrillas”. Una sombrilla es una especie de paraguas. Explique esta analogía. • Las enzimas que producen melanina están presentes en todos los principales grupos de seres vivos. ¿Qué sugiere |

| | | | | |
|---|-------|-------|---|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • Los datos sugieren que la variación en la melanina de la piel humana surgió a medida que diferentes poblaciones se fueron adaptando biológicamente a diferentes condiciones solares alrededor del mundo. | <p>esto acerca de la importancia de la producción de melanina en seres vivos?</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Por qué en zonas de gran elevación (por ejemplo, la meseta tibetana) la intensidad de rayos UV es mayor de lo que se esperaría ver en función de la latitud, mientras que en zonas con cubierta de nubes permanente (por ejemplo, la cuenca del Congo) la radiación es menor de lo que se esperaría ver? • ¿Qué significa "indígena"? • ¿Por qué al muestrear el color de piel humana es importante saber si un individuo es indígena o no? |
| 3 | 9:08 | 13:32 | <ul style="list-style-type: none"> • Muy temprano en la evolución humana, nuestros antepasados perdieron la mayor parte del pelo del cuerpo y aumentaron la producción cutánea de melanina. • El genoma contiene evidencia de selección natural. • <i>MC1R</i> es un gen que codifica una proteína involucrada en la producción de eumelanina. • Un muestreo de alcance mundial del genoma humano reveló que entre las poblaciones Africanas, la gran mayoría de los individuos posee un alelo de <i>MC1R</i> que resulta en piel más oscura. • Evidencias fósiles y genéticas sugieren que hace unos 1,2 millones de años la mayoría de los humanos tenía piel oscura. • La radiación UV descompone el folato que circula por los vasos sanguíneos de la piel. | <ul style="list-style-type: none"> • Otros primates tienen piel clara. ¿Por qué la piel clara no constituye una desventaja para los primates no humanos que viven en áreas con intensa radiación UV? • ¿Qué dedujeron los científicos de la falta de variación en el gen <i>MC1R</i> en poblaciones Africanas? • La melanina protege a las personas del cáncer de piel. ¿Por qué la edad a la que suele aparecer el cáncer de piel reduce la importancia de esta enfermedad para la evolución del color oscuro de la piel? |
| 4 | 13:33 | 18:57 | <ul style="list-style-type: none"> • La absorción de radiación UV-B es crucial para la síntesis de vitamina D, un proceso que empieza en la piel. • La menor intensidad y la mayor variabilidad de radiación UV-B a lo largo del año en áreas cercanas a los polos ponen a personas de piel oscura en riesgo de deficiencia de vitamina D. | <ul style="list-style-type: none"> • Una piel más oscura protege a las células cutáneas de la radiación UV. Entonces, ¿por qué no todos los humanos tienen piel oscura? • Los pueblos indígenas con dietas ricas en vitamina D y que viven a altas latitudes |

| | | | |
|--|--|---|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Hacia los polos, disminuye la presión selectiva para piel oscura (para proteger el folato) y aumenta la presión selectiva para piel más clara (para permitir la síntesis de vitamina D). • La selección de variantes de genes de piel clara sucedió múltiples veces en diferentes grupos alrededor del mundo. • En la actualidad, la migración humana no tarda generaciones. Por lo tanto, existe mucha discordancia entre el color de la piel y la geografía. • El color de la piel es una característica flexible que se hereda independientemente de otras características. | <p>tienen la piel oscura. ¿Por qué esta observación apoya la hipótesis presentada en la película sobre la presión selectiva para la evolución de la piel más clara? ¿Qué otras explicaciones podrían justificar esta observación?</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuáles son los riesgos asociados con la piel clara en regiones ecuatoriales? y ¿con la piel oscura en latitudes altas? |
|--|--|---|---|

ANTECEDENTES

"Melanina" es el término colectivo para una familia de pigmentos que se encuentran en la mayoría de los organismos, desde las bacterias hasta los humanos. Esto sugiere que la melanina tiene una larga historia evolutiva y un amplio espectro de funciones importantes. En los humanos, los pigmentos de melanina se encuentran principalmente en piel, pelo y ojos, e incluyen la feomelanina de color amarillo rojizo y las eumelaninas marrones y negras. En las células del cerebro se encuentra una molécula relacionada, llamada neuromelanina. En la piel humana, los pigmentos de melanina se sintetizan en organelos llamados melanosomas que se encuentran en células especializadas de la epidermis llamadas melanocitos. Los melanosomas se llenan con una cantidad y tipo de melanina que son genéticamente determinados, y luego migran hacia otras células cutáneas llamadas queratinocitos.

La síntesis de melanina involucra una serie de reacciones químicas que comienzan con el aminoácido tirosina. Una enzima llamada **tirosinasa** promueve la conversión de tirosina en DOPA, y luego en dopaquinona. La dopaquinona puede convertirse en eumelanina o bien combinarse con el aminoácido cisteína para producir feomelanina. La producción ya sea de eumelanina o de feomelanina depende en parte de la actividad de la proteína **receptora de la melanocortina 1 (MC1R)** (Figura 1).

