

Aportes de la epigenética al estudio de las relaciones ser humano-medio ¿superación de las tradicionales respuestas?

Contributions of epigenetics to the study of human – environment relationships overcoming traditional responses?

*Abraham Paulsen Bilbao**

Resumen

El presente artículo revisa el aporte de la epigenética al estudio que realiza la Geografía contemporánea de las relaciones ser humano – sociedad – medio. La primera, como disciplina biológica, estudia los mecanismos mediante los cuales ciertos patrones se heredan sin que ello implique mutaciones en el ADN, lo que equivale a sostener que algunos cambios de la información genética heredada por un individuo se relacionan con problemáticas alimenticias, crisis socioambientales y sociopolíticas, presencia de sequías, exposición a contaminantes, desarrollo de patologías, entre otras situaciones que afectan el nivel y calidad de vida de las sociedades, todas ellas, preocupaciones de la ciencia geográfica.

La tradición ecológica, más propia de la Geografía contemporánea, recibe para su desarrollo un significativo aporte desde esta rama de la biología en el estudio de las recíprocas e interdependientes influencias del medio en el ser humano, que evidencian la importancia en el abordaje de estas injusticias ambientales y espaciales, las que afectan a diversas sociedades y que podrían tener efectos irreversibles tanto en las generaciones presentes como en las futuras.

Palabras claves: relaciones ser humano-sociedad-medioambiente, epigenética, metilación.

Abstract:

This article reviews the contribution of epigenetics to the study carried out by the contemporary geography of human-society-medium relationships. The first, as a biological discipline, studies the mechanisms by which certain patterns are inherited without involving mutations in the DNA, which is tantamount to arguing that some changes in genetic information inherited by an individual relate to Nutritional problems, socio-environmental and sociopolitical crises, presence of droughts, exposure to contaminants, development of pathologies, among other situations that affect the level and quality of life of societies, all of them, concerns of the Geographic Science.

The ecological tradition, more typical of the contemporary geography, receives for its development a significant contribution from this branch of biology in the study of the reciprocal and interdependent influences of the environment in the human being, which demonstrate the importance in The approach of these environmental and spatial injustices, those that affect different societies and that could have irreversible effects in both present and future generations.

Keywords: relationships to be human - society - environment; epigenetics; methylation;

* Profesor Asistente, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Email: apaulsen@uc.cl

Avances en epigenética: oportunidades para la reflexión geográfica

Así como el medio proporciona a la mente una gran parte de sus contenidos, de modo que “Si la herencia biológica es el material sobre el que se esculpe la mente, el ambiente es el escultor que le da su forma” (Morgado, 2012: 28), también influye en los patrones evolutivos que una generación lega a la otra (Pembrey et al, 2006), cuestión que coincide con lo que la afirmación geográfica en que las relaciones ser humano–sociedad–medio son dinámicas, integradas y cambiantes (Febvre, 1955), pero que debe ser revisada a partir de los descubrimientos biológicos del último tiempo.

Medioambiente se ha transformado, más que el otro nombre asignado al espacio geográfico (Ortega Varcárcel, 2000), en un objeto de estudio en sí mismo (Smith y Smith, 2005). Se trata de un vocablo significativo que enfatiza el carácter del espacio geográfico como continente de relaciones variadas y complejas entre sujetos y objetos, las formas como dichas relaciones evolucionan en el tiempo y en el espacio, y la magnitud del impacto de los cambios en las variables naturales en la conducta humana (y viceversa) (Archer, 1995; Caneto, 2000; Smith y Smith, 2005). En este objeto de estudio coinciden diversas ciencias y disciplinas, entre ellas la genética, la biología evolutiva y la epigenética, que experimentaron notables avances durante el siglo pasado, contribuyendo a una verdadera revolución en el estudio de las relaciones ser humano–medioambiente, cuyo mayor hito tuvo lugar el 14 de abril de 2003 cuando fue anunciada la primera versión completa del genoma humano con un alto nivel de confiabilidad y certidumbre científica.

Esta cuasi revolución neo-darwiniana (Jablonka y Lamb, 2005) ofrece a la Geografía la oportunidad de revisar su teoría, dado que el estudio de las relaciones ser humano–sociedad–medioambiente ha sido, desde su fundación como ciencia moderna, una de sus tradiciones fundamentales vinculándose con las ciencias ecológicas y biológicas, como lo estuvo en su primera hora junto a los paradigmas darwinianos en las corrientes deterministas de los siglos XIX y XX (Ortega Varcárcel, 2000). Las consideraciones aportadas por la epigenética complejizan las mediciones y proyecciones que hace la Geografía de los efectos de los problemas ambientales, alimenticios y sociopolíticos, entre otros, sobre las generaciones futuras (Jablonka y Lamb, 2002).

Desde la epigenética se ha logrado demostrar que factores tales como el nivel socioeconómico, la exposición de seres humanos y sociedades a la polución, a diversos tipos de radiaciones o contaminantes, la dieta alimenticia, estrés, crisis sociopolíticas y condiciones ambientales, sociales y espaciales

injustas, influyen, por ejemplo, en la heredabilidad del coeficiente intelectual (Turkheimer et al, 2003). Algo similar sucede con la herencia de experiencias adversas de los progenitores (incluso abuelos), las que generan cuadros de ansiedad y estrés infantil en sus descendientes (Essex, 2013). Por otra parte, las características del espacio geográfico y el nivel socioeconómico influyen en las opciones alimenticias que adoptan los grupos sociales (Goody, 1995; Elias, 2000). La epigenética afirma que somos lo que nuestros antepasados comieron (o no comieron) (Feil, 2006), ya sea por hambrunas (Pembrey et al, 2006) o por limitantes culturales (Douglas, 1998).

