

Marcadores moleculares del ADN: huellas genéticas que revelan secretos de los seres vivos

Así como un detective sigue pistas para resolver un caso, los investigadores que estudian el ADN buscan huellas genéticas para revelar los secretos de los seres vivos. Estas huellas son los marcadores moleculares, herramientas de la biología molecular que permiten usar el ADN para detectar variaciones entre individuos y especies. Gracias a los avances científicos y tecnológicos, su uso se ha vuelto esencial en múltiples disciplinas, desde la genética forense –animal y humana– hasta la medicina, la producción de alimentos y la conservación de especies.

¿Qué es el ADN y dónde se encuentra?

El avance de la ciencia y la tecnología ha abierto las puertas a un mundo fascinante de conocimiento sobre los seres vivos que existen en el planeta. Uno de los campos más revolucionarios en la biología es, sin duda, el estudio del ADN, molécula que contiene la información genética de los seres vivos (mensajes codificados que definen sus características). El ADN tiene una estructura de doble hélice, parecida a una escalera de caracol, conformada por secuencias lineales de cuatro moléculas llamadas nucleótidos, cada uno de ellos formado por tres componentes: una base nitrogenada (adenina, citosina, guanina o timina) que representa a cada uno de los peldaños, un azúcar (llamada desoxirribosa) y uno o más grupos fosfato que mantienen unidas las piezas de las cadenas y les dan dirección. Otra forma de verlo es imaginar que los nucleótidos son como el código binario de las computadoras. Como sabes, las computadoras se programan con secuencias de ceros y unos para formar imágenes, programas, animaciones y videojuegos. En los seres vivos ocurre algo similar, ya que están “programados” con secuencias formadas por los cuatro nucleótidos, que tienen el código para que las células formen proteínas, enzimas, tejidos, órganos y, finalmente, organismos completos.

Las células no tienen sólo uno, sino varios tipos de ADN, en función de su origen, el cual depende del organelo (pequeñas partes estructurales y funcionales de la célula) donde se encuentre; por ejemplo, las células animales tienen ADN en el núcleo (ADN nuclear) y en las mitocondrias (ADN mitocondrial), mientras que las



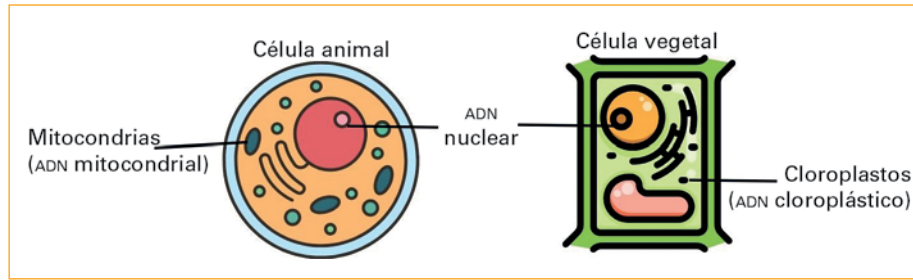


Figura 1. Ubicación del ADN dentro de las célula animal y vegetal; se utiliza al estudiar marcadores genéticos. Realizada por Claudia Itzel Beteta Hernández.

células vegetales tienen, además de estos dos, ADN en los cloroplastos (ADN cloroplástico). Cada uno de esos ADN tienen características diferentes, por ejemplo: 1) el ADN nuclear es de herencia biparental; es decir, tiene una copia que proviene del padre y otra de la madre; 2) el ADN mitocondrial es de herencia casi totalmente materna; es decir, que las madres pasan la gran mayoría de su información genética a sus descendientes, y 3) el ADN cloroplástico, que es de herencia materna, aunque en plantas sin flores suele ser de herencia paterna (Figura 1).

■ **Marcadores moleculares y sus usos**

Una forma de estudiar el ADN es usando los marcadores moleculares. Un marcador molecular es una secuencia específica de ADN que se puede localizar y analizar para obtener información genética de un organismo. Estos marcadores pueden ser idénticos o diferentes entre individuos, y su valor radica en que permiten identificar variaciones heredables dentro o entre poblaciones y especies. Los científicos que estudian estos aspectos se convierten en inspectores que buscan pistas, y los marcadores moleculares son esas huellas o evidencias genéticas que se usan para resolver los misterios contenidos en el ADN (Figura 2).