La eumelanina es una molécula extraordinaria capaz de absorber una amplia gama de longitudes de onda de la radiación solar, en particular la radiación de mayor energía, que es la UV. La radiación UV puede dañar moléculas biológicas, incluido el ADN. Cuando la radiación UV alcanza la eumelanina, ésta la absorbe y la transforma principalmente en energía térmica, sin descomponerse, por lo que constituye un potente protector solar contra daño por radiación UV. La feomelanina es menos efectiva que la eumelanina como protector solar y, de hecho, puede producir moléculas dañinas, conocidas como radicales libres, cuando interactúa con la radiación UV. El color de la piel de una persona está determinada principalmente por la proporción entre eumelanina y feomelanina, la cantidad total de melanina producida, y el número y tamaño de los melanosomas y la manera en que están distribuidos. Las personas con piel naturalmente oscura tienen melanosomas grandes llenos de eumelanina. Las que tienen piel naturalmente más clara tienen melanosomas menos numerosos y de menor tamaño, y con cantidades y tipos variados de eumelanina, así como el pigmento más claro, la feomelanina.

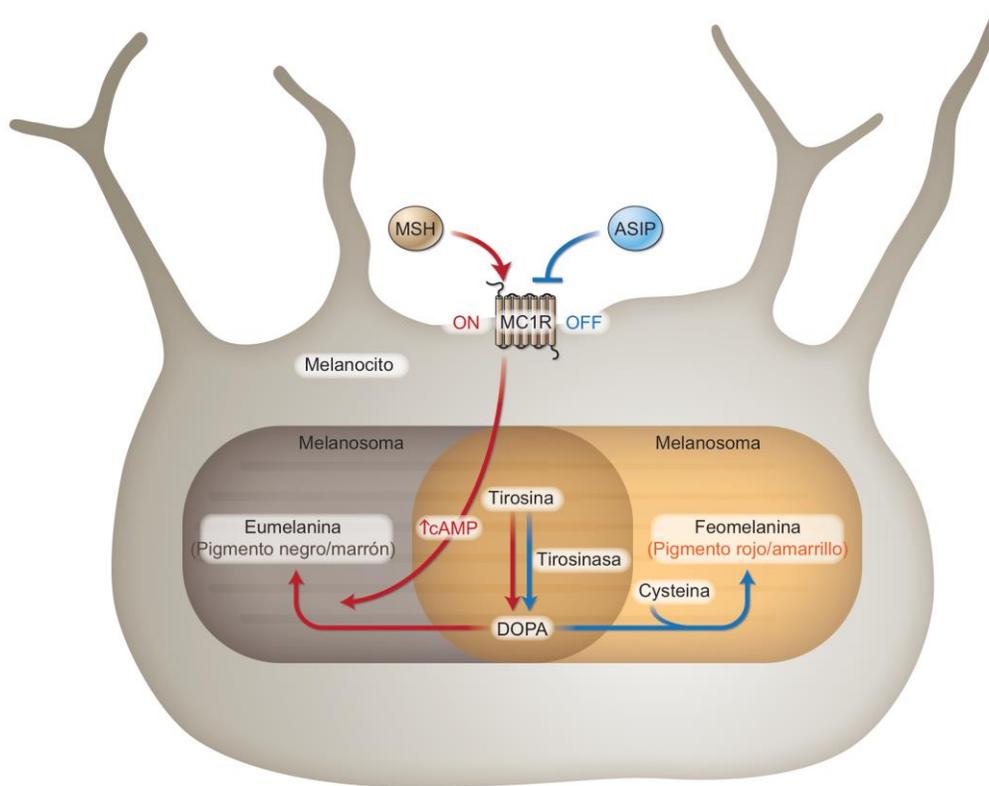


Figura 1. Biosíntesis de melanina. La síntesis de melanina ocurre en organelos llamados melanosomas, y se inicia con la conversión del aminoácido tirosina en DOPA mediante la enzima tirosinasa. El melanosoma se encuentra dentro de una célula especializada de la piel llamada melanocito. Una proteína en la membrana del melanocito, llamada MC1R, recibe mensajes de otras células. La proteína MC1R puede ser activada (ON) por la hormona estimulante de melanocitos (MSH), que se produce en respuesta a daños generados por la luz ultravioleta (UV) y

otros estímulos. Otras moléculas, como la proteína de señalización agouti (ASIP, por sus siglas en inglés), inhiben la activación de MC1R (OFF). Cuando se activa la MC1R, ésta estimula la producción de monofosfato cíclico de adenosina (cAMP, por sus siglas en inglés), que es un segundo mensajero de importancia en la transferencia de efectos de hormonas hacia el interior de las células. Esta producción de cAMP, a su vez, estimula una vía bioquímica que resulta en la producción de eumelanina. Ciertas mutaciones en el gen *MC1R* que impiden la activación de MC1R o la unión de ASIP y de otros inhibidores a la MC1R resultan en la producción de feomelanina.

LA GENÉTICA DE LA PRODUCCIÓN DE MELANINA

La pigmentación constitutiva, es decir, la pigmentación con la que nacemos, es una característica poligénica y se han identificado muchos de los genes involucrados. Estos genes codifican por un lado las enzimas que afectan la síntesis de melanina y por otro lado, el empaquetamiento, distribución y degradación de melanosomas. Las mutaciones en algunos de estos genes causan una ausencia de melanina, tal como se observa en albinismos oculocutáneos humanos y trastornos relacionados. Por ejemplo, una forma de albinismo es causada por mutaciones que inactivan el gen de la tirosinasa.

