

# Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

## Contaminación marina...adaptarse o perecer: una ventana hacia la epigenética ambiental

Karina Galache · Saturday, August 31st, 2024

Categorías: Ciencias Naturales y de la Salud, Zona Abierta

En el mundo existen muchas sustancias tóxicas que causan daño a la salud y pueden llegar a inducir enfermedades, como los diversos tipos de cáncer. También se reconoce que los mares y océanos de nuestro planeta son contaminados constantemente con diversos compuestos nocivos que alteran sus ecosistemas. Sin embargo, a pesar de que estos hábitats se encuentran día a día expuestos a una gran gama de elementos perjudiciales, la capacidad de las poblaciones marinas de tolerar y adaptarse a un estrés ambiental por contaminación no ha sido estudiada con la profundidad necesaria. La exposición química diaria en algunos mares podría hacernos pensar que los organismos en dichos hábitats deberían sufrir diversas enfermedades y mostrar todo tipo de tumores. No obstante, su capacidad de tolerancia y resiliencia, evaluadas con base en su reproducción, su crecimiento y la permanencia de las poblaciones, nos hace cuestionarnos sobre los procesos o mecanismos que permiten que estas poblaciones permanezcan en sitios contaminados.

La epigenética es una ciencia que busca aportar información sobre las incógnitas relacionadas con este tema: ¿Cómo pueden sobrevivir los animales y adaptarse a su ambiente en una forma rápida y viable? ¿Estas adaptaciones son heredables y podrían ser un motor de la evolución? Para seguir con el tema, es necesario explicar el funcionamiento de esta disciplina científica.

### ¿Qué es la epigenética y su herencia?

Para hablar sobre epigenética, es necesario iniciar con el tema de la genética. Desde temprana edad hemos oído hablar sobre los genes, definiéndolos como *unidades de información* contenidas en el ADN, que permiten el establecimiento de los rasgos físicos de un individuo como el color de sus ojos o la forma de su nariz (**Fig. 1**), además, esta información en paquetes (genes) se transmite de padres a hijos, proceso que conocemos como herencia Mendeliana. Al hablar de herencia, estos conceptos —rasgos físicos, ADN, transmisión de padre a hijos— pueden parecer sencillos de entender, pero la realidad es que la herencia puede ser más compleja de lo que Mendel y sus experimentos con chícharos establecieron en el siglo XIX.

A la información contenida en los genes, llamémosla “información básica”, se lee por medio de

distintas combinaciones secuenciales de las 4 bases nitrogenadas que conforman al ADN: A (adenina), C (citocina), G (guanina) y T (timina), y que se reflejan en lo que se conoce como “el código genético” (**Fig. 1**). Las distintas combinaciones de estas 4 letras en forma de cadenas larguísimas representan la información que necesita la célula para su funcionamiento correcto, es decir, son las palabras que definen a cada gen creadas con un alfabeto de 4 letras. Las modificaciones o sustituciones de una o varias de estas 4 letras en la secuencia de ADN de un gen —la forma en que se ordenan estas letras—, podrían representar variaciones genéticas o mutaciones, las cuales pueden alterar la información inicial y generar rasgos o características distintas a los originales. Por ejemplo, algunos cambios o mutaciones podrían reflejarse como una modificación en el color de los ojos o en la forma de la nariz. Adicionalmente, estas variaciones podrán ahora ser heredadas, generando una descendencia con las nuevas características e.g. hijos y nietos con los ojos del abuelo; sin embargo, el tiempo en el que se desarrollan cambios por mutaciones, suele ser largo.



Figura 1. El ADN y el código genético.

Existe otro tipo de variaciones rápidas que no causan modificaciones en la información básica de los genes, es decir, no hay cambios en las palabras creadas con el alfabeto de las letras A, C, G y T, pero que sí pueden afectar la disponibilidad de la información contenida en dichos genes y, por lo tanto, alterar el resultado final, por ejemplo, los rasgos físicos. Estas variaciones son las estudiadas por la epigenética. Como su nombre lo indica, la epigenética estudia los cambios que ocurren por “arriba” (*epi-*) del ADN y de los genes, manteniendo las secuencias originales intactas. En pocas palabras, se podría decir que la epigenética es información adicional que se coloca por “arriba del código genético”. Este segundo nivel de información lo que define es si la “información básica” contenida en el ADN está o no “disponible o accesible” para utilizarse en el momento adecuado.