Tales descubrimientos han obligado a reexaminar las ideas previas genético-deterministas, que sostenían que los genes se encontraban aislados de la mayor parte las influencias medioambientales (Macías et al, 2008). Según estas formulaciones, los genes tenían un rol decisivo en el desarrollo biológico y en el carácter del fenotipo. Sin embargo, la sola consideración de las evidencias proporcionadas por la realidad sugieren que el fenotipo es más que la simple suma de los genes y del ambiente, siendo necesaria la asociación de los sistemas genéticos con modelos cibernéticos o dinámicos (Jablonka y Lamb, 2002; Johnson, 2007). Es así como “Actualmente se reconoce el papel fundamental que el ambiente extranuclear y social ejerce en la modulación de la actividad genética” (Bedregal et al, 2010: 366). Incluso, algunos investigadores postulan que los individuos experimentan variaciones de distinto signo durante su ciclo vital, las que dependen de factores externos medioambientales, cuestión que amplía y refuerza el concepto de paisaje epigenético de Waddington, en el que las relaciones entre la genética y el medio explicaban el desarrollo de los organismos mediante “la imagen de un paisaje compuesto por una superficie ondulante con cimas y valles, que representan las vías por las cuales se desplazan las células del organismo en su proceso de diferenciación” (Tamayo-Orrego, 2013: 3).

En la actualidad, el paisaje epigenético corresponde a un modelo visual que describe determinadas propiedades del organismo, entendido como sistema (Slack, 2005). Cada individuo evoluciona a partir de vías estables del desarrollo en las que acontecen procesos de toma de decisiones (Waddington, 1966), junto a la intervención de sistemas genéticos complejos e interacciones físico – químico – biológicas reguladoras en la configuración de las vías de desarrollo (Jablonka & Lamb, 1995; 2002; 2005). Tal conducta también ha sido abordada y explicada por la teoría de los sistemas emergentes (Johnson, 2007; Morange, 2002; Slack, 2002; 2005).

Lo anterior equivale a desafiar planteamientos científicos tradicionales, argumentando que una célula o un organismo en determinado estado de evolución (por ejemplo, un embrión), recorre un paisaje genético hasta completar su desarrollo como organismo diferenciado maduro y que en dicho paisaje existen *organizadores* bioquímicos que dirigen el destino de cada región del organismo en desarrollo, por lo cual cada parte del organismo es en sí un tipo específico de paisaje (Morange, 2002), siendo cada individuo completo un conjunto de paisajes mediados en alguna medida por retroalimentaciones con el medioambiente, el que actuaría sobre la superficie del paisaje, cuyo fondo estaría conformado por cuerdas de genes (Waddington, 1942; 1966; Russo et al, 1996; Morange, 2002) sobre las que actuarían mecanismos moleculares, a su vez influidos por condiciones socioambientales, que producen la activación, encendido, represión o apagado de genes y en las dinámicas implicadas en la remodelación de la cromatina (Bell y Spector, 2011).

Objeto y evolución de la epigenética

La epigenética es una rama de la biología que tuvo un importante desarrollo desde el siglo XX hasta nuestros días y que pretende explicar por qué los organismos vivos *expresan* unos genes y *silencian* otros para conformar así sus características físicas particulares y la susceptibilidad de desarrollar determinadas enfermedades (Morange, 2002).

Este concepto fue acuñado por Conrad Waddington en la primera mitad del siglo XX, cuando estudiaba los factores no genéticos que participaban en la formación y desarrollo de un fenotipo en los llamados *paisajes genéticos*¹ o *epigenomas* (Jablonka y Lamb, 2002). Waddington definió a la epigenética como “la rama de la biología que estudia las interacciones causales entre los genes y sus productos, lo que hace que el fenotipo se convierta en realidad” (Waddington, 1942: 18)². Desde su perspectiva, la epigenética abordaba el estudio de aquellas interacciones que llevaban del genotipo al fenotipo.

¹ Este concepto tiene diversas acepciones en los planteamientos de Waddington, ya que lo empleó como una especie de bandera de lucha en contra de las teorías en boga durante la primera mitad del siglo XX, que negaban la posibilidad de algún grado de interacción entre los genes, el organismo y el ambiente durante las etapas del desarrollo. Afirmaba, en cambio, el sentido, a lo menos bidireccional de las relaciones entre el gen y el producto de expresión, que no podían ser debidamente explicadas por la pura genética en boga. Dicha polisemia original se complejizó a partir de la última década del siglo pasado, no sólo en este caso, sino también a los modos de empleo del concepto epigenética en sí mismo, surgido como una reinterpretación del llamado “efecto Baldwin” (Morange, 2002), complementado por una derivación del *fitness landscape* de Sewall Wright (Waddington, 1966; Slack, 2002).

² Traducción del autor.

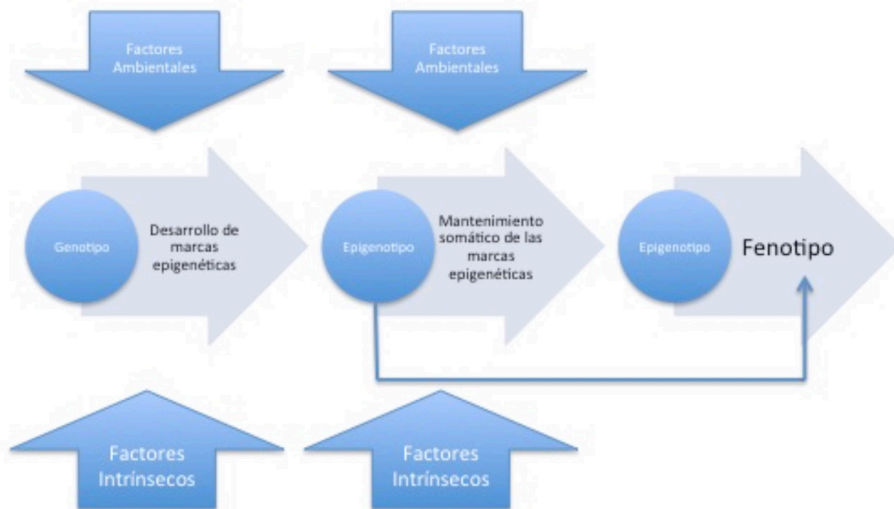
El trabajo de Waddington se basó en la constatación de que células de un organismo con el mismo acervo genético tenían la competencia de producir otras formas completamente distintas, situación que a su juicio se debía a la existencia de mecanismos moleculares diferentes a los puramente genéticos, a los cuales llamó *epigenéticos* (Waddington, 1942: 18). Como lo plantea Goldberg et al, “*Historically, the word ‘epigenetics’ was used to describe events that could not be explained by genetic principles*” (Goldberg et al, 2007: 636).

