



“¿Por qué tenemos que aprender estas cosas?” Una Nueva Genética para alumnos del siglo XXI^a

Autor: Rosemary J. Redfield^b

Traducción, revisión y adaptación: Nidia B. Benítez;^c Danilo Fernández Ríos^c; Elodia Torres^c; Deidamia Franco^d

Hace varios años, nuestro programa de biología decidió desarrollar un nuevo curso de Segundo año de “Fundamentos de Genética” para reemplazar el curso de tercer año que nos legaron David Suzuki y Tony Griffiths. Aunque nuestro nuevo plan alteró radicalmente la forma en que se enseñan los conceptos básicos, ahora creo que los cambios fueron demasiado conservadores porque habíamos ignorado cuán drásticamente ha cambiado el rol de la genética. Debajo primero describo los problemas que identificamos originalmente y cómo los encaramos, y luego considero el problema mayor de trasladar los cursos introductorios de genética al siglo XXI.

El Canon

Nuestro antiguo curso seguía la estructura canónica de los libros de texto, usando análisis genético (ver Cuadro 1 para el Glosario) para enseñar los principios de la genética de transmisión,^e con la historia de la genética que proporcionaba el marco de organización (ver, por ejemplo, (1,2)). Comenzaba con los experimentos de Mendel y los principios que revelaron — los fenotipos son determinados por genes cuyos alelos pasan inalterados a través de las generaciones; los alelos son dominantes o recesivos; los pares de alelos se separan en gametos y forman nuevas combinaciones en cada nueva generación. A continuación se trataba la evidencia de que los genes están en cromosomas, seguida de la observación del comportamiento de los cromosomas en la meiosis a través del microscopio óptico. El análisis de los cruzamientos genéticos luego gradualmente revelaba todos los conceptos estándar — ligamiento y entrecruzamiento, mapeo genético, herencia ligada al sexo, epistasia, cambios cromosómicos. Algunos instructores suplementaban estos temas con una pizca de genética molecular, pero postergaban un tratamiento más profundo para un curso posterior que utiliza la segunda mitad del libro de texto. El periodo terminaba con unas pocas conferencias sobre las teorías básicas de genética de poblaciones y genética cuantitativa como fue establecida a mediados del siglo XX.

Cuadro 1. Glosario.

Alelo: cada una de las formas alternativas que puede tener un gen que se diferencian en su secuencia y que se puede manifestar en modificaciones concretas de la función de ese gen.

Cuadros de Punnett: es un resumen tabular de cada combinación posible de un alelo maternal con uno paternal para cada gen considerado en un cruzamiento experimental. Estas tablas dan las probabilidades correctas de resultados genotípicos de cruzamientos independientes cuando la probabilidad de heredar las copias de cada alelo parental es independiente.

SNP: single-nucleotide polymorphism (polimorfismo de nucleótido simple) es una variación de la secuencia del DNA que ocurre cuando un sólo nucleótido— , T, C o G — en el genoma (u otra secuencia compartida) difiere entre miembros de una especie biológica o cromosomas apareados en un humano.

Fenotipo: composición de las características observables de un organismo, tales como su morfología, desarrollo, propiedades bioquímicas y fisiológicas, fenología, conducta y productos de su conducta. Resultan de la expresión de los genes del organismo, además de la influencia de factores ambientales y las interacciones entre ambas.

Epigenético: diferencia hereditaria debida a una modificación reversible del DNA y no a cambios en la secuencia del DNA.^f

Epistasia: cambio en el fenotipo causado cuando diferentes alelos de un gen alteran los efectos de alelos de otro gen.

Exoma: la parte expresada del genoma, todas las secuencias de exones.

Análisis genético: utilización de los resultados fenotípicos de cruzamientos genéticos para hacer inferencias sobre la herencia y el funcionamiento de genes.