La película de HHMI menciona la importancia del gen *MC1R*. Este gen codifica una proteína que se encuentra en la membrana del melanocito. Se activa mediante diversos estímulos, como la **hormona estimulante de melanocitos (MSH, por sus siglas en inglés)**, y es responsable de determinar si se produce eumelanina o feomelanina. Las personas de ascendencia Africana poseen una versión del gen *MC1R* asociada con la producción de eumelanina. Tal como se menciona en la película, hay muy poca variación del gen *MC1R* en poblaciones Africanas, en comparación con poblaciones indígenas de Europa y Asia. Esta falta de diversidad en un locus genético es evidencia de selección, y sugiere que la producción de eumelanina confiere una ventaja a las personas que viven en África ecuatorial. (Diferencias en el gen *MC1R* también son responsables de las variaciones de color en el pelaje del ratón de bolsillo. Puede obtener recursos didácticos relacionados con la actividad del gen *MC1R* en ratones de bolsillo buscando en BioInteractive.org usando las palabras clave “MC1R” y “pocket mouse.”)

Los científicos han buscado evidencia de selección en otras partes del genoma y han identificado genes involucrados en el color de la piel en diferentes poblaciones. Por ejemplo, un alelo de un gen llamado *OCA2* resulta en colores más claros de piel y se encuentra casi exclusivamente en poblaciones de Asia oriental y sudoriental. Por otro lado, alelos de dos genes llamados *SLC24A5* y *SLC45A2* también están relacionados con colores más claros de piel y son mucho más frecuentes en poblaciones europeas que en otras poblaciones. Estos y otros datos sugieren que el color claro de piel evolucionó más de una vez, mediante diferentes mecanismos. Resulta interesante que los genes *SLC24A5* y *SLC45A2* se descubrieron por primera vez en el pez cebrá, donde son responsables de las diferencias en los colores de las rayas.

Es importante verificar que los estudiantes comprendan que la evidencia genética indica que colores similares de piel y capacidades de bronceado de piel evolucionaron independientemente a medida que diferentes grupos humanos se dispersaron hacia sitios distantes, pero con condiciones similares de radiación UV.

PUNTOS DE DISCUSIÓN

- La película [La biología del color de la piel](http://www.hhmi.org/biointeractive/biology-skin-color) (<http://www.hhmi.org/biointeractive/biology-skin-color>) ofrece una oportunidad para hacer la distinción entre selección positiva y selección negativa. La Dra. Jablonski dice que la falta de diversidad en *MC1R* en personas con ascendencia Africana ecuatorial se debe a la selección negativa. Explique a los estudiantes que la selección negativa funciona eliminando alelos perjudiciales de una población—otro término que describe este fenómeno es “selección purificadora.” Luego, pida que los estudiantes infieran una definición para selección positiva (selección de alelos que favorecen la aptitud biológica). La selección positiva resulta en selección direccional. La selección positiva de un alelo beneficioso puede aumentar la frecuencia de variantes neutrales que residen cerca al alelo beneficioso en un cromosoma. Esto puede resultar en áreas de alta homocigosidad (es decir, pérdida de diversidad en un segmento grande de un cromosoma) debido a una mutación altamente beneficiosa, y se conoce como barrido selectivo.
- Es posible que los estudiantes tengan curiosidad sobre la manera en que la eumelanina y la feomelanina producen colores de cabello que varían de rubio a negro, y por qué el cabello encanece con la edad. Explique que las proporciones de los dos tipos de melanina son responsables de todos los colores de cabello. Por ejemplo, el cabello amarillo (o rubio) es el resultado de una pequeña cantidad de eumelanina marrón. El cabello rojo resulta de una pequeña cantidad de eumelanina marrón mezclada con feomelanina principalmente roja. El cabello gris o blanco resulta de una ausencia de melanina que ocurre cuando los melanocitos en los folículos pilosos dejan de producir melanina como resultado del proceso de envejecimiento.
- Es posible que los estudiantes pregunten por qué, si la melanina controla la pigmentación de la piel y del cabello, existen personas de piel clara y cabello y ojos oscuros o de piel oscura con cabello claro. Los colores de la piel, el cabello y los ojos son controlados por diferentes conjuntos de genes. Ciertos genes relacionados con la melanina se activan en un conjunto de células, por ejemplo las que generan el pelo, mientras que otros genes se activan en otras células, por ejemplo las del iris. Algunos genes afectan la pigmentación en forma global, como en algunas formas extremas de albinismo, y ciertas mutaciones en el gen *MC1R* están relacionadas con la piel clara y el cabello rojo. Pero por lo general, debido a que los genes de la pigmentación no están vinculados genéticamente, se heredan y funcionan independientemente entre sí. Estos genes en su mayoría son independientes de los genes que controlan otros aspectos del fenotipo humano. Puede interesarle a los estudiantes saber que hay personas con cabello rubio en algunas partes del Pacífico Sur, como las Islas Salomón, Vanuatu y Fiyi. Los habitantes nativos de las Islas Salomón tienen piel naturalmente oscura, lo que es previsible teniendo en cuenta la intensa radiación UV en el Pacífico Sur. No obstante, una proporción significativa de ellos tiene cabello rubio. Se ha confirmado que esta característica no se debe a flujo genético con europeos, sino que tiene su propio origen en la población indígena. El cabello rubio en

personas de las Islas Salomón se debe a mutaciones en el gen *TYRP* que son exclusivas de este grupo y se presentan con una frecuencia del 26% en la población.