Posteriormente, Arthur Riggs (1996) definió a la epigenética como la rama de la biología y de la genética que abordaba el estudio de cambios en los genes que no pueden ser explicadas por variaciones secuenciales del ADN (Russo, 1996). Tiempo después, en 2007, una editorial de la prestigiosa revista *Science* definió a la epigenética como el estudio de las modificaciones químicas del ADN o de las proteínas asociadas a su estructura (Bird, 2007).

Se sentaban así las bases de una teoría que desafiaba a los planteamientos de la teoría de la evolución de origen darwiniano, particularmente en las formas en como esta explica procesos como la influencia concreta en el fenotipo de la metilación del ADN, si existen (y qué magnitud tienen) las influencias medioambientales en la modificación de histonas, y que la posibilidad de que la localización de los histosomas sea heredable (Feil, 2006). Avanzaba, además, al estudio de la auto – perpetuidad de los RNA no codificantes, la posibilidad de que la reversibilidad de los Priones (Jablonka y Lamb, 1995), la explicación de los efectos del medio o del comportamiento sobre la información genética que se transmite de generación en generación, entre otras interrogantes (Fraga et al, 2005). La idea central de esta postura referida a la evolución y a la herencia es que legamos a nuestros descendientes características fenotípicas que derivan del entorno y/o de nuestro comportamiento (Lowenthal, 1961), e incluso abuelos o bisabuelos sin que ello pase por cambios genotípicos o en el ADN (Fraga et al, 2005).

La figura 1 ilustra el proceso mediante el cual el estilo de vida de los antepasados tiene algún tipo de consecuencia fenotípica en sus descendientes. Se pretende destacar el hecho de que los vínculos generacionales pueden contener algunas marcas epigenéticas asociadas a la acción de factores medioambientales en distintos estadios de evolución del organismo. En síntesis, cuando hablamos de epigenética, nos estamos refiriendo al estudio de cambios heredables en la función de los genes que ocurren sin un cambio en la secuencia del ADN (Jablonka y Lamb, 1995; Fraga et al, 2005; Essex et al, 2013).

Figura 1.
Vinculaciones entre genotipo, epigenotipo y fenotipo



Fuente: elaboración propia.

El rol de la metilación

En etapas tempranas del desarrollo de un organismo se producen patrones epigenéticos de metilación que influyen significativamente en la formación de diversos fenotipos, los que no pueden ser sólo explicados por variaciones en la secuencia del ADN. Por ende, la metilación aporta significativamente a la explicación de fenómenos tales como las discrepancias en la prevalencia de determinadas patologías, según estudios realizados en gemelos monozigóticos (Bell y Spector, 2011), la distribución geográfica de algunas enfermedades según la localización o la etnia (Wallace, 2010).

La metilación consiste en la adición de un grupo de tilo en la posición 5, prima de la Citosina, que actúa en la transcripción de un gen activo, usualmente en el promotor del gen (Adams et al, 1980). Se trata de un proceso crucial para el desarrollo de la vida tal como la entendemos, con implicancias en la heredabilidad y en el tratamiento de enfermedades. A este respecto, se ha logrado avanzar, con el apoyo de nuevos recursos biotecnológicos, en el conocimiento

de las influencias de algunos fármacos en el comportamiento de los genes y en el control de los cambios (encendidos y apagados) epigenéticos (Adams et al, 1980: 179), lo que puede aportar para el tratamiento de algunas enfermedades genéticas y en tipos de cáncer.