Cromosomas homólogos: cromosomas que cargan diferentes versiones de los mismos genes en el mismo orden. Usualmente estas secuencias de DNA difieren en aproximadamente sólo 0,1%.

a - Citación: Redfield RJ (2012) “Why Do We Have to Learn This Stuff?”—A New Genetics for 21st Century Students. PLoS Biol 10(7): e1001356. doi:10.1371/journal.pbio.1001356

Copyright: © 2012 Rosemary J. Redfield. Este es un artículo de acceso libre distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution Licence, el cual permite el uso, la distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que el autor y la fuente original sean citados. Financiamiento: No se recibió financiamiento específico para este trabajo. Conflictos de interés: El autor ha declarado que no existen conflictos de interés.

b - Department of Zoology, Life Sciences Institute, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada. E-mail :redfield@zoology.ubc.ca

c - Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: biotecnologia@facen.una.py

d - Dirección de Investigación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: cinvestigacion@facen.una.py

e - Nota de los traductores (ET): Efectivamente iniciar un curso de Genética con genética de transmisión y los experimentos de Mendel, no es lo más adecuado, se requieren de conocimientos previos como por ejemplo fundamentos de mitosis y meiosis antes de desarrollar este contenido.

f - Nota de los traductores (DFR): Este término (y sus definiciones) han causado varias disputas. Adrian Bird lo lleva al extremo afirmando: “Epigenética es una palabra útil si no sabes lo que sucede, si lo sabes utilizas otra palabra” (3).

Cuadro 1. Glosario.

Haplosuficiencia: condición en la que tener una versión funcional y otra no funcional de un gen provee suficiente actividad genética para dar un fenotipo normal.

Heterocigosis por inversión: una situación en la que un cromosoma de un par de homólogos tiene una inversión que invierte los genes en un segmento. Los dos cromosomas deben contorsionarse para aparear la parte invertida con sus secuencias homólogas.

Genética cuantitativa: Análisis de las contribuciones de muchos, a menudo hipotéticos, genes a un solo fenotipo.

Análisis de tétradas: uso de un micromanipulador para separar las cuatro esporas o gametos producidos por una sola meiosis y posterior análisis de sus genotipos.

Cruzamiento de tres factores: un cruzamiento en el cual los parentales difieren en tres posiciones diferentes en un solo cromosoma; típicamente usado para mapear las ubicaciones relativas de los genes.

Esta presentación histórica tiene una base lógica largamente establecida (4). Hacer que los alumnos sigan los pasos intelectuales de los grandes genetistas debe hacer que los conceptos sean más fáciles de aprender porque refleja las preguntas que los alumnos naturalmente preguntarán. También se espera que los alumnos ganen la muy necesaria práctica en el ejercicio del pensamiento científico y una mayor apreciación de la naturaleza del conocimiento científico porque cada nuevo principio requiere evidencia experimental. Finalmente, ver como el análisis genético ha revelado los mecanismos de herencia debe mostrar a los alumnos su valor a la hora de diseccionar otros fenómenos biológicos.

Desafortunadamente, esto no estaba funcionando como estaba previsto; aunque los alumnos aprendieron a resolver nuestros problemas de análisis genético, su habilidad para pensar de manera científica no mejoró de manera perceptible y no parecían entender mucho de genética. Por ejemplo, aunque los resultados de los exámenes de la mayoría de los alumnos mostraban que podían predecir e interpretar fenotipos en cruzamientos, las conversaciones en horas de oficina y los tutorías revelaron que sólo tenían ideas muy inusuales sobre cómo los productos génicos interactúan para determinar el fenotipo (ver Cuadro 2: El Problema de la Dominancia). Aunque pudieron reproducir las etapas de la meiosis, mapear genes en cruzamientos de tres factores y diagramar la recombinación meiótica en complejos heterocigotos por inversión, la mayoría no tenía idea de cómo o por qué los cromosomas homólogos se aparean y se recombinan. Aunque no todos los instructores reportan estos problemas, concepciones erróneas similares han sido descritas por Smith y Knight (5).

Cuadro 2. El Problema de la Dominancia.