- Los estudiantes pueden tener dudas acerca de cómo sabemos que hace millones de años nuestros antepasados tenían piel pálida y el cuerpo cubierto de pelo. No existe piel fosilizada de nuestros antepasados. Se utilizan evidencias anatómicas y genéticas de humanos modernos y simios Africanos modernos para reconstruir el aspecto que habrían tenido nuestros antepasados. El linaje humano se originó en África ecuatorial entre 6 y 7 millones de años atrás cuando se separó del linaje que generó a nuestro pariente vivo más cercano: el chimpancé. El último antepasado en común de los humanos y los chimpancés modernos no era un chimpancé, pero probablemente tenía muchas características de los simios Africanos modernos. Todos los simios Africanos tienen piel clara debajo del pelaje, y podemos deducir que probablemente haya sido igual para el último antepasado que compartimos con ellos.
- Los humanos son los únicos primates cuyos cuerpos no están totalmente cubiertos de pelaje. Puede que los estudiantes pregunten cuál es el beneficio de perder este pelaje. Los fósiles más antiguos del género *Homo* (nuestro género) se encontraron en África y tienen una antigüedad de aproximadamente 2 millones de años. Gracias a estos fósiles, sabemos que para ese entonces nuestros antepasados ya caminaban en dos patas. Habrían sido capaces de caminar largas distancias y también de correr. Un cuerpo que corre genera mucho calor. Una hipótesis es que el hecho de tener menos pelo habría ayudado a mantener una temperatura corporal más baja al correr, lo que habría constituido una ventaja para estos humanos antiguos. A lo largo de muchas generaciones, los cuerpos de nuestros antepasados perdieron la mayor parte del pelo, y se cubrieron de un tipo de glándula sudorípara que genera una transpiración diluida. El hecho de que caminaran largas distancias y corrieran también indicaría que los humanos antiguos pasaban menos tiempo en bosques tupidos y más tiempo en zonas abiertas con mayor intensidad de luz solar. Pregunte a los estudiantes por qué la evolución de una piel más pigmentada habría otorgado una ventaja en este ambiente.
- Puede que los estudiantes pregunten si un bronceado de la piel confiere el mismo beneficio de protección que una piel con una pigmentación oscura de base. Explique que aunque dos tonos de piel similares (uno natural y otro por bronceado) pueden absorber y dispersar radiación nociva de la misma manera en la superficie, existen dos diferencias notables. Primero, la melanina que absorbe radiación UV en la piel constitutivamente oscura está presente en células más profundas de la epidermis, en lugar de estar solo cerca de la superficie, como ocurre en la piel temporalmente bronceada; por lo tanto, la piel constitutivamente oscura brinda un mayor beneficio protector. Segundo, la exposición continua a la radiación UV que se requiere para mantener la piel bronceada puede generar envejecimiento prematuro debido al daño a largo plazo de las proteínas estructurales que otorgan a la piel su resistencia y resiliencia. Explique también que el daño al ADN se produce mucho antes de que se pueda observar la respuesta de bronceado, y que evidencia reciente sugiere que es posible que, de hecho, se requiera daño al ADN para iniciar la producción de melanina que genera el bronceado. Después de presentar la conexión entre daño celular y bronceado, pregunte a los estudiantes si pueden inferir por qué se pela la piel después de una grave quemadura solar. (El motivo es que las células afectadas por la radiación UV resultan tan dañadas que mueren, por lo que se pelan y son sustituidas por células cutáneas nuevas.)
- En la película, la Dra. Jablonski sugiere que es posible que los cánceres de piel no hayan tenido un impacto importante sobre la aptitud biológica. ¿Por qué? Es cierto que una mayor exposición a la radiación UV genera mayor riesgo de cáncer, y la piel pigmentada protege contra el daño por UV. Sin embargo, la mayoría de los casos de cáncer de piel se dan a una edad avanzada, cuando las personas ya han dejado atrás la etapa reproductiva. En esta edad más avanzada, la mayoría de las personas ya habría tenido hijos y les habrían transmitido sus genes. Es por esto que la Dra. Jablonski sostiene que la protección contra el cáncer de piel no explicaría la evolución del color más oscuro de piel. Comente a los estudiantes que se trata de un área de activo debate y estudio científico. Algunos científicos han señalado que los melanomas pueden ser fatales, y algunos tipos de melanoma, aunque son raros, pueden afectar a personas más jóvenes. Además, otros

científicos sostienen que los factores que afectan a personas en etapas más tardías de la vida pueden influenciar la aptitud biológica. Estos científicos señalan la importancia de las personas mayores, incluidos los abuelos, en la recolección de alimentos en sociedades de cazadores-recolectores, en ayudar a las personas a adquirir estatus social, y como fuentes de conocimientos en sociedades preliterarias. Sin embargo, la Dra. Jablonski ofreció una hipótesis alternativa sobre por qué una piel más oscura es ventajosa en ambientes con alto nivel de radiación UV. Esta está basada en la observación de que la melanina no solo protege al ADN sino que protege además contra la degradación de un compuesto biológico esencial llamado folato (vitamina B9). En las hembras, se requiere folato para la producción adecuada de óvulos, implantación del embrión en el útero, y crecimiento de la placenta. Una vez que empieza a desarrollarse un embrión, el folato lo protege de varias anomalías, como la espina bífida. En machos, una deficiencia en folato contribuye al mal desarrollo de espermatozoides y a la infertilidad. Pregunte a los estudiantes por qué la protección del folato contra degradación por radiación UV aumentaría la aptitud en ciertos ambientes. ¿Por qué la protección del folato sería una mejor hipótesis que el cáncer de piel para explicar la presión selectiva que generó mayor pigmentación en la piel? ¿Se excluyen mutuamente estas dos explicaciones?