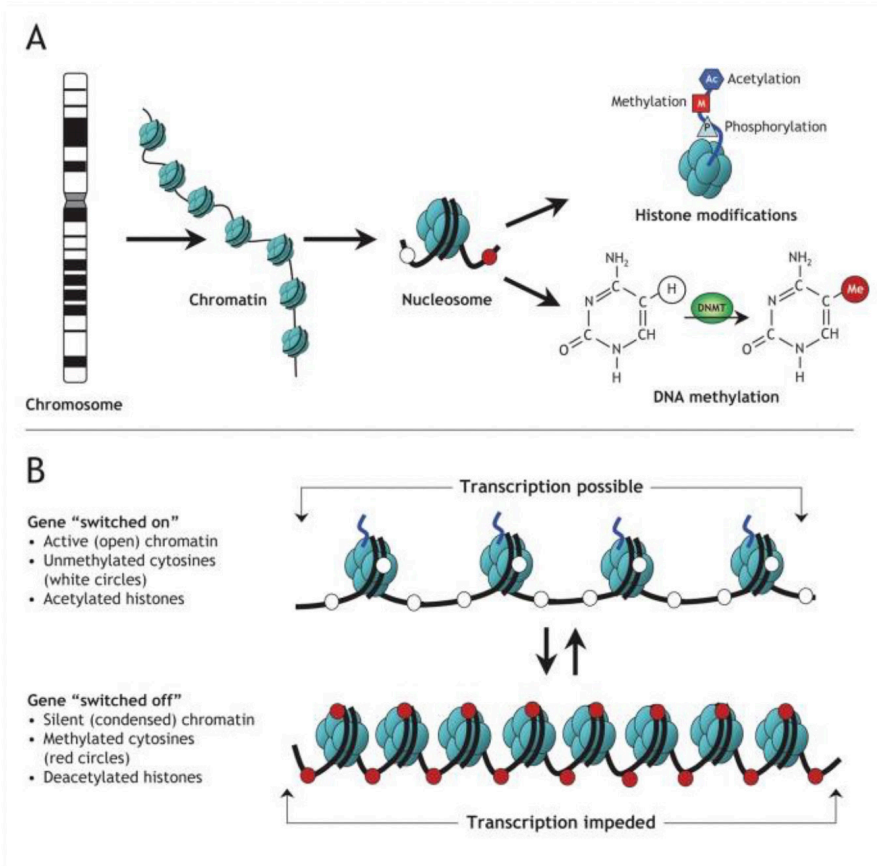
Los cambios estructurales en la Cromatina, que se convierte en Heterocromatina, influyen en *encendido* y *apagado* de genes y/o en la regulación de la expresión de algunas zonas y/o genes; la metilación de una secuencia provoca el *apagado* de la misma o la *represión* de algunos genes que no se transcriben (Bedregal et al, 2010). La metilación aporta a la diferenciación de los individuos, ya que aunque todas las células de nuestro cuerpo tengan la misma información genética, existe la probabilidad de que se den 200 tipos celulares distintos y que cada uno lleve a cabo tan diferentes funciones y actividades; dependiendo de los genes que tenga *apagados* y *encendidos* tendrán una estructura, actividad y función concreta (Fraga et al, 2005). La figura 2 trata esta situación.

El comportamiento de una célula está definido por las proteínas de la cual está formada, que a su vez resultan de patrones específicos de expresión de genes. Tales expresiones dependen del empaquetamiento del ADN por proteínas llamadas histonas, que forman estructuras llamadas nucleosomas. Los nucleosomas se organizan para conformar la cromatina, desde ésta se originarán los cromosomas, según se indica en la figura 2.

Las expresiones genéticas son reguladas tanto desde regiones localizadas en el mismo gen mediante factores que permiten su transcripción, como también por un conjunto de procesos conocidos como mecanismos epigenéticos (Rodenhiser y Mann, 2006) o *maquinaria epigenética* (Macías et al, 2008: 51).

Figura 2.

(A) Esquema de las modificaciones epigenéticas y (B) cambios reversibles en la organización de la cromatina que determina la expresión de los genes



Fuente: Rodenhiser y Mann, 2006: 343.

La epigenética y los efectos de las injusticias espaciales y ambientales

En materia de las relaciones entre la genética y el medioambiente, se ha avanzado en el descubrimiento de las bases moleculares epigenéticas que controlan la activación y el silenciamiento de los genes (Russo et al, 1996); funciones y funcionalidad de los genes, (especialmente en la transmisión del material genético) y funcionamiento de los genes en el organismo; modificaciones genéticas referidas a la transmisión por la división mitótica de las células

durante la diferenciación celular, modalidades de ocurrencia de los procesos de mutaciones y epimutaciones, determinación del estado de los genes, qué cambios epigenéticos se transmiten o heredan, reversibilidad de las epimutaciones, entre otros aspectos (Essex et al, 2013).

Además, diversas investigaciones han mostrado que un número poco significativo de componentes ambientales y tóxicos que pueden producir enfermedades, son también competentes para alterar la secuencia de ADN o producir mutaciones. La biología evolutiva ha demostrado que mutaciones azarosas no explican la diversidad de fenotipos existentes, cuestión que reforzaría el rol de la metilación en esta situación (Wallace, 2010).

Por ende, se hace preciso reflexionar desde la geografía sobre el impacto del medio sobre la vida humana, toda vez que desde la epigenética surgen posturas que proyectan dichas influencias en la calidad de vida de las generaciones que vienen. Se abre la posibilidad de pensar la sustentabilidad desde la biología, otorgándole al cuerpo y las prácticas asociadas a su mantención y supervivencia un rol central en la discusión referida a la profundización de los valores democráticos a escalas intergeneracionales, dejando en la dimensión intrageneracional el estudio de las posibles modificaciones de la información genética que cada individuo porta y proyecta hacia el futuro a causa de la presencia de situaciones de injusticia ambiental (Martínez Alier, 1994; 2008) y espacial (Soja, 2014).

Las injusticias expresadas en las diferencias en condiciones socioespaciales o coyunturas sociopolíticas o económicas pueden tener efectos sobre la información genética proporcionada a la descendencia, ya que “las alteraciones en los patrones epigenéticos normales pueden desregular el patrón de expresión de los genes con profundas y diversas consecuencias” (Macías et al, 2008: 53). Por ejemplo, los grupos metilo que se incorporan como parte de la dieta, modifican las histonas y el ADN (Feil, 2006) al ser integrados a través del folato y la metionina (Macías et al, 2008), lo cual ya implica variaciones epigenéticas asociadas a lo que come o deja de comer un grupo humano determinado.

Efectos epigenéticos de algunas injusticias espaciales y ambientales en grupos humanos diversos

Situaciones de injusticia ambiental pueden afectar al epigenoma, ya que presenta altos niveles de vulnerabilidad a variables ambientales durante la embriogénesis. Estas repercuten gravemente en los individuos bajo situaciones

medioambientales adversas que puedan experimentar en las primeras etapas de su desarrollo, o según el tiempo de exposición, considerando incluso el período de gestación (Feil, 2006). Por ejemplo, la exposición a algunos elementos metálicos como el arsénico, hidrocarburos aromáticos, como los benzopirenos, pueden desestabilizar el genoma y modificar el metabolismo molecular (Macías et al, 2008), cuestión que puede verse incrementada si es que existen alteraciones genéticas preexistentes (Rodenhiser y Mann, 2006).