Esta evidencia puede aprovecharse en la investigación y es útil en el día a día de muchas maneras diferentes (Tabla 1). Entre los más utilizados se encuentran los microsatélites (o SSR), que son pequeños fragmentos de ADN con secuencias repetidas y pueden detectarse comparando el tamaño de las “bandas” obtenidas con una técnica llamada PCR (reacción en cadena de la polimerasa) que permite hacer muchas copias de una secuencia específica

de ADN, lo cual tiene lugar mediante el uso de un secuenciador automático de ADN que permite identificar con gran detalle el número exacto de repeticiones presentes. También están los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP), que son como “errores de ortografía” en un solo nucleótido del ADN. Para identificarlos se usan diferentes técnicas, y una de las más comunes es la secuenciación, que permite leer con detalle el orden de los nucleótidos. Otro caso son los haplotipos, combinaciones de varias

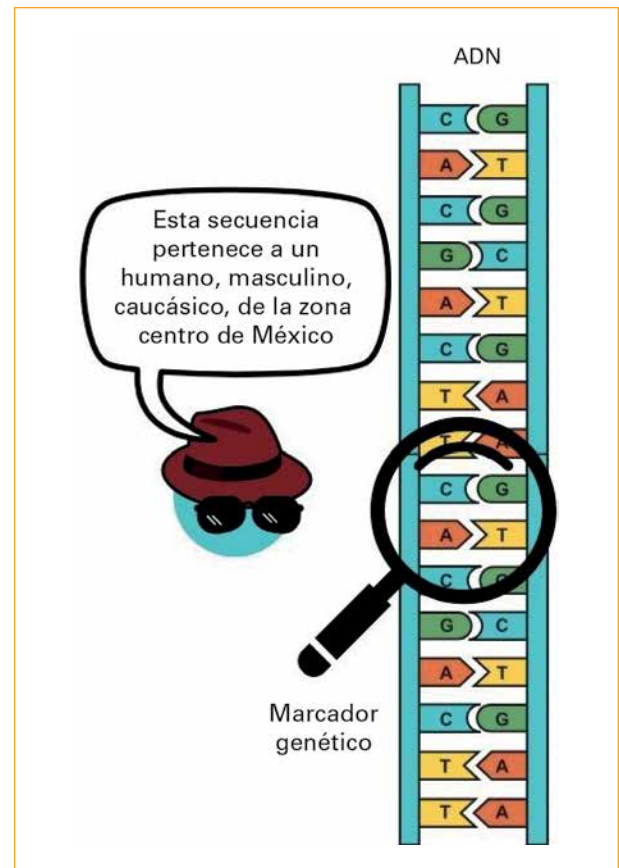


Figura 2. Representación de un marcador molecular. Realizada por Claudia Itzel Beteta Hernández.

Tabla 1. Marcadores moleculares más utilizados actualmente.

Marcador	Acrónimo	Cómo se mide	Herencia	Principales aplicaciones	Ejemplo emblemático
Polimorfismo en longitud de fragmentos amplificados	AFLP	Fragmentos de ADN, bandas diferentes o iguales.	Biparental	Identificación de individuos, análisis de parentesco, relaciones entre especies, estimación de diversidad biológica, análisis forense.	Identificación de variedades en cultivos agrícolas.
Simple secuencias repetidas o microsatélites	SSR	Secuencias cortas que se repiten continuamente.	Biparental o materna	Evaluación de la diversidad genética, sistemas de apareamiento, parentesco y éxito reproductivo, dispersión, diferenciación de especies, hibridación, análisis filogenéticos, diagnóstico de enfermedades.	Pruebas de paternidad en humanos y fauna silvestre.
Secuencias mitocondriales	ADNmt	Secuencias de ADN de un fragmento o gen mitocondrial.	Materna	Identificación de especies, evaluación de diversidad genética, relaciones filogenéticas, usos forenses.	Detección de linajes maternos en estudios de migración animal.
Secuencias de cloroplasto	ADNcl	Secuencias de ADN de un fragmento o gen cloroplástico.	Materna (aunque en plantas sin flor es paterna)	Análisis filogenéticos, evaluación de diversidad genética, estudios de evolución, identificación de especies.	Rastreo del origen geográfico en especies vegetales.
Polimorfismo de único nucleótido	SNP	Cambio o polimorfismo de un nucleótido específico.	Biparental	Relaciones filogenéticas, evaluación de diversidad genética, expresión de genes, análisis de genomas completos, adaptación local, medicina personalizada.	Estudio de variantes genéticas asociadas a resistencia a enfermedades.
ADN ambiental	eADN	Extracción y amplificación de ADN libre en agua, suelo o aire.	No aplica (muestras indirectas)	Detección de especies sin necesidad de captura, monitoreo de biodiversidad, estudios de distribución.	Identificación de especies invasoras en cuerpos de agua.

