



Rev Mex Med Forense, 2025, 10(1): 10-19

ISSN: 2448-8011

Alteraciones tafonómicas del ADN *post mortem*
Artículo Original

Taphonomic alterations of post-mortem DNA

Fuentes-Ballester, Diana Laura ¹

Recibido 5 ago 2024, aceptado 3 sep 2024

1. Centro de Identificación Humana de Jalisco, Instituto Jalisciense de Ciencias Forenses, México.

Corresponding autor: Diana Laura Fuentes Ballester, diana.fballester@gmail.com

Revista Mexicana de Medicina Forense y Ciencias de la Salud.
Editorial Universidad Veracruzana
Periodo enero-junio 2025

RESUMEN

Este estudio analiza la degradación del ADN en restos post-mortem y el papel de los factores tafonómicos ambientales en la degradación comparando ciertas condiciones ambientales en modelos representativos de ratas. Los restos fueron monitoreados durante una semana para detectar cambios en la integridad del ADN sometiéndose a condiciones de sumersión, clima variable y enterramiento. Los resultados mostraron que las muestras expuestas a condiciones climáticas variables sufrieron los peores daños en el ADN debido a las altas precipitaciones de la zona, seguidas de las muestras enterradas, y, por último, las muestras que fueron tratadas con sumersión, las cuales fueron las mejor conservadas. Estos hallazgos resaltan el valor de incorporar los factores ambientales en los estudios genéticos para garantizar la preservación del ADN y un perfil genético preciso.

Palabras Clave: Factores tafonómicos, ADN, electroforesis, degradación

SUMMARY

This study analyzes DNA degradation in post-mortem remains and the role of environmental taphonomic factors in this degradation by comparing certain environmental conditions using representative rat models. The remains were monitored for one week to detect changes in DNA integrity under conditions of submersion, variable climate, and burial. The results showed that samples exposed to variable climatic conditions suffered the most severe DNA damage due to high precipitation in the area, followed by buried samples, with submerged samples showing the best preservation. These findings highlight the importance of incorporating environmental factors into genetic studies to ensure DNA preservation and accurate genetic profiling.

Keywords: Taphonomic factors, DNA, electrophoresis, degradation

INTRODUCCIÓN

Todos los seres vivos, incluidos los seres humanos, tenemos una molécula llamada ADN en nuestras células, la cual contiene toda la información genética que nos define como individuos y nos distingue del resto de personas. El conocimiento de esta molécula ha permitido utilizarla primordialmente en el área forense para facilitar las distinciones, determinar relaciones biológicas, e identificar personas a partir de la generación de un perfil genético.

Un perfil genético no es más que un patrón de segmentos cortos de ADN ordenados que se convierten en un código numérico, de este ADN el 50% proviene de nuestra madre y el 50% de nuestro padre, haciendo que cada individuo posea un perfil genético único, en donde el análisis se logra por lectura de los segmentos según ciertos marcadores específicos. [9]

En comparación con otros compuestos, las moléculas orgánicas como el ADN, suelen ser más inestables y cuando las células mueren, el proceso de reparación se pierde, lo que provoca daños primarios que generan una degradación. [3]

La estructura del ADN es como una cadena, decimos que la calidad es buena cuando la cadena está terminada, es decir, que no hay roturas. En cambio, decimos que el ADN se degrada cuando se daña la cadena, se daña la estructura o se rompe, dificultando la lectura de los marcadores y la obtención de un perfil. [9]

La degradación de la molécula de ADN depende no sólo de aspectos del proceso químico al morir la célula, sino también de otros aspectos del medio, estas alteraciones son denominadas procesos tafonómicos, los cuales, afectan a los restos cadávericos después de la muerte y son responsables de provocar un daño post mortem. [10]

La velocidad y el grado de descomposición del material genético de un resto va a depender de estos diversos factores tafonómicos endógenos y exógenos, en donde las características del ambiente en el que se encuentra depositado un resto pueden acelerar o ralentizar el proceso de degradación [1], así las condiciones que más afectan a la degradación del ADN serán las variables del medio ambiente, entre ellas la temperatura, la humedad, el pH o la presencia de ciertos compuestos en el suelo.

En este estudio se examinaron las diferentes acciones modificantes de las variables tafonómicas en restos cadávericos utilizando muestras representativas de ratas (*Rattus Noverigus*) que se sometieron a diversos tratamientos para el análisis de la afectación directa al ADN, valorando la posible obtención de un perfil genético.

El objetivo fue identificar las acciones modificantes de los factores tafonómicos medioambientales que generan algún nivel de degradación del ADN en muestras biológicas Post-Mortem.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio de restos humanos cadávericos en torno a la comprensión de los procesos de descomposición y la influencia del medio ambiente en estos, se realizó a partir de la simulación con ratas (*Rattus norvegicus*) para estudiar determinadas condiciones, tomando en cuenta las variables de temperatura, pH, humedad, pluviosidad y tiempo como variables tafonómicas que afectan a los indicios biológicos post-mortem.