Un estudio realizado en el cementerio y en los archivos parroquiales de la localidad de Överkalix, Suecia, por Olov Larsen Bygren y Marcus Pembrey et al, demostró que la vida de los padres, abuelos, e incluso bisabuelos puede llegar a afectar directamente la salud de una persona (Pembrey et al, 2006), cuestión que reforzaba los descubrimientos previos de Pembrey et al en materia de la impronta genética y sus implicancias en la aparición de los síndromes de Prader-Willi y de Angelman. De lo anterior se deduce que la vulnerabilidad de un grupo social específico afecta la calidad de vida de sus descendientes (Affichard y Foucauld, 1992), lo mismo que el *habitus* y el campo de un sujeto (Bourdieu, 1991).

La localidad de Överkalix, cercana al Círculo Polar Ártico, mantuvo una economía pastoril hasta mediados del siglo XX y un aislamiento del resto mundo. Al funcionar como un mini sistema autárquico, su población experimentó períodos de hambruna relacionados con pérdida de sus cosechas, la incomunicación con el resto del país y del mundo, junto a las inclemencias climáticas asociadas a su localización (Pembrey et al, 2006).

El estudio de los cadáveres de tres o cuatro generaciones de una misma familia enterrados en el cementerio, los registros parroquiales y los archivos médicos de los descendientes más contemporáneos logró demostrar que las consecuencias de las hambrunas de los antepasados producidas por los factores anteriormente consignados, se expresaban en las vidas de los descendientes, muchos de los cuales incluso nunca habían experimentado este tipo de episodios y pese a ello manifestaban altas tasas de mortalidad, baja en la esperanza de vida y longevidad, y la recurrencia de casos de diabetes más allá de las proporciones esperadas para determinados grupos de población (Pembrey et al, 2006: 161-162).

Siguiendo con Pembrey et al (2006), se demostró un mecanismo de comunicación transgeneracional de los efectos del hambre o de una deficitaria dieta alimenticia que actuaba sobre hombres y mujeres en distintos períodos del desarrollo del sujeto. Las mujeres resultaban más susceptibles a desarrollar

improntas genéticas, (que eran transmitidas a sus descendientes), cuando eran afectadas por períodos de hambruna en su etapa de gestación y a los hombres si experimentaban hambrunas durante la pubertad. Tal situación estaba asociada a la producción de óvulos y espermias, dado que las células sexuales masculinas y femeninas se originan en los individuos en épocas diferentes de su desarrollo evolutivo.

Se concluía entonces, sobre todo en el caso de los hombres, que la situación del medioambiente, prácticas alimenticias, y otros hábitos como fumar, eran también heredadas de una generación a otra mediante la máquina epigenética de encendidos y apagados de genes. El impacto de la hambruna había sido captado por los genes en los óvulos y el espermia y la memoria de ese suceso había sido transmitida y afectada a los nietos de las siguientes generaciones. Nuevos aportes en el campo de las evidencias en la transmisión epigenética de información medioambiental que podía influir en el desarrollo de enfermedades a generaciones sucesivas fueron señaladas por Anway et al (2005)

“Aunque numerosos factores ambientales influyen y promueven la aparición de enfermedades en adultos (como la nutrición y el estrés), esta revisión se centra en los disruptores endocrinos, ya que este grupo de compuestos ambientales están presentes en la mayoría de las personas en su vida diaria en sociedad. Los disruptores endocrinos son sustancias químicas ambientales que afectan la función del sistema endocrino imitando o bloqueando las acciones de las hormonas, alterando la señalización hormonal o interrumpiendo la producción de hormonas. La interrupción endocrina puede tener consecuencias profundas debido al papel crucial que tienen las hormonas en el desarrollo” (Anway, 2005: 1467)³.

En otro orden de cosas, en un estudio aplicado a hijos de mujeres que se encontraban en las Torres Gemelas o cerca de ellas, en la ciudad de Nueva York, que experimentaron el atentado del 11 de septiembre de 2001, arrojaron evidencia de que dicha situación de extremo estrés se traspasó de las madres a los hijos mediante rutinas de encendido y apagado de los genes ante un estresante estímulo medioambiental, cuyas consecuencias pueden también expresarse en más de una generación (Yehuda et al, 2005) . Se constató que aquellas mujeres que estaban en su último trimestre de embarazo en el momento del ataque tenían niveles más bajos de la hormona cortisol, que ayuda a sobreponerse al estrés. Sus

³Traducción del autor.

hijos también nacieron con bajos niveles de cortisol, lo cual indica que eventos tensionantes durante el último trimestre de embarazo de la madre pueden cambiar la habilidad para enfrentarse al estrés de sus descendientes. Parece ser que cambios ambientales durante el embarazo (al menos durante ciertos períodos del embarazo) pueden transmitirles alteraciones genéticas a los hijos. El ejemplo descrito en materia de los efectos del atentado a las Torres gemelas, abre la posibilidad de estudiar los efectos intergeneracionales de desastres naturales y de la polución (Dretske, 1988).

Epigenética y espacialidad humana

La geografía aborda desde su fundación el estudio del espacio geográfico (Harvey, 1983) y la descripción, análisis y explicación de la espacialidad humana, tópico cuya presencia fue incrementándose al alero del llamado *giro cultural* en las ciencias sociales (Claval, 1999), concretamente en el paradigma de la teoría social (Alexander, 1988; 1989; Baert, 2002) y en la geografía como tal (Claval, 2002).