Fuente: Curso de Genética para la Conservación, Programa de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

secuencias que se heredan juntas y sirven para rastrear linajes genéticos; se usan en estudios de parentesco, historia evolutiva o compatibilidad para trasplantes.

Un ejemplo muy conocido del uso de marcadores moleculares es la prueba de paternidad. Para hacerla, se compara el ADN del hijo con el de la madre y del padre, ya que el hijo siempre tiene una mitad de la información genética de cada uno de éstos. Por lo tanto, podemos identificar los marcadores que heredó de ellos y si una mitad no coincide con ninguno de los padres probados, es muy probable que no sea hijo de esas personas. Los marcadores también se usan en investigaciones policiales, sólo que en el caso de la identificación de personas primero se debe establecer su perfil genético; es decir, un conjunto de marcadores característicos que sirven como huellas digitales para ese individuo. Una vez estable-

cido, este perfil puede compararse con el ADN obtenido de una muestra biológica —una gota de sangre o un cabello; por ejemplo— encontrada en la escena de un crimen; si las “huellas genéticas” coinciden en todos los puntos revisados, es muy probable que esa muestra pertenezca a esa persona.

En biología los marcadores moleculares tienen muchos usos, pero podemos destacar cuatro principales:

- a) *Conocer la estructura poblacional.* Permiten estudiar la variación genética que existe entre las poblaciones que habitan diferentes regiones geográficas.
- b) *Identificación de especies.* Consiste en reconocer a qué especie pertenece un organismo. Esto puede lograrse comparando secuencias de ADN de referencia conocidas con las del individuo en cuestión. Además, mediante el uso de una técnica

llamada *ADN ambiental* (eADN), es posible identificar las especies presentes en un ecosistema a partir de muestras de agua, suelo o aire, sin necesidad de observar o capturar directamente a los organismos.

- c) *Delimitación de especies*. Se refiere a determinar si dos grupos de organismos que parecen muy similares son en realidad especies diferentes (**Figura 3**). En este caso, permiten detectar híbridos (cruzas entre individuos de diferentes especies) y comprender mejor los mecanismos que han dado origen a nuevas especies.
- d) *Estimación de filogenias*. Los marcadores moleculares permiten reconstruir “árboles genealógicos” de las especies, es decir, representaciones gráficas que muestran cómo están emparentadas entre sí. Estos árboles en realidad son hipótesis que ayudan a interpretar la historia genealógica de diferentes especies a lo largo del tiempo.

El uso de marcadores moleculares ha revolucionado las ciencias biológicas, son valiosos en diversas disciplinas aplicadas en la investigación científica y tienen varias ventajas. En primer lugar, son estables ya que, al estar en el ADN y heredarse de padres a hijos, no cambian en pocas generaciones. Esto quiere decir que si tu tía se pinta el cabello de rubio y se opera la nariz, se le reconocerá siempre como tu pariente cuando se hacen pruebas con marcadores del ADN. Otra ventaja es que, con el avance de la tecnología y técnicas actuales, cada vez es más fácil y económico obtener un número casi ilimitado de marcadores y detectar la variación entre individuos mediante técnicas como la PCR. Por último, son altamente versátiles, podemos utilizarlos para fines



tan diversos como la conservación de especies, los estudios poblacionales, para resolver casos policíacos, en medicina personalizada, pesca, acuicultura, agricultura y biotecnología, entre otros (**Tabla 1**). Estas contribuciones hacen que los marcadores moleculares sean una herramienta invaluable en la búsqueda del conocimiento sobre la vida en la Tierra.