El concepto mendeliano de la dominancia^g deja a los alumnos profundamente confundidos sobre su significado y sus causas. La mayoría de los alumnos creen erróneamente que los alelos son intrínsecamente dominantes o recesivos, como Mendel. Pero la dominancia es una relación entre alelos—un alelo es dominante sobre otro si su fenotipo homocigoto es también visto en el heterocigoto. El error de Mendel era razonable porque él había limitado sus análisis a pares de alelos, sin embargo la conveniente pero errónea representación que A/a introdujo ha propagado su error a través de los libros de texto y ejercicios.

Los alumnos también piensan erróneamente que las relaciones de dominancia y recesividad entre los alelos son la norma. Esto es en gran parte porque casi todos los alelos que ven en sus cursos de genética se presentan en pares dominantes/recesivos, con alternativas presentadas sólo como variantes de o excepciones a la dominancia (“codominancia” y “dominancia incompleta”). Este problema también ha sido reforzado por generaciones de genetistas, quienes, como Mendel, han preferido trabajar con alelos que presentan diferencias fenotípicas claramente diferenciadas. La importancia de este problema crece a medida que descubrimos los fundamentos de la variación fenotípica natural, de la cual sólo una parte muy pequeña presenta dominancia clásica. Finalmente, aunque los libros de texto más modernos explican que la dominancia es usualmente ocasionada por haplosuficiencia, sondeos informales a alumnos en nuestro curso de genética de nivel superior revelan que la mayoría aún no tiene idea sobre qué hace que un alelo sea dominante sobre otro. Les cuesta incluso entender la pregunta, y al ser presionados típicamente especulan que los alelos dominantes deben apagar activamente a sus compañeros recesivos, tal vez actuando de represores o a través de efectos epigenéticos.

El comité responsable del desarrollo del nuevo curso pensó que la aproximación histórica estaba dificultando el aprendizaje de los alumnos en lugar de facilitarlos. Entender incluso el cruzamiento más simple requiere la combinación de inferencias sobre dos procesos complejos—cómo los elementos genéticos son heredados a través de la meiosis y el cruzamiento, y cómo estos elementos actúan e interactúan para causar diferencias fenotípicas vistas en los parentales y la progenie. Genetistas pioneros tratan a estos procesos como “cajas negras” cuyas reglas dedujeron, pero nuestros alumnos evadieron este desafío simplemente memorizando las reglas y rúbricas de resolución de problemas provistas por los bienintencionados instructores. Agravando la dificultad, los experimentos clásicos a menudo requieren que los alumnos también comprendan detalles

g - Nota de los traductores (ET): Se aplica a muy pocos genes y la demostración práctica y experimental puede bastante compleja.

experimentales complejos no relacionados con el principio que está siendo enseñado (ej., el uso de transformación neumocócica para demostrar que el DNA es el material genético). No hubo tiempo ni recursos para un estudio formal (las primeras herramientas validadas para la evaluación del aprendizaje de la genética apenas se estaban disponibilizando, (6,7), así que pusimos nuestras mejores ideas en el nuevo curso.