Coincidiendo con el paso de las posturas deterministas a las posibilistas, la geografía se dividió en escuelas (Capel, 1981; Harvey, 1983; Ortega Varcárcel, 2000) o tradiciones (Pattison, 1964), que fueron construyendo un corpus teórico que evolucionó desde teorías que supeditaban el actuar humano individual y colectivo a las características del espacio geográfico en el cual se desarrollaban las culturas (Bourdieu, 1991) a otras que relativizaban las influencias climáticas y naturales (Febvre, 1955) enfatizando la libertad humana de elección entre diversas posibilidades y los resultados de la creatividad (Nates, 2011) e inventiva de los seres humanos a través del tiempo (Archer, 1995).

La teoría social recurrió al espacio y a la espacialidad como conceptos estructuradores para la producción de nuevas miradas y explicaciones, transformándolos en categorías del análisis sociológico, político, antropológico, económico, histórico y geográfico, ya sea de manera parcelada (Alexander, 1989) o desde la interdisciplinarietà (Soja, 1989). Junto a la geografía, se produjo entonces una especie de *rearticulación epistemológica del espacio*, a la que se sumaron los paradigmas de la sustentabilidad del desarrollo, la crisis ecológica contemporánea (Santos, 1998), la *deuda ecológica* (Leff, 2002). A todas ellas habría que sumar los planteamientos ya comentados desde la biología, con lo cual se produjo, desde diversas fuentes, una relectura de las viejas teorías acerca de las relaciones ser humano – sociedad – medioambiente, y de la espacialidad, entendida como las formas y magnitud de las influencias del entorno en el ser

humano y las dinámicas de la interacción entre los individuos, sus agregaciones sociales y con la naturaleza (Hanson y Pratt, 1995).

En virtud de la evolución descrita, espacio y espacialidad adquirieron el estatus de categorías metafísicas con independencia relativa con respecto a la materialidad y que devienen de las definiciones de realidad cultural e históricamente construidas.

En la actualidad, la mayor parte de las tradiciones y escuelas geográficas coinciden en comprender a la espacialidad como un atributo adaptativo que permite la producción de conocimiento del entorno que rodea a los sujetos y a las colectividades, equivalente a un *saber sobre el espacio* (Ortega Varcárcel, 2000). Como el espacio geográfico aglutina sujetos y objetos en relación, la espacialidad es el atributo mediante el cual los seres humanos interactúan con ese espacio y una medición del nivel y calidad tanto de las conductas adaptativas como de las transformaciones tanto de los sujetos como del medio que los acoge.

Todos los procesos sociales son también espaciales (y viceversa), por lo que generan a partir de potenciales gravitacionales, una geometría específica. Cotidianamente expresamos tales geometrías en conceptualizaciones como *atraer inversiones, expulsar población, polos de desarrollo, fuerzas centrífugas del mercado*, entre otras. Estas se comportan como curvaturas sujetas por tensores que las pliegan o expanden (y con ello al espacio geográfico). Tradicionalmente la geografía ha reconocido como tensores a las lógicas productivas, disposición de recursos naturales susceptibles de ser transformados e incorporados al mercado, concentraciones de población, migraciones, difusión de innovaciones tecnológicas, procesos de urbanización producidos por implosiones y explosiones, entre otras. La epigenética agrega a los tensores originales factores intergeneracionales asociados a la herencia, esto es, la posibilidad de que la espacialidad operante pueda estar también supeditada a fórmulas relacionales ser humano – sociedad – medio pretéritas que quedan registradas en el perfil genotípico de los descendientes. Además, incorpora a la espacialidad factores intrageneracionales, al dirigir la reflexión a procesos medioambientales actuales que puedan marcar genéticamente a individuos generando efectos en las generaciones sucesivas. Por ejemplo, el estrés asociado a la experiencia de un terremoto u otro tipo de eventos naturales de gran magnitud, pueden marcar a individuos cuyas madres se hayan encontrado en un estado avanzado de gravidez cuando ocurrió el suceso, tal como lo demostró Yehuda a propósito de un evento catastrófico. Por lo anterior, se hace necesario considerar la dimensión museológica – patrimonial – testamentaria de las respectivas espacialidades que

se incorporarían, según la epigenética, al comportamiento de las generaciones a modo de registro genético – histórico de tensores y sus respectivas curvaturas que ya no existen o no operan con la vitalidad que lo hicieron.

La epigenética nos da luces acerca de transformaciones internas y externas de las curvaturas; incorporamos entre las deformaciones internas a las prácticas sociales que ligan a individuos y sociedades al entorno, que como vimos, pueden estar influidas epigenéticamente, tales como el deseo, la memoria, la imaginación, diversas racionalidades operantes, entre otras. Respecto a las transformaciones externas, podrían tener algún grado de influencia epigenética los discursos referidos a la realidad y al espacio, los respectivos códigos visuales, la respuesta a fenómenos tales como las guerras, hambrunas, eventos socio naturales u otros capaces de alterar sustancialmente la geograficidad de una generación al alterarse recíprocamente medioambiente y sociedad (Tuan, 1977).

Conclusiones (¿hacia dónde avanzar?)

En virtud de los planteamientos de la epigenética, se releva la importancia de las condiciones medioambientales no sólo para las generaciones presentes, sino también para las futuras. La constatación anterior abre oportunidades para la investigación geográfica, especialmente en materia del análisis, explicación y recomendaciones para superar problemáticas relacionadas con la justicia espacial (Soja, 2014) y la justicia ambiental (Martínez Alier, 2008). Esto, por cuanto existen importantes montos de población urbana y rural, especialmente en el Tercer Mundo, expuestos a altos niveles de contaminación, problemas con su dieta alimenticia, exposición a diversas formas de estrés, por ejemplo, laboral, financiero, social, ecológico (Tuan, 2003; Yehuda et al, 2005).