- Puede que los estudiantes se sorprendan al saber que la vitamina D se sintetiza en el cuerpo. Alimentos como el salmón y el pez espada tienen alto contenido de vitamina D. La leche, algunas marcas de cereales, el jugo de naranja y el yogur también vienen fortalecidos con vitamina D. Sin embargo, muchas personas no obtienen suficiente vitamina D de los alimentos y necesitan producir vitamina D en el cuerpo. La síntesis de vitamina D en el cuerpo comienza en la piel, donde, en presencia de radiación UV-B, un compuesto llamado 7-dehidrocolesterol (7-DHC) se convierte en un compuesto llamado previtamina D. Luego la previtamina D se modifica para convertirse en vitamina D. La vitamina D es indispensable para una adecuada absorción de calcio y potasio para construir y mantener nuestros huesos y nuestros sistemas inmunitarios. Una dieta que contiene alimentos naturalmente ricos en vitamina D, más una pequeña cantidad de exposición directa al sol (5 a 10 minutos por día en brazos y piernas, dependiendo de la latitud, elevación y hora del día) pueden ser suficientes para suministrar toda la vitamina D que el cuerpo necesita.
- Al ver y discutir la película sobre el color de la piel humana, es posible que los estudiantes tengan preguntas y quieran conversar sobre el tema de la raza. Cuando el biólogo Carolus Linnaeus empezó de lleno a clasificar organismos a principios de los años 1700, usó el color de la piel para identificar lo que creía que eran diferentes grupos de personas. Hoy en día, se sabe que existen diferencias entre poblaciones humanas en términos de características visibles, como el color de la piel y los ojos, y de otras características, como la susceptibilidad a las enfermedades. Pero cuando se considera el espectro completo de variaciones teniendo en cuenta muchas características, no existe evidencia de que haya razas humanas discretas. En otras palabras, no existen "paquetes" establecidos de características que constituyan una raza humana. Para leer más sobre esto, visite el sitio web [Race: Are We So Different? \(http://www.understandingrace.org/home.html\)](http://www.understandingrace.org/home.html) de la American Anthropological Association (Asociación Antropológica Americana). Además, la Dra. Jablonski ha escrito varios excelentes artículos y libros sobre este tema. Apareció recientemente una entrevista con ella en *Nautilus* (Paulson, Steve, "About Your Skin: What You Should Know about Your Body's Biggest Organ," 2 de julio de 2015, <http://nautil.us/issue/26/color/about-your-skin>).

RECURSOS ADICIONALES

Otros recursos acerca de la biología del color de la piel se pueden encontrar en el sitio web del Instituto Smithsonian en: <http://humanorigins.si.edu/education/teaching-evolution-through-human-examples>.

CÓMO USAR LA HOJA DE TRABAJO

La hoja de trabajo para el estudiante está diseñada para evaluar la comprensión del alumno de los conceptos clave tratados en la película. Puede además ser usada antes o durante la película para evaluar conocimientos previos o para guiar a los estudiantes a prestar atención a conceptos importantes. Se recomienda al docente que

elija el uso que mejor se adapte a sus objetivos de aprendizaje y a las necesidades de sus estudiantes. Debido a la complejidad del vocabulario y de los conceptos, se recomienda al docente que modifique la hoja de trabajo según sus necesidades (por ejemplo, usando solo algunas de las preguntas o añadiendo explicaciones para aclarar terminología complicada).

CUESTIONARIO Y RESPUESTAS

1. (Concepto clave A) Verdadero/falso. Los biólogos clasifican formas específicas de características como buenas o malas. Por ejemplo, en los gatos, una cola larga se podría clasificar como buena, y una cola corta como mala. (Marque la respuesta correcta.)

Falso. Los biólogos no asignan valor, juicio ni declaración de valor moral a características específicas, ya que esto no forma parte del alcance de la ciencia. Los científicos pueden estudiar el impacto de características sobre la aptitud biológica, pero aun así, el efecto de una determinada característica podría ser positivo en un ambiente y negativo en otro ambiente.

2. (Concepto clave A) Explique el razonamiento o la evidencia que usó para responder la Pregunta 1.
Después de ver la película, los estudiantes deberían entender que las diferentes tonalidades de piel han tenido diferentes efectos sobre la aptitud biológica, en función del lugar en que vivían las personas indígenas. La piel oscura tuvo un efecto positivo sobre la aptitud en ambientes con altos niveles de rayos UV, mientras que la piel más clara tuvo un efecto positivo sobre la aptitud en ambientes con niveles bajos o variables de rayos UV. Como afirma la Dra. Jablonski en la película: ". . . las características biológicas no son ni buenas ni malas. Son cualidades que han evolucionado porque mejoran las probabilidades de que un organismo sobreviva y transmita sus genes."

3. (Concepto clave D) Si se viaja hacia el norte a partir del ecuador, que sucede por lo general con la intensidad de luz ultravioleta (UV)?
 - a. La intensidad aumenta.
 - b. La intensidad disminuye.**
 - c. La intensidad se mantiene igual.
 - d. Es imposible predecirlo.