Nuestro nuevo plan de estudios aborda estos problemas obviando la aproximación histórica y posponiendo el análisis de cruzamientos hasta después de que los procesos subyacentes hayan sido explicados. Así, nuestro curso inicia no con Mendel sino con dos bloques independientes, primero un bloque de tres semanas sobre el funcionamiento de los genes (cómo el genotipo determina el fenotipo), y luego un bloque de dos semanas sobre herencia. Nuestros alumnos de segundo año llegan con nociones fundamentales de biología molecular, pero no han pensado sobre cómo las diferencias en el DNA causan diferencias en los fenotipos, especialmente no en diploides (de ahí su profunda confusión sobre la dominancia). El bloque 1 enseña cómo los fenotipos diploides surgen de diferencias homocigotas y heterocigotas en genes con varias funciones simples o interactivas. Los alumnos primero se encuentran con la dominancia y la epistasia aquí, no como abstracciones sino como consecuencias predecibles de las relaciones metabólicas y regulatorias entre proteínas funcionales y no funcionales. En el bloque 2, los alumnos aprenden a seguir diferencias en secuencias de DNA y alelos nombrados a través de la meiosis y el cruzamiento, libres de la confusión de los fenotipos. La meiosis es el obstáculo más grande para la mayoría de los alumnos de genética, y este bloque enfatiza su función y su mecanismo molecular. En lugar de memorizar las “etapas” vistas bajo un microscopio óptico, los alumnos consideran primero los problemas que la mitosis y la meiosis deben resolver (cómo colocar los cromosomas correctos en las células hijas) y luego sus soluciones moleculares (cohesina, separasa tensión de la fibra del huso acromático, y especialmente el rol que juega el reconocimiento de la secuencia de las hebras del DNA en el apareamiento homólogo y el entrecruzamiento). Los efectos de la segregación independiente de los cromosomas y del entrecruzamiento se exploran primero a través del estudio explícito de los genotipos de los gametos producidos por meiosis, y el posterior uso de cuadros de Punnett para representar cómo los gametos se unen aleatoriamente en el cruzamiento. Una vez que estas clases hayan solidificado los principios fundamentales de los fenotipos y la herencia, el análisis genético es utilizado para enseñar los conceptos más complejos.

El Canon ha Superado su Fecha de Caducidad

Todos estuvimos orgullosos del nuevo plan de estudios, y sólo cuando enseñé la primera sección el año pasado me di cuenta de cuán obsoletos eran los contenidos. Había

introducido un breve segmento de “Genética en las Noticias” al inicio de cada clase; mi intención era mostrar a los alumnos la relevancia de lo que les estaba enseñando, pero el torrente de noticias sobre genética por el que estaba navegando me convenció a mí de su irrelevancia.

Nuestro objetivo a la hora de diseñar el curso había sido hacer a los alumnos competentes en los principios estándar de la genética de transmisión, pero habíamos omitido completamente considerar si esto es lo que nuestros alumnos necesitan saber. De hecho, hemos estado omitiendo esta consideración por muchos años —quejándonos de que los alumnos se olvidan de todo lo que enseñamos al final del curso, pero nunca pensamos que esto podría ser (i) nuestra culpa por enseñarles cosas que nunca usarían y (ii) corregible si se hacía el contenido del curso más relevante. Hace 50 años esto no hubiera sido una desatención grave, pero ahora los genes están en todas partes, algunas veces trivialmente (“el DNA del Toyota”), aunque más a menudo con serias implicancias para la vida personal y pública.

Tal vez el cambio más grande es el aumento de los servicios genéticos y genómicos dirigidos directamente a los consumidores (Estos servicios no son sólo para personas: \$69,99 más un frotis de mucosa oral revelará el linaje de su perro, y \$19,50 más una pluma revelará si su loro es macho o hembra). Hasta octubre del 2011, más de 125000 clientes de 23andMe se han anotado para genotipado personal en un millón de posiciones de SNP y el acceso a los excelentes recursos interpretativos de 23andMe. La secuenciación de exomas directamente para el consumidor final ya está disponible como un emprendimiento piloto (\$999 por 70-fold coverage) y el secuenciamiento del genoma prometido por \$1000 será más barato que la mayoría de los estudios de resonancia magnética. Para cuando nuestros alumnos sean padres, los paquetes estándar de obstetricia podrían incluir el secuenciamiento del genoma del bebé.

Un buen lugar para ver estos y otros cambios es en los titulares— el Cuadro 3 da una compilación de términos populares de búsquedas recientes en Google News sobre “genética”. Ellos inspiran preguntas complejas, tanto personales como sociales, que nuestros alumnos necesitarán responder. ¿Es sensata la aplicación de análisis genéticos? ¿Es una inversión económica segura? ¿Debo tener acceso total a mi información genética? ¿Deben tenerla mis aseguradores y empleadores? ¿Deben los atletas ser analizados sobre modificaciones genéticas (“dopaje genético”)? (8) ¿Es ético hacer una base de datos de huellas de DNA de los criminales condenados? ¿De todos los sospechosos? ¿Mis genes me hicieron homosexual? ¿Son seguros los alimentos genéticamente modificados? ¿Es ética la clonación de animales? ¿Cuán diferentes son las razas humanas, y cuán diferentes somos de los chimpancés y gorilas?