El estudio se llevó a cabo en un área controlada al aire libre, en una zona específica de suelo de tierra con textura compacta con un pH de 8.0, la zona recibió una precipitación media de 38 mm desde el día 20 de Julio al día 27 de Julio, una Temperatura Máxima promedio de 29°C, Temperatura Mínima de 15°C, Temperatura Media de 20°C, Velocidad media del viento de 8.9 km/h y Rachas máximas de viento 51.9 km/h. [6]

Para el inicio del análisis las ratas fueron anestesiadas éticamente en un recipiente hermético colocando torundas de algodón saturadas con éter en el fondo del contenedor (aproximadamente 2-3 ml por rata), se cerró la tapa para evitar la fuga de vapores, y dentro del contenedor se introdujeron cada una de las ratas, permitiendo la inhalación de los vapores de éter para perder la conciencia, y después de mantenerla por 10-15 minutos para asegurar la muerte, se verificó la ausencia de signos vitales.

El primer indicio biológico representado como el indicio R1 fue tratado con la variable tafonómica de la humedad que puede afectar a un cuerpo en una muerte por sumersión completa, esta se aplicó introduciendo al indicio biológico sin vida en un contenedor lleno de agua, cerrado herméticamente y colocado en la zona pertinente; El segundo indicio denominado R2 se sometió a un tratamiento de condiciones climáticas variables al dejarlo expuesto sobre la superficie, en donde se observaron amplias condiciones de precipitación y temperatura variable en el ambiente; Y, en el tercer indicio R3 se buscó observar los posibles efectos modificantes de una inhumación, por lo cual este fue enterrado a 24 cm de profundidad, siendo cubierto por la tierra del medio. Todos los indicios biológicos fueron afectados por las condiciones mencionadas por un periodo de una semana. [Figura 1]



Figura 1. Disposición experimental de ratas enterradas en diferentes condiciones. Nota: Elaboración Propia.

RESULTADOS

Las ratas, fueron exhumadas una semana después, durante la exhumación se registraron detalladamente las condiciones del suelo y los cambios en los restos. Los resultados iniciales mostraron diferencias significativas en los patrones de descomposición según las condiciones ambientales [Figura 2], de estos restos exhumados se tomó una muestra de hisopado interior y dos muestras de tejido de aproximadamente 1x1 mm² en tubos de ensayo.



Figura 2. Disposición experimental de ratas enterradas en diferentes condiciones 1 semana después. 1) R1; 2) R2; 3) R3. Nota: Elaboración Propia.

Posterior a la toma de muestra se ejecutó el protocolo de extracción, purificación y electroforesis de ADN para poder observar el ADN presente en cada muestra. Para realizar la extracción se colocaron los hisopos y muestras de tejido previamente macerado en tubos eppendorf estériles con una solución de Buffer de extracción y lisis TBE 15 X [Tris/Borato/EDTA] y una solución Tampón de extracción [20 SDS/20 Proteinasa K/ 20 NaOH], las muestras se incubaron a 56°C durante 48 horas para desnaturalizar, degradar y precipitar las proteínas para así facilitar la liberación del ADN. [5]

Posterior a las 48 horas, las muestras se centrifugaron a 13,500 rpm durante 5 min recogiendo el sobrenadante donde se encontraba el ADN; Este sobrenadante fue tratado con 500 µL de etanol frío al 70% transfiriendo la mezcla a una columna de purificación de ADN para eliminar las impurezas, realizando lavados con buffer de lavado y elución. [4]

Una vez extraído y purificado el ADN, el análisis de degradación se realizó por Electroforesis en Gel de Agarosa al 1.2% mezclando 5 µL de muestra de ADN con 3 µL de buffer de carga y cargando las muestras en los pocillos del gel previamente realizado, aplicando un voltaje de 100 V durante 1.5 horas hasta que los fragmentos de ADN se separan adecuadamente logrando la visualización de bandas. [Figura 3]

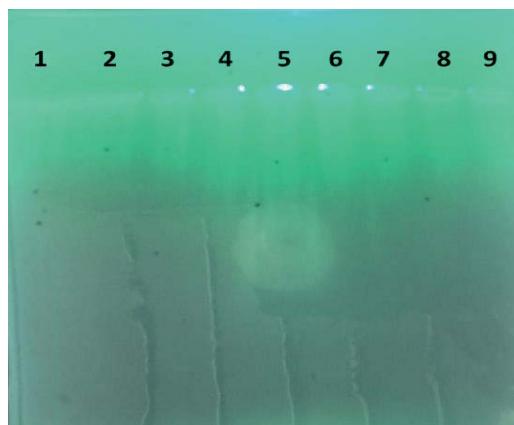


Figura 3. Electroforesis en gel de agarosa de muestras de ADN obtenidas de restos cadavéricos Los carriles 1-3 corresponden al indicio biológico R1, carriles 4-6 al indicio biológico R2 y los carriles 7-9 al indicio biológico R3. Nota: Elaboración Propia

DISCUSIÓN

Primeramente, se caracterizaron individualmente las alteraciones tafonómicas de