La película muestra claramente cómo la intensidad de la radiación UV disminuye a medida que la latitud aumenta (minuto 7:17).

4. (Conceptos clave D y F) ¿Quién correría mayor riesgo de desarrollar raquitismo?
 - a. Los hijos nacidos de madres con piel oscura que viven lejos del ecuador**
 - b. Los adultos con piel oscura que viven cerca del ecuador
 - c. Los hijos nacidos de madres con piel clara que viven cerca del ecuador
 - d. Los adultos con piel clara que viven cerca del ecuador
 - e. Toda persona cuya dieta incluya mucho pescado

5. (Conceptos clave D y F) Explique el razonamiento o la evidencia que usó para responder la Pregunta 4.
Las madres de piel oscura que viven en latitudes altas tienen riesgo de sufrir deficiencia de vitamina D porque los ambientes alejados del ecuador tienen menores niveles de radiación UV. Si no producen suficiente vitamina D, no podrán traspasarla a sus hijos en la leche materna. Los bajos niveles de vitamina D interfieren con la absorción de calcio y pueden generar raquitismo.

6. (Concepto clave D) Cuando Nina Jablonski describe su descubrimiento de los datos de radiación UV reunidos por la NASA, se observa el siguiente titular: "Ozone Depletion Raising Risk of Skin Cancer, Scientist Says" lo cual se traduce como "La reducción del ozono eleva el riesgo de cáncer de piel, sostiene científico". Use este

título y su comprensión de la causa del cáncer de piel para inferir una característica beneficiosa de la capa de ozono para los humanos. ¿Por qué una capa reducida de ozono aumentaría el riesgo del cáncer de piel?

La película explica cómo el daño generado por la radiación UV sobre el ADN de células cutáneas puede generar cáncer. Debido a que la reducción del ozono aumenta el riesgo de cáncer de piel, se puede inferir que una capa reducida de ozono está relacionada con una mayor cantidad de radiación UV en la superficie de la Tierra. La capa de ozono bloquea una cantidad importante de rayos UV que provienen del sol. Un aumento de la radiación UV en áreas con ozono reducido generaría más daño al ADN de las células cutáneas y, en última instancia, mayores tasas de cáncer de piel.

7. (Conceptos clave B y H) La luz ultravioleta puede causar mutaciones y otros daños en las células, lo cual puede reducir la probabilidad de sobrevivir y dejar descendientes para un individuo. Algunas moléculas pueden proteger a las células contra el daño por radiación UV. Los genes determinan la cantidad de estas moléculas. Dentro de una población, algunos individuos fabrican más de estas moléculas protectoras contra la radiación UV que otros. Prediga cómo cambiaría la frecuencia de los genes que generan más moléculas en una población a lo largo del tiempo. Asuma que todos los demás factores son iguales.
- La frecuencia aumentaría porque los individuos necesitan los genes
 - La frecuencia aumentaría porque los individuos que poseen genes para generar más moléculas protectoras dejarían mayor cantidad de descendencia**
 - La frecuencia disminuiría porque las moléculas son sustancias químicas, y resulta dañino tener más sustancias químicas en el cuerpo
 - La frecuencia permanecería igual porque las poblaciones no cambian a lo largo del tiempo

8. (Conceptos clave B y H) Escriba el razonamiento o la evidencia que usó para responder la Pregunta 7. **El problema plantea que un mayor nivel de radiación UV puede afectar negativamente la aptitud biológica de una persona. Las personas con más moléculas que protegen las células de la radiación UV dejarían un mayor número relativo de descendientes. Debido a que la cantidad de estas moléculas está determinada genéticamente, aumentaría el número de individuos en la siguiente generación con los genes que generan más de estas moléculas. Se trata de un ejemplo de selección natural.**

9. (Conceptos clave A, B, C y F) Describa sus ideas sobre por qué difiere el color de piel entre grupos indígenas que habitan diferentes partes del mundo. **En ambientes con alto nivel de radiación UV, la piel más oscura ofrece protección contra los efectos dañinos de la radiación UV, en particular sobre el ADN y el nutriente folato. En ambientes con bajo nivel de radiación UV, se requiere un equilibrio entre la protección contra la radiación UV y la necesidad de cierta absorción de rayos UV para la producción de la vitamina D. Estos ambientes con bajo nivel de radiación UV favorecen pieles más claras.**

10. (Concepto clave D) Describa como mínimo tres tipos diferentes de evidencia que justifiquen sus ideas para la respuesta a la Pregunta 9.

Entre las evidencias para justificar las aseveraciones en la Pregunta 9 se podrían incluir