Cuadro 3. Encabezados de una Búsqueda de Google News el 20 de Mayo de 2013.

- Científicos crean células madre humanas a través de clonaciones.
 - La Cátedra de Derecho y Genoma Humano reflexiona sobre la evolución de la genética y las biotecnologías humanas.
 - Sin la mejora genética de animales y plantas no se puede alimentar al planeta.
 - Auge de consultas por la prueba genética que le hicieron a Angelina Jolie.
 - Científicos descubren un tratamiento prometedor para la progeria.
 - País irá tras pista genética del cáncer de mama
- Una mutación genética, vinculada con la forma típica de la migraña.

La naturaleza de la investigación genética también ha cambiado. Tanto para nuestra especie como para otras, el énfasis ha cambiado de las mutaciones de laboratorio a la variación genética y fenotípica natural. Los humanos se están volviendo rápidamente el sistema genético mejor entendido; hay muchas más secuencias de genomas completos de humanos que de otras especies, y estudios mucho más detallados de la variación natural (9,10). Esta variación natural solía estar en su mayor parte fuera de alcance, y ser investigada sólo a través de abstracciones de genética cuantitativa clásica, pero estudios de GWAS ahora pueden encontrar genes que afectan a cualquier fenotipo. Una consecuencia es que los genes son ahora estudiados en el contexto de las poblaciones, ya que los cruzamientos no pueden distinguir los pequeños efectos fenotípicos típicos de la variación natural. Finalmente, la evolución está ahora explícitamente entrelazada con la genética en cada punto, ambas firmemente embebidas en las diferencias entre las secuencias de DNA. Las secuencias conservadas nos dicen qué partes de los genes son esenciales para su funcionamiento, y el análisis de familias de genes nos dice cómo cambian esas funciones.

Los cambios en la población estudiantil han hecho al canon aún más irrelevante. La genética solía ser una materia electiva avanzada para alumnos intelectualmente ambiciosos, pero la mayoría de los programas de biología ahora la requieren para todos. Muchos de estos estudiantes nunca tomarán otro curso de genética, menos aún se dedicarán a la investigación genética. Por otro lado, los alumnos destinados a programas profesionales en las ciencias de la salud^h necesitan mucha más genética de la que solían necesitar, ya que incrementarán sus pedidos de análisis genéticos y tendrán que explicar los resultados a

sus pacientes. Afortunadamente, la genética que necesitarán es una versión sólo un poco más sofisticada que la que otros necesitarán en su vida diaria—un entendimiento sólido sobre cómo los genes influyen los fenotipos, sobre variación genética natural, y sobre el mecanismo de herencia.

Los instructores ciertamente no están ajenos a estos cambios, y pueden haber modificado sus enseñanzas para incluir tanto material nuevo como fuera posible. Pero remendar con material nuevo nuestro canon desfasado no logra abordar su obsolescencia fundamental. Es hora de empezar de nuevo.

Una Separación Amigable del Canon

El Cuadro 4 da un plan sugerido para un curso de genética del siglo XXI. Comienza con un enfoque en el hombre, introduciendo la genómica personal y nuestra variación genética natural. Los alumnos luego aprenden sobre las explicaciones moleculares subyacentes—cómo surgen y evolucionan las diferencias en las secuencias de DNA, y cómo ocasionan diferencias en el fenotipo—seguidas de cómo las diferencias genéticas se heredan y se recombinan. Con esto a su alcance, los alumnos están listos para adentrarse en el análisis genético, tal vez suficiente para abrir sus apetitos por un curso avanzado sobre métodos genéticos. El curso luego vuelve a la variación genética natural, considerandó cómo puede estudiarse y cómo interpretar los resultados. Nada se enseña como una caja negra—todo se presenta en el contexto de sus fundamentos moleculares.

Cuadro 4 . Plan Sugerido Para un Curso de Genética del Siglo XXI.