Esta información adicional puede ser equiparada al uso de “etiquetas moleculares”, que indican cual información básica no está disponible y cual sí es accesible. La presencia de estas etiquetas provoca que la molécula del ADN adopte una estructura o conformación “cerrada” que hace que la “lectura” de su información sea más complicada. Cuando estas etiquetas no están presentes, el ADN adopta una estructura más “relajada”, más extendida, que permite que su información esté disponible (**Fig. 2**). Esta compactación o estiramiento de los genes tiene consecuencias importantes al momento de leer e interpretar la información contenida en el ADN, ya que cuando la molécula está compactada por las etiquetas, la información contenida en el gen no se puede leer, es decir no está disponible, y por lo tanto, es como si el gen estuviese “apagado” (**Fig. 2**). En cambio, cuando las etiquetas no aparecen, la información está accesible y se puede leer. En otras palabras, el gen se encuentra “activado” (**Fig. 2**). Metafóricamente podría verse como si estuviéramos leyendo un texto, donde los genes son las oraciones. Usaremos diferentes marca-textos (marcas epigenéticas) para resaltar en **amarillo** las partes importantes y accesibles para leer (información gen 1) y en **azul** los segmentos compactados que son difíciles de leer (información gen 2):

–GCATGACTAGTACATG**información-gen-1**GTACTGCTAGTCAGTAC**información gen2**.TGTCGTGACT–.

Las marcas epigenéticas presentan dos comportamientos muy particulares cuando los organismos interactúan con el ambiente. El primero es la capacidad de modificar la lectura de la información

que la célula requiere ejecutar en un momento específico (marcar como **amarillo** o como **azul**), por ejemplo, durante la presencia de algún estrés ambiental que puede ser físico o químico. El segundo comportamiento consiste en mantener esos cambios a pesar de que el estrés ya no se encuentre (memoria epigenética), para pasar esta información adicional a sus hijos, nietos e incluso bisnietos, algo que se conoce como herencia transgeneracional.

Existen tres grandes clases de etiquetas epigenéticas que pueden modificar la estructura del ADN: 1) el ARN pequeño no codificante, ARNnc (es decir, que no se traduce en proteína), 2) las modificaciones en las histonas (las proteínas en donde se enrolla el ADN), y 3) la metilación en el ADN (la más conocida y estudiada). La etiqueta de la metilación funciona colocando un grupo metilo (-CH<sub>3</sub>) unido a las Citocinas, Cs (**Fig. 2**). A lo largo de un gen existen regiones muy específicas que le indican cómo y cuándo debe funcionar. Estas regiones contienen numerosas Cs y en muchas ocasiones aparecen junto a una G a lo que se denominan “islas CG”. Cuando las Cs se llenan de grupos metilo, el gen se “apaga”. Esta información sobre si un gen debe estar apagado (presencia de grupos metilos) o prendido, es la que se transmite de generación en generación. Sin embargo, si las condiciones en el medio representan un nuevo estrés, la epigenética se alterará en relación con la nueva condición.



Figura 2. Etiquetas epigenéticas: la metilación del ADN y su regulación génica.

### “La vida se abre camino” ... del estrés ambiental a la adaptación

En la película de ciencia ficción Jurassic Park (1993), y su teoría del caos, el personaje icónico Dr. Ian Malcom pronuncia una pequeña frase: “La vida se abre camino” ... No hay mejor frase que resuma los procesos de adaptación originados a partir de la epigenética. El medio en el que nos encontramos puede generar modificaciones de nuestras etiquetas de información adicional. Algunas de estas pueden conllevar condiciones o respuestas favorables representando de esta manera cierto tipo de ventaja adaptativa, por ejemplo, al favorecer algún mecanismo que incremente la tolerancia a los elementos tóxicos presentes en las nuevas condiciones ambientales. Sin la ventaja adaptativa inducida por las modificaciones, los efectos nocivos del nuevo ambiente podrían afectar seriamente el desarrollo de los organismos del ecosistema (**Fig. 3**).

La epigenética ambiental es la interacción entre los genes y el hábitat de los organismos, seleccionando cambios heredables en la expresión génica (qué tanta información del genoma es leída) en respuesta a las condiciones del medio (**Fig. 3**). El ambiente acuático, por su parte, alberga muchos ecosistemas tan específicos que, si se modificaran drásticamente, se produciría una seria amenaza para los organismos que los habitan. Pero ¿Qué ocurriría si las modificaciones son pequeñas y lentas? ¿Puede haber una adaptación?. Estas preguntas se pueden responder con el apoyo de la epigenética.