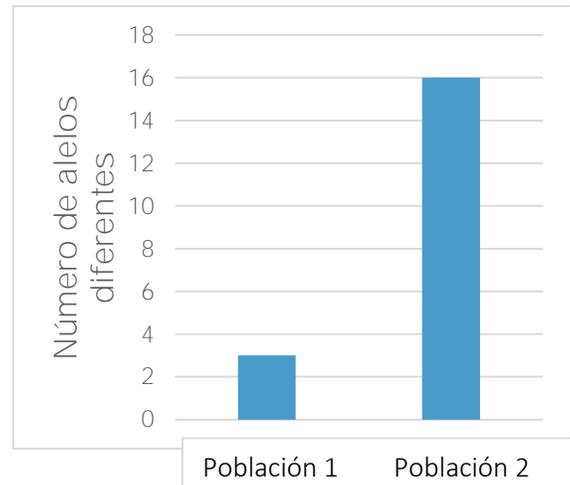
- datos antropológicos que documenten los colores de la piel de pueblos indígenas,**
- datos de las ciencias físicas que muestren el patrón de incidencia de radiación UV en el mundo,**
- una relación entre el color de piel y los niveles de radiación UV matemáticamente demostrable,**
- estudios de biología celular que muestren el efecto de la radiación UV sobre el ADN o el folato,**
- estudios de biología celular que muestren el efecto protector de la melanina, y**
- datos que muestren que en el pasado, las personas indígenas con piel más oscura en zonas con alto nivel de radiación UV y personas con piel más clara en zonas con bajo nivel de radiación UV eran más aptas a sus ambientes.**

Use el siguiente escenario para responder las Preguntas 11 y 12.

Una bióloga estudiaba a dos grupos indígenas de diferentes partes del mundo. La primera población era de África ecuatorial (población 1), y la segunda del norte de Europa (población 2). La bióloga estudiaba un gen que afecta el color de la piel. Examinó el gen en 100 personas de cada población. Mantuvo un registro de cuántas formas (o alelos) diferentes del gen encontró en cada población. Los resultados aparecen en el gráfico adjunto.

11. (Concepto clave E) Describa la tendencia principal en los datos de la Figura. **En la población 1, existen solo tres alelos diferentes, mientras que en la población 2, existen 16 alelos diferentes para el mismo gen.**

12. (Concepto clave E) Haga una aseveración sobre la fuerza de la selección natural estabilizadora sobre este gen en ambas poblaciones. Utilice la evidencia del gráfico para justificar su aseveración. **En la película, la Dra. Jablonski explica que "la falta de diversidad en el MC1R en las poblaciones Africanas indica que, en esa parte del mundo hay una fuerte selección negativa en contra de los alelos que alteren la piel oscura". Esto significa que hubo presión selectiva para eliminar de la población alelos que generaban un color de piel diferente. La eliminación de alelos dañinos se llama selección negativa. Otro término para selección negativa es "selección estabilizadora".**



Mediante este razonamiento, una aseveración válida es que la población 1 parece haber sufrido de una fuerte selección estabilizadora. Esto queda evidenciado por el número de alelos mucho más bajo en la población 1 (lo cual significa menor diversidad). La población 2 presenta menos evidencia de selección estabilizadora porque hay muchos alelos diferentes para el gen.

13. (Conceptos clave A, C y F) Describa de qué manera el hecho de tener piel oscura pudo constituir una ventaja para la supervivencia y reproducción de personas hace miles de años en algunas partes del mundo pero no en otras.

Tal como se explicó en la Pregunta 9, en ambientes con alto nivel de radiación UV, la piel más oscura ofrece protección contra los efectos dañinos de la radiación UV, en particular sobre el ADN y el folato, un importante nutriente. Así, las personas con piel oscura en estos ambientes de alto nivel de radiación UV habrían tenido una ventaja en supervivencia y reproducción. Pero en ambientes con bajo nivel de radiación UV, se requiere un equilibrio entre la protección contra el UV y la necesidad de cierta absorción de UV para la producción de la vitamina D. En estos ambientes, las personas con piel más clara tendrían tasas superiores de supervivencia y reproducción.

14. (Concepto clave A) Los biólogos, a veces, afirman que "la selección natural depende del ambiente específico en el que vive una especie". ¿Qué significa esta afirmación?

- Si poblaciones de una especie viven en ambientes diferentes, aparecerán características que los individuos necesitan para satisfacer sus necesidades en cada ambiente
- Las características pueden ser beneficiosas o dañinas. Si poblaciones de una especie viven en ambientes diferentes, características que resultan beneficiosas en un ambiente podrían ser dañinas en el otro**
- Las características siempre son beneficiosas o dañinas, sin importar el ambiente en el que vive una población. Si poblaciones de una especie viven en ambientes diferentes, siempre serán beneficiosas algunas características

- d. Las especies se formaron para adaptarse perfectamente a su ambiente. Las características de individuos en una especie dependen del ambiente específico en el que se crearon

15. (Concepto clave F) Describa por qué la luz UV es perjudicial para las personas pero también puede ser necesaria.

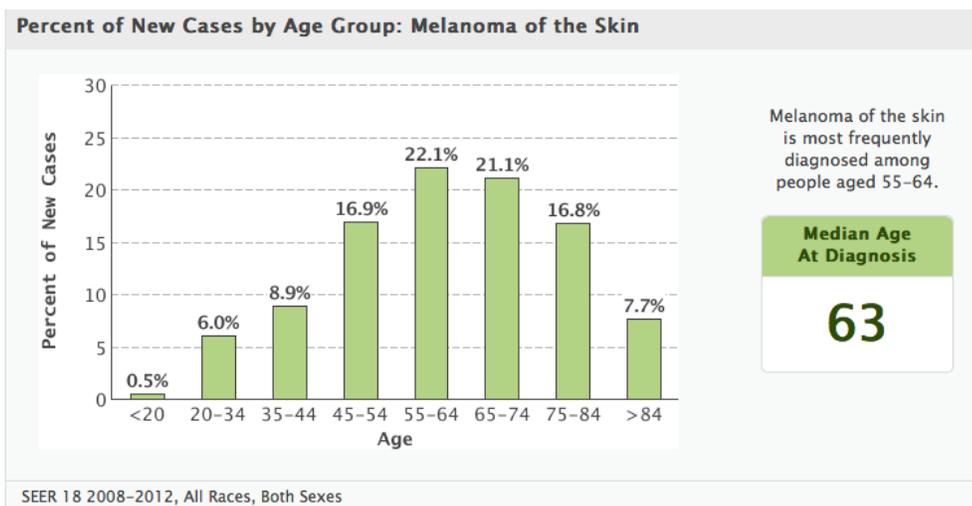
La radiación UV daña el ADN y el folato, y puede ser perjudicial en ambos casos. Sin embargo, la radiación UV también es necesaria para iniciar la síntesis de vitamina D, necesaria para la salud de los huesos y del sistema inmunitario.