En conclusión, podemos decir que los marcadores moleculares representan una poderosa herramienta en la investigación científica y en la vida cotidiana. Gracias a ellos, hemos podido desentrañar misterios del ADN y acercarnos a comprender la diversidad y evolución de los seres vivos. Su versatilidad y aplicaciones en campos como la genética de poblaciones, la medicina, la agricultura, la pesca, la acuicultura y la conservación de especies los convierten en una piedra angular de la biología moderna. A medida que la tecnología continúe avanzando, seguramente



Figura 3. Identificación de especies similares entre sí por medio de marcadores. Realizada por Claudia Itzel Beteta Hernández.

seguiremos revelando nuevos secretos y maravillas ocultas en el fascinante mundo que se descubre con los marcadores moleculares.

Agradecimientos

Este ensayo forma parte de las actividades que Claudia Itzel Beteta-Hernández realizó para concluir los créditos del curso de Genética para la Conservación (clave 9420) dentro del programa de doctorado del Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste. Se agradece al Conahcyt (Secihti) por las becas otorgadas a: Claudia Itzel Beteta (no. 781991) para el desarrollo de su doctorado; a Angélica Colín (no. 1193058) para su estancia posdoctoral con el proyecto “Contribución a la genómica y transcriptómica de las truchas nativas mexicanas de la Sierra Madre Occidental”, y a Francisco J. García-de León (no. 12721) por la beca de año sabático en la Universidad Estatal de Montana, Estados Unidos. Al Laboratorio de Genética para la Conservación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste por las enseñanzas recibidas.

Claudia Itzel Beteta-Hernández

Laboratorio de Genética para la Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
claudiabet@pg.cibnor.mx

Angélica Colín

Laboratorio de Genética para la Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
acolín@pg.cibnor.mx

Francisco J. García-De León

Laboratorio de Genética para la Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
fgarciadl@cibnor.mx

Lecturas recomendadas

- Burguete, A., V. H. Bermúdez-Morales y V. Madrid-Marina (2009), “Medicina genómica aplicada a la salud pública”, *Salud Pública de México*, 51, s379-s385.
- García-de León, F. J. (2001), “Los marcadores genéticos en el conocimiento y manejo de recursos bióticos”, *Biotam*, Revista de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, nueva serie, 12(3):57-80.
- Godoy, J. A. (2009), “La genética, los marcadores moleculares y la conservación de especies”, *Ecosistemas*, 18(1):23-33. Disponible en: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/73>, consultado el 6 de noviembre de 2025.
- Naval, F. M. e Y. J. Vives-Rego (2016), “Resolución de biocrímenes mediante la genética forense: un nuevo reto para la ciencia y la administración de justicia”, *La Ley Penal: Revista de Derecho Penal, Procesal y Penitenciario*, 118:3.
- Pérez de la Vega, M. (1997), “Marcadores moleculares, variabilidad genética y evolución”, *III Simposio Científico en Biología Celular y Molecular*. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/61905769.pdf>, consultado el 6 de noviembre de 2025.
- Ramírez-Amaro, S., M. Bassitta Sánchez, A. Picornell, B. Guijarro, C. Ramon Juanpere y B. Terrasa Pont, B. T. (2023), “ADN ambiental (eDNA): una herramienta novedosa para el monitoreo de la biodiversidad marina”, *VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears: Ponències i comunicacions*, Societat d’Història Natural de Balears, pp. 272-275.
- Schlötterer, C. (2004), “The evolution of molecular markers—just a matter of fashion?”, *Nature Reviews Genetics*, 5(1):63-69.
- Solís Ramos, L. Y. y A. Andrade Torres (2005), “¿Qué son los marcadores moleculares?”, *Cdigital*, Universidad Veracruzana. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/5634/20051P41.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, consultado el 6 de noviembre de 2025.