**Figura 3.** Efectos del estrés ambiental sobre la epigenética, la regulación génica asociada y el posible destino de las poblaciones estresadas.

Recientemente debido a los efectos producidos por el cambio climático, se han comenzado a

estudiar con mayor detalle las posibles adaptaciones de los organismos marinos al estrés físico, tales como cambios en la temperatura, salinidad, pH e irradiación. Por ejemplo, gracias a la epigenética es asombrosa la forma en la que se ha entendido el proceso de estivación o reducción del metabolismo debido a un aumento en las temperaturas y reducción en recursos, que tienen algunas especies de pepino de mar y de esponjas marinas como mecanismo de respuesta ante el estrés termal. En estos casos, hay marcas epigenéticas que evitan la expresión o lectura de mucha de la información disponible en los genes. Esto causa una disminución en su metabolismo —ahorro de energía— y, por lo tanto, se favorece su sobrevivencia hasta que retornen las temperaturas adecuadas.

Los estudios de adaptación de un organismo a un estrés químico como los contaminantes ambientales son más escasos, pero pueden ser tan importantes como los anteriores. Por ejemplo, se ha logrado observar cambios epigenéticos asociados a la supervivencia y a procesos adaptativos en peces por exposiciones a contaminantes como los metales pesados. Es evidente que aún queda mucho trabajo por hacer si quiere comprenderse el mecanismo por completo. La relevancia de esta necesidad, radica en alertar que la contaminación de los mares y océanos es tan real como el calentamiento global.

Resumiendo, los cambios epigenéticos proporcionan la capacidad de responder rápidamente a diversos estresores ambientales, generando cambios ventajosos y heredables en características relativas a tolerancia a estrés que podrían observarse a corto (adaptación) y largo plazo (evolución). Por ejemplo, es probable que el gran paso de la evolución de los organismos que pasaron de agua salada a agua dulce se relacione con las variabilidades genética y epigenética.

### **El Golfo de México y su exposición histórica al petróleo**

El Golfo de México (GoM) es una cuenca oceánica de gran importancia, tanto ecológica como económica, que abarca alrededor de 1.6 millones de km<sup>2</sup>. Sus aguas son compartidas por México, Cuba y Estados Unidos. Entre sus principales actividades económicas está la extracción de petróleo, la cual es liderada por Estados Unidos desde hace 85 años que hoy en día cuenta con más de 10,000 plataformas marítimas. México comenzó la extracción de petróleo una década más tarde, contando en la actualidad con alrededor de 2,000 pozos de extracción.

A pesar de la gran explotación petrolera que se ha llevado a cabo en esta cuenca, dentro del subsuelo se encuentran todavía grandes reservas que no han sido explotadas, principalmente en el territorio mexicano. La exploración de nuevos pozos y la explotación del recurso para aumentar la producción, podrían incrementar las riquezas del país, con los consecuentes riesgos ambientales por posibles derrames.

Históricamente, el GoM ha estado expuesto de forma natural a los hidrocarburos del petróleo probablemente miles de años antes de que las personas comenzaran a extraer el recurso, ya que a lo largo y ancho de esta cuenca se han encontrado filtraciones naturales de petróleo y gas; a la fecha se han registrado 914 zonas que aportan el 32% del petróleo que se estima se derrama anualmente en el GoM.

Deben sumarse los derrames que ocurren y han ocurrido, por la actividad e influencia del hombre (antropogénica). Por ejemplo, de 1964 al 2012 se han registrado 343 pequeños derrames (< 50

barriles por evento) y tres grandes desastres ambientales: uno en México (1979-pozo Ixtoc I con 3 millones de barriles liberados) y dos en Estados Unidos (2004-Taylor Energy con 3.3 millones de barriles; 2010-Deepwater Horizon con 4.9 millones de barriles). Además de que se estima que anualmente ocurren 44 derrames mayores (> 200 barriles) y miles de derrames menores (< 50 barriles) en Estados Unidos. Sin embargo, las poblaciones de organismos marinos persisten y se reproducen en todo el golfo, tanto en zonas con elevada contaminación como en zonas con menor contaminación.