- Genómica Personal
- Variación Genética Natural en Poblaciones (humanas y otras)
- Estructura y Función de los Genes y Cromosomas
- La variación genética surge por mutación
- Variación Genética y Evolución (selección para función, filogenia, homólogos, familias de genes)
- Cómo los genes afectan los fenotipos: rutas metabólicas, interacciones regulatorias, heterocigocidad, efectos de dominancia (varias clases)
- La variación genética surge por rearrreglo cromosómico y recombinación homóloga
- Mitosis y meiosis: mecanismos y consecuencias genéticas (varias clases)
- Cruzamiento: mecanismos y consecuencias genéticas
- Ligamiento y herencia ligada al sexo

^h - Nota de los traductores (ET): Debido a la gran demanda que existe sobre la posibilidad de la realización de un análisis genético a fin de determinar la herencia individual, la predisposición o ser portadores de una enfermedad genética, e incluso tener la capacidad de brindar y explicar los resultados a los pacientes. En nuestro país, el plan de estudio de la Carrera de Medicina y Cirugía de la Universidad Nacional de Asunción, desarrolla Genética como un módulo dentro de una cátedra, esto podría no ser adecuado. Aún en estas condiciones, esta carrera está acreditada por la Agencia Nacional de Evaluación y Acreditación de la Educación Superior (ANEAES).

ⁱ - Nota de los traductores (DFR): Tony Griffiths sacó a relucir una estrategia similar hace más de diez años: "Confiamos en que esta nueva organización del material ayudará a aquellos estudiantes que encuentran problemas en encajar retrospectivamente la biología molecular en el entramado de la genética mendeliana... damos una oportunidad a la integración vertical de conceptos, a los niveles de organismo, célula, cromosomas, proteína y DNA. Por último, esperamos que esta nueva aproximación permitirá comprender a los estudiantes cómo se hace la genética en el <<mundo real>>, en el que las estrategias clásica y molecular no se utilizan por separado sino que se complementan una a la otra" (11).

Cuadro 4 . Plan Sugerido Para un Curso de Genética del Siglo XXI.

- Análisis Genético: investigación de la acción de los genes por medio de la utilización de herencia de alelos simples ("Mendelianos") y fenotipos en cruzamientos y pedigrees (varias clases)
- Genética de Organelos
- Herencia Epigenética
- Estructura del genoma, función y evolución; causas y consecuencias de los cambios cromosómicos (varias clases)
- Efectos fenotípicos de diferencias genéticas naturales, heredabilidad
- Estudios de GWAS y estudios relacionados que vinculan genes a fenotipos (varias clases)
- Genética del cáncer^j; herencia de alelos como factor de riesgo

Un cambio tan radical como este tendrá muchos obstáculos. Para muchos genetistas el cambio más traumático será la remoción del análisis genético de su trono en el plan. El análisis genético solía ser la herramienta más poderosa para entender cómo funcionan los organismos, y por lo tanto la mejor habilidad que podemos transmitir a nuestros alumnos, pero su rol en la investigación ha sido mayormente ocupado por métodos moleculares. Los cortes al análisis genético también amenazan al aprendizaje basado en la resolución de problemas que ha sido una marca distintiva de los cursos de genética. Los instructores de genética han dedicado tiempo al desarrollo de problemas que replican a aquellos que aparecen en laboratorios reales de investigación genética, y una característica relevante a la hora de elegir libros de texto es la cantidad y calidad de los problemas al final de cada capítulo.

Otros cortes serán menos traumáticos. Nuestros alumnos probablemente nunca necesitarán hacer un cruzamiento de tres factores (excepto tal vez en un curso desfasado de laboratorio de genética), ni analizar razones fenotípicas de progenie, que fue una vez "uno de los pilares de la genética" (1). También existe poca justificación para retener la genética de haploides, de hongos, el análisis de tétradas y la genética clásica de células somáticas en un curso introductorio de genética. La genética bacteriana clásica (conjugación, transducción, transformación) debe irse también—Yo soy genetista bacteriana, así que confío en mi sobre esto.