El medio, entonces, puede producir alteraciones sobre la topografía del paisaje genético y, consecuentemente, sobre la evolución de la célula en proceso de diferenciación (Slack, 2002). Dichas alteraciones puede que no se expresen en el sujeto u organismo, pero también es posible que se proyecten en el fenotipo de sus descendientes o en el desarrollo de procesos cerebrales (Perner, 1994; Pinker, 2001), en las lógicas de percepción (Tuan, 1977; Merleau-Ponty, 1985), y representación del medio (Perner, 1994; Maturana, 1995).

Los estudios medioambientales provenientes de diversas ciencias y disciplinas, incluyendo a la geografía, han abordado el estudio de las posibles consecuencias de los problemas ambientales contemporáneos sobre las

generaciones futuras (Martínez Alier, 2008), pero desde una perspectiva intergeneracional asociada al daño ambiental o ecológico, la pérdida de bienes o recursos naturales, la depredación de los ecosistemas, transformaciones severas de los hábitats, sustentabilidad del desarrollo, entre otros aspectos; la epigenética suma a este tipo de análisis, la reflexión acerca de los efectos biológicos de problemas socioambientales que enfrentan determinadas sociedades, sobre la espacialidad u otras características de sus descendientes (Bird, 2007).

La investigación en epigenética ha abierto una serie de posibilidades al estudio de las relaciones ser humano medio, especialmente en la geografía, que como ya afirmamos, es desafiada a replantearse las formas como tradicionalmente ha enfocado y dado respuesta a este tipo de problemáticas, incorporando la gran cantidad de nuevos enfoques que surgieron en las ciencias naturales tras el descubrimiento del genoma humano.

La geografía puede aportar a la búsqueda de una mayor justicia espacial en las condiciones productivas, de distribución y/o acceso de determinados productos a los grupos sociales con el fin de mejorar las expectativas de vida presentes y futuras asociadas a las prácticas alimenticias. Surgen nuevas argumentaciones basadas en los descubrimientos de la epigenética para profundizar la descripción y análisis de áreas o regiones contaminadas, zonas de sacrificio, sectores con alta vulnerabilidad socio ambiental, con el fin de aminorar los impactos intra e intergeneracionales de este tipo de eventos.

Bibliografía

ADAMS, R., BURDON, R., CAMPBELL, A. Y SMELLIE, R. (1980). *Bioquímica de los ácidos nucleicos de Davidson*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.

AFFICHARD, J. Y FOUCAULD, J.B. (Eds.) (1992). *Justice sociales et inégalités*. París: Esprit.

ALEXANDER, J. (1988). El Nuevo Movimiento Teórico. *Estudios Sociológicos*, VI(17), p. 259-307.

ALEXANDER, J. (1989). *Las teorías sociológicas después de la Segunda Guerra Mundial*. Barcelona: Gedisa.

- ANWAY, M., CUPP, A., UZUMCU, M. & SKINNER, M. (2005). Epigenetic transgenerational actions of endocrine disruptors and male fertility. *Science*, 5727(308): 1466-1469.
- ARCHER, K. (1995). A Folk Guide to Geography as a Holistic Science. *Journal of Geography*, 94(3): 404 - 411.
- BAERT, P. (2002). *La teoría social en el siglo XX*. Madrid: Alianza.
- BELL, J. Y SPECTOR, T. (2011). A twin approach to unraveling epigenetics. *Trends Genetics*, 27(3): 116-125.
- BIRD, A. (2007). Perception of epigenetic. *Nature*, 447(5913): 396-398.
- BOURDIEU, P. (1991). *El sentido práctico*. Madrid: Taurus.
- CANETO, C. (2000). *Geografía de la percepción urbana*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- CAPEL, H. (1981). *Filosofía y ciencia en la geografía contemporánea. Una introducción a la geografía*. Barcelona: Editorial Barcanova S.A.
- CLAVAL, P. (1999). Los fundamentos actuales de la geografía cultural. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 34: 25-40.
- CLAVAL, P. (2002). El enfoque cultural y las concepciones geográficas del espacio. *Boletín de la A.G.E.*, 34: 21-39.
- DOUGLAS, M. (1998). *Estilos de pensar. Ensayo sobre el buen gusto*. Barcelona: Gedisa.
- DRETSKE, F. (1988). *Explaining Behavior: Reasons in a World of Causes*. Cambridge: MIT Press-Bradford Books.
- ELIAS, N. (2000). *The civilizing process*. London: Blackwell Publishers.
- ESSEX, M., BOYCE, W. T., HERTZMAN, C., LAM, L., ARMSTRONG, J., NEUMANN, S. & KOBOR, M.S. (2013). Epigenetic Vestiges of Early Developmental Adversity: Childhood Stress Exposure and DNA Methylation in Adolescence. *Child Development*, 84(1): 58-75.

FEBVRE, L. (1955). *La tierra y la evolución humana*. México D.F.: UTEHA.

FEIL, R. (2006). Environmental and nutritional effects on the epigenetic regulation of genes. *Mutation Research*, 600(1-2): 46-57.

FRAGA, M.F., BALLESTAR, E., PAZ, M.F., ROPERÓ, S., SETIEN, F., BALLESTAR, M.L., HEINE-SUÑER, D., CIGUDOSA, J.C., URIOSTE, M., BENÍTEZ, J., BOIX-CHORNET, M., SÁNCHEZ-AGUILERA, A., LING, C., CARLSSON, E., POULSEN, P., VAAG, A., STEPHAN, Z., SPECTOR, T.D., WU, Y.Z., PLASS, C. & ESTELLER, M. (2005). Epigenetic differences arise during the lifetime of monozygotic twins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(30): 10604-10609.

GOLDBERG, A., ALLIS, C. D. & BERNSTEIN, E. (2007). Epigenetics: A Landscape Takes Shape. *Cell*, 128(4): 636-638.