De tal suerte, se pudieran plantear algunas interrogantes. Si bien los desastres ambientales que ocurren debido a un derrame de grandes dimensiones, como el que ocurrió en el 2010, son la preocupación principal y el riesgo más importante para el GoM debido a la explotación petrolera, ¿es posible que la exposición natural debido a las filtraciones naturales, más los constantes aportes antropogénicos de petróleo desde hace 85 años, contribuyan a que las poblaciones del golfo puedan tolerar y adaptarse a un ambiente contaminado con petróleo? La cultura popular tiene una frase muy adecuada “la dosis hace al veneno”. Es evidente que las zonas inmediatas a los sitios de derrames constituyen un verdadero ecocidio, esto es, destrucción ambiental. Las partículas de petróleo que se van desprendiendo de la zona inicial, pueden viajar grandes distancias con las corrientes oceánicas hasta depositarse en sedimentos más alejados llenos de vida (**Fig. 4**) por lo que la llegada del contaminante producirá o causará una exposición crónica constante y en pequeñas dosis sobre las diversas poblaciones que habitan en la cuenca.



**Figura 4.** Filtraciones naturales y derrames de petróleo. Comportamiento, dispersión, sedimentación y exposición dentro del Golfo de México.

### Tolerancia en mares contaminados

Es difícil pensar que la adaptación a los contaminantes pueda ser factible, pero la tolerancia de algunos animales a la contaminación de los océanos, pareciera ser una evidencia importante, considerando que muchas especies de peces e invertebrados marinos del GoM hacen su día a día entre agua y sedimentos contaminados con hidrocarburos encontrados en el petróleo. Además, se han detectado estos mismos compuestos orgánicos tanto en tejidos (bioacumulación) como en desechos (metabolización) de varias especies de peces sin que haya a la fecha registro significativo de tumores o células cancerígenas, a pesar de que se sabe que estos compuestos son cancerígenos.

Los niveles de contaminación no son iguales en las diferentes zonas del GoM, pues dependen principalmente de la actividad antropogénica, y es probable que algunas poblaciones puedan ser más tolerantes que otras, si sus antepasados fueron expuestos a concentraciones mayores o similares a las actuales y sobrevivieron nuevas generaciones a través de las etiquetas epigenéticas. Así, organismos de la misma especie podrían tener distinta información de cómo sobrevivir a la contaminación si provienen de sitios con diferente grado de exposición.

La tolerancia adquirida por vías epigenéticas podría conducir a procesos adaptativos que les permitan vivir, alimentarse y reproducirse en sitios contaminados y así aprovechar los recursos de la zona. Sin embargo, aún queda mucho trabajo por hacer para comprender los procesos y rasgos específicos que se modifican para adaptarse a estos sitios. Por ejemplo, una respuesta que se ha propuesto como posible adaptación a medios con hidrocarburos, es el bloqueo de su metabolización, ya que cuando los animales intentan metabolizar estos compuestos, los productos

de degradación pueden inducir efectos toxicológicos más fuertes o dañinos que el propio compuesto original. Algunos estudios parecen arrojar cierta evidencia de que este proceso —bloqueo de las rutas de degradación— se liga a eventos de modificación epigenética; sin embargo, hace falta investigación para entender y corroborar esta hipótesis.

### Camuflaje tóxico: supervivencia del más apto

Es común escuchar sobre las consecuencias negativas que tiene la exposición química en muchos organismos, pero la idea de tolerancia y adaptación en animales que habitan sitios contaminados, es controversial. En retrospectiva, el comportamiento camaleónico de supervivencia y adaptación ha sido objeto de estudio evolutivo desde la época de Charles Darwin (1809-1882), junto con su teoría de la selección natural, igualmente controvertida en su época, hoy ampliamente conocida y aceptada.

Un ejemplo de selección natural son las bacterias resistentes a antibióticos; su uso indiscriminado ha provocado la amplia presencia por selección de bacterias resistentes que hacen cada vez más difícil controlar infecciones con los antibióticos actuales. Los procesos que favorecen que un microorganismo se vuelva resistente a antibióticos pueden ser de origen tanto genético (estudiados por años) como epigenéticos (evidencia reciente). Si una bacteria puede volverse resistente a antibióticos gracias a procesos epigenéticos, ¿los organismos marinos podrían adaptarse a medios contaminados de la misma manera? Después de todo, la exposición de bacterias a antibióticos representa un estrés ambiental para las bacterias al igual que los contaminantes para los organismos acuáticos. Aunque en el caso de bacterias no existe ambigüedad al referirse a “estrés ambiental” pues se conoce bien el blanco de acción y el mecanismo de resistencia para varios antibióticos, y en el caso de organismos acuáticos es necesario investigar a qué nivel actúan diferentes contaminantes y cómo sería la adaptación epigenética.