Uno de los obstáculos más grandes es puramente práctico—la falta de un libro de texto apropiado. Aunque la mayoría de los temas que abordaría son al menos mencionados por los libros actuales, el material no es muy útil porque está en capítulos avanzados, no integrado en el núcleo del material. Las editoriales de libros de texto son muy conservadoras, e incluso libros con un enfoque ostensiblemente molecular dejan el canon intacto. Los recursos informáticos podrían llenar el vacío, pero

encontrarlos y modificarlos será aún mucho trabajo.

Como primer paso, los genetistas deben apartarse de su plan de estudios actual y decidir lo que los alumnos del siglo XXI realmente necesitan saber sobre los genes y la herencia. Estas decisiones deben basarse en cómo los alumnos usarán lo que aprendan, y no en lo que nosotros valoramos como genetistas. Luego podemos desarrollar objetivos específicos de aprendizaje—listas de habilidades que queremos que los alumnos adquieran. Sólo entonces estaremos listos para desarrollar un plan de estudios, y para crear los libros de texto y los instrumentos de evaluación y de validación que necesitamos. Al mismo tiempo, debemos promover cambios paralelos en niveles anteriores; el breve tiempo que los estudiantes de ciencias biológicas le dedican a la genética en la universidad no debe ser desperdiciado en las leyes de Mendel y los cuadros de Punnett.

Espero que la sola lectura de este artículo haya indignado a muchos lectores cuyos temas favoritos yo cortarí. La procrastinación es atractiva—si esperamos suficiente, tal vez el cambio se desacelerará, las dudas se aclararán y los colegas tradicionalistas se retirarán. Mientras nos mantengamos cómodos con el hecho de enseñar material mayormente irrelevante, no tenemos que preocuparnos por cambiarlo. Pero si queremos hacer que la genética que enseñamos sea genuinamente útil para nuestros alumnos, necesitamos iniciar el proceso ahora.

Referencias

- 1 Griffiths AJF, Wessler SR, Carroll SB, Doebley J. Introduction to genetic analysis. 10th ed. New York: W. H. Freeman and Company; 2012.
- 2 Hartwell L, Hood L, Goldberg M, Reynolds A, Silver L. Genetics, from genes to genomes. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
- 3 Ledford H. Language: Disputed definitions. *Nat News*. 2008;455(7216):1023–8.
- 4 Darlington CD, Mather K. The elements of genetics. Sydney: Allen and Unwin; 1949.
- 5 Smith MK, Knight JK. Using the Genetics Concept Assessment to Document Persistent Conceptual Difficulties in Undergraduate Genetics Courses. *Genetics*. 2012;191(1):21–32.
- 6 Smith MK, Wood WB, Knight JK. The Genetics Concept Assessment: A New Concept Inventory for Gauging Student Understanding of Genetics. *CBE-Life Sci Educ*. 2008;7(4):422–30.
- 7 Bowling BV, Acra EE, Wang L, Myers MF, Dean GE, Markle GC, et al. Development and Evaluation of a Genetics Literacy Assessment Instrument for Undergraduates. *Genetics*. 2008;178(1):15–22.
- 8 Sweeney HL. Dopaje génico. *Investig Cienc*. 2004;Septiembre(336):18–25.
- 9 The International HapMap Consortium. Integrating common and rare genetic variation in diverse human populations. *Nature*. 2010;467(7311):52–8.
- 10 Clarke L, Zheng-Bradley X, Smith R, Kulesha E, Xiao C, Toneva I, et al. The 1000 Genomes Project: data management and community access. *Nat Methods*. 2012;9(5):459–62.
- 11 Griffiths AJF, Gelbart WM, Miller JH, Lewontin RC. Una aproximación moderna. *Genética Moderna*. 2nd ed. Madrid: Mc-Graw Hill Interamericana; 2000. p. xv–xvi.

j - Nota de los traductores (DFR): Como modelo genético de regulación y ejemplo de sistema evolutivo (No necesariamente en su contexto médico).