GOODY, J. (1995). *Cocina, cuisine y clase*. Barcelona: Gedisa Editorial.

HANSON, S. Y PRATI, G. (1995). *Gender, work and space*. New York: Routledge.

HARVEY, D. (1983). *Teorías, leyes y modelos en Geografía*. Madrid: Alianza Editorial.

JABLONKA, E. Y LAMB, M. (1995). *Epigenetic inheritance and evolution: The Lamarckian dimension*. Oxford: Oxford University Press.

JABLONKA, E. Y LAMB, M. (2002). The changing concept of epigenetics. *Annals of the New York Academy of Science*, 981: 82-96.

JABLONKA, E. Y LAMB, M. (2005). *Evolution in four dimensions*. Cambridge: MIT Press.

JOHNSON, S. (2007). *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Madrid: Editorial Turner.

LEFF, E. (2002). *Saber ambiental. Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. México D.F.: Siglo XXI Editores.

LOWENTHAL, D. (1961). Geography, experience and imagination: towards a geographical epistemology. *Annals of the Association of American Geographers*, 51(3): 241-260.

- MACÍAS, K., ZAZUETA-NOVOA, V., MENDOZA-MACÍAS, C., RANGEL-SERRANO, Á. Y PADILLA-VACA, F. (2008). Epigenética, más allá de la Genética. *Acta Universitaria*, 18(1): 50-56.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (1994). *De la economía ecológica al ecologismo popular*. Barcelona: Icaria Editorial S.A.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (2008). Conflictos ecológicos y justicia ambiental. *Papeles*, 103: 11-27.
- MATURANA, H. (1995). *Biology of self-consciousness*. En G. Tratteur (Ed). *Consciousness: distinction and reflection*. Nápoles: Editorial Bibliopolis: 145-175.
- MERLEAU-PONTY, M. (1985). *Fenomenología de la percepción*. Barcelona: Planeta-Agostini.
- MORANGE, M. (2002). The relations between genetics and epigenetics. A historical point of view. *Annals of the New York Academy of Science*, 981: 50-60.
- MORGADO, I. (2012). *Cómo percibimos el mundo Una exploración de la mente y los sentidos*. Barcelona: Ariel S.A.
- NATES, B. (2011). *La territorialización del conocimiento*. Barcelona: Anthropos Editorial.
- ORTEGA VARCÁRCCEL, J. (2000). *Los horizontes de la Geografía. Teoría de la Geografía*. Barcelona: Ariel.
- PATTISON, W. (1964). The four traditions of Geography. *Journal of Geography*, 63(5): 211-216.
- BEDREGAL, P., SHAND, B., SANTOS, M. J. Y VENTURA-JUNCÁ, P. (2010). Aportes de la epigenética en la comprensión del desarrollo del ser humano. *Revista Médica de Chile*, 138(3): 366-372.
- PEMBREY, M.E., BYGREN, L.O., KAATI, G., EDVINSSON, S., NORTHSTONE, K., SJÖSTRÖM, M., GOLDING, J. & ALSPAC STUDY TEAM. (2006). Sex-specific, male-line transgenerational responses in humans. *European Journal of Human Genetics*, 14(2): 159-166.

- PERNER, J. (1994). *Conocer la mente representacional*. Buenos Aires: Ediciones Paidós.
- PINKER, S. (2001). *Cómo funciona la mente*. Barcelona: Destino.
- RODENHISER, D. Y MANN, M. (2006). Epigenetics and human disease: translating basic biology into clinical applications. *Canadian Medical Association Journal*, 174(3): 341-348.
- RUSSO, V., MARTIESSEN, R. & RIGGS, A. (1996). *Epigenetic mechanisms of gene regulation*. Woodbury: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- SANTOS, B. (1998). *De la mano de Alicia. Lo social y lo político en la postmodernidad*. Bogotá: Siglo del Hombre Editores.
- SLACK, J. (2002). Conrad Hal Waddington: the last Renaissance biologist? *Nature Review. Genetics*, 3(11): 889-895.
- SLACK, J. (2005). *Essential developmental biology*. Londres: Wiley - Blackwell.
- SMITH, R. & SMITH, T. (2005). *Ecología*. Madrid: Pearson Educación.
- SOJA, E. (1989). *Postmodern geographies: the reassertion of space in critical social theory*. London: Verso.
- SOJA, E. (2014). *En busca de la justicia espacial*. Valencia: Tirant Humanidades.
- TAMAYO-ORREGO, L. (2013). Ontogenia y fisonomía del paisaje epigenético: un modelo general para explicar sistemas en desarrollo. *Acta Biológica Colombiana*, 18: 3-17.
- TUAN, Y-F. (1977). *Space and place: the perspective of experience*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- TUAN, Y-F. (2003). *Escapismo. Formas de evasión en el mundo actual*. Barcelona: Península.
- TURKHEIMER, E., HALEY, A., WALDRON, M., D'ONOFRIO, B. & GOTTESMAN, I. (2003). Socioeconomic status modifies heritability of IQ in young children. *Psychological Science*, 14(6): 624-628.

WADDINGTON, C. (1942). The epigenotype. *International Journal of Epidemiology*, 41(1): 18-20.

WADDINGTON, C. (1966). *Principles of development and differentiation*. New York: The Macmillan Company.

WALLACE, D. (2010). Bioenergetics and the epigenome: interface between the environment and genes in common diseases. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 16(2): 114-119.

YEHUDA, R., ENGEL, S., BRAND, S., SECKL, J., MARCUS, S. & BERKOWITZ, G. (2005). Transgenerational effects of posttraumatic stress disorder in babies of mothers exposed to the World Trade Center attacks during pregnancy. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 90(7): 4115-4118.

Recibido: 18 de marzo de 2018

Aceptado: 23 de abril de 2019