La idea de adaptación no es tan descabellada si se piensa que los procesos epigenéticos cumplen perfectamente con las tres premisas descritas por la selección natural: 1) rasgos heredables, 2) variabilidad del rasgo y 3) rasgos ventajosos para un nuevo ambiente. Así, la epigenética también puede considerarse como un motor de adaptación y evolución que se mueve a mayor velocidad que la genética.

### Conclusiones

La supervivencia y tolerancia al estrés ambiental físico o químico de diversas poblaciones, podría ser el resultado de un cúmulo de información adicionada durante la vida de sus antepasados, los cuales experimentaron cambios ambientales similares o exposiciones químicas quizá desde temprana edad. Es así como la epigenética pudiera estar desempeñando un importante papel en la persistencia de las poblaciones en un ambiente estresante.

Gracias a la epigenética ambiental, podemos utilizar al estrés como herramienta para estudiar la capacidad adaptativa de los organismos en medios contaminados, ya que los cambios moleculares, como respuesta al agente estresor, conllevan a variaciones en las características físicas y metabólicas, modificando los procesos biológicos y traduciéndolos en una adaptación biológica. De este modo, los organismos pueden enfrentar los cambios en su hábitat mientras se mantiene su

salud física.

La comprensión del funcionamiento de los mecanismos que regulan la capacidad de los organismos para responder a un ambiente cambiante, es de suma importancia para entender y tratar de disminuir los impactos del estrés ambiental en los organismos. Hay que insistir en que esta información podría aplicarse no solo a las especies marinas, sino a todas las especies que habitan nuestro planeta, ya que la capacidad de adaptación epigenética está presente desde los microorganismos hasta los humanos. Sin embargo, aunque la “naturaleza es tan sabia” y la “vida sigue tratando de abrirse camino”, la rapidez con la que el humano modifica su entorno hace muy difícil la regeneración y adaptación natural en los ecosistemas. Como seres conscientes, no debemos de ser indiferentes con la vida que nos rodea; el estudio y entendimiento de las adaptaciones epigenéticas podría contribuir con propuestas que ayuden al restablecimiento de ecosistemas, que hasta hoy son considerados irreversiblemente dañados.

## Referencias

Anastasiadi, D., Shao, C., Chen, S., Piferrer, F., 2021. Footprints of global change in marine life: Inferring past environment based on DNA methylation and gene expression marks. *Mol Ecol* 30, 747–760. <https://doi.org/10.1111/mec.15764>

Ghosh, D., Veeraraghavan, B., Elangovan, R., Vivekanandan, P., 2020. Antibiotic resistance and epigenetics: More to it than meets the eye. *Antimicrob Agents Chemother* 64. <https://doi.org/10.1128/AAC.02225-19>

Pham, K., Ho, L., D’Incal, C.P., De Cock, A., Berghe, W. Vanden, Goethals, P., 2023. Epigenetic analytical approaches in ecotoxicological aquatic research. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121737>

Pierron, F., Daffe, G., Daramy, F., Heroin, D., Barré, A., Bouchez, O., Clérendeau, C., Romero-Ramirez, A., Nikolski, M., 2023. Transgenerational endocrine disruptor effects of cadmium in zebrafish and contribution of standing epigenetic variation to adaptation. *J Hazard Mater* 455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131579>

Pulster, E.L., Gracia, A., Armenteros, M., Toro-Farmer, G., Snyder, S.M., Carr, B.E., Schwaab, M.R., Nicholson, T.J., Mrowicki, J., Murawski, S.A., 2020. A First Comprehensive Baseline of Hydrocarbon Pollution in Gulf of Mexico Fishes. *Sci Rep* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62944-6>

## Figuras creadas con BioRender.com

This entry was posted on Saturday, August 31st, 2024 at 10:55 am and is filed under [Ciencias Naturales y de la Salud](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.