16. (Concepto clave G) ¿Cómo ayuda la síntesis de la melanina a los melanocitos a cumplir su función principal en la piel?

Una de las principales funciones de la piel es actuar como una barrera de protección contra los elementos dañinos en el ambiente, tales como la radiación ultravioleta. Los melanocitos fabrican melanosomas, los cuales a su vez sintetizan la melanina. La melanina protege el ADN de las células cutáneas formando cubiertas protectoras sobre el núcleo de éstas. La absorción de rayos UV por parte de la melanina protege el folato que se encuentra en el sistema circulatorio debajo de la piel.

17. (Concepto clave B) El gráfico adjunto muestra las edades a las cuales las personas son diagnosticadas con melanoma, que es la forma más grave de cáncer de la piel. Utilice este gráfico para explicar por qué la protección contra el cáncer de piel no explicaría la fuerte presión selectiva a favor de la piel oscura en zonas con alta radiación UV.

El gráfico muestra que la mayoría de las personas contrae melanoma luego de su época reproductiva. Por lo tanto, la mayoría de las personas que contrae melanoma ya habría tenido hijos a quienes les habrían transmitido sus genes, lo cual reduce la presión selectiva a favor de la piel más oscura. El rol del cáncer de piel como factor que podría influir en la evolución del color de la piel sigue siendo un tema de activo debate y estudio científico.



Fuente: National Cancer Institute's Surveillance, Epidemiology, and End Results Program [Programa de vigilancia, epidemiología y resultados finales del Instituto Nacional del Cáncer]

(Eje y=Porcentaje de casos nuevos, eje x=Edad, 63 años es la edad media al momento del diagnóstico)

<http://seer.cancer.gov/statfacts/html/melan.html>.

REFERENCIAS

- Barsh, Gregory S. "What Controls Variation in Human Skin Color?" *PLoS Biology* 1, n.º 1 (13 de octubre, 2003): 19–22.
- Dooley, Christopher M., Heinz Schwarz, Kaspar P. Mueller, et al. "Slc45a2 and V-ATPase Are Regulators of Melanosomal pH Homeostasis in Zebrafish, Providing a Mechanism for Human Pigment Evolution and Disease." *Pigment Cell & Melanoma Research* 26, n.º 2 (marzo 2013): 205–217.
- Holick, Michael F. "Vitamin D Deficiency." *New England Journal of Medicine* 357, n.º 3 (19 de julio, 2007): 266–281.
- Jablonski, Nina G. "The Evolution of Human Skin and Skin Color." *Annual Review of Anthropology* 33 (2004): 585–623.
- Kaidbey, Kays H., Patricia Poh Agin, Robert M. Sayre y Albert M. Kligman. "Photoprotection by Melanin—A Comparison of Black and Caucasian Skin." *Journal of the American Academy of Dermatology* 1, n.º 3 (septiembre 1979): 249–260.
- Kenny, Eimear E., Nicholas J. Timpson, Martin Sikora, et al. "Melanesian Blond Hair Is Caused by an Amino Acid Change in TYRP1." *Science* 336, n.º 6081 (4 de mayo, 2012): 554.
- Lin, Jennifer Y. y David E. Fisher. "Melanocyte Biology and Skin Pigmentation." *Science* 445, n.º 7130 (febrero 22, 2007): 843–850.
- Praetorius, Christian, Christine Grill, Simon N. Stacey, et al. "A Polymorphism in IRF4 Affects Human Pigmentation through a Tyrosinase-Dependent MITF/TFAP2A Pathway." *Science* 155, n.º 5 (21 de noviembre, 2013): 1022–1033.
- Raghavan, Maanasa, Michael DeGiorgio, Anders Albrechtsen, et al. "The Genetic Prehistory of the New World Arctic." *Science* 345, n.º 6200 (29 de agosto, 2014): 1255832.
- Sturm, Richard A. y David L. Duffy. "Human Pigmentation Genes under Environmental Selection." *Genome Biology* 13 (2012): 248.
- Thomas, Daniel B., Kevin J. McGraw, Michael W. Butler, et al. "Ancient Origins and Multiple Appearances of Carotenoid-Pigmented Feathers in Birds." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281 (25 de junio, 2014). doi:10.1098/rspb.2014.0806.

AUTORES

Escrito (versión original en inglés) por Paul Strode, PhD, Fairview High School

Corregido por Laura Bonetta, PhD, HHMI, y Stephanie Keep, asesora

Revisado por Paul Beardsley, PhD, Cal Poly Pomona y Nina Jablonski, PhD, Universidad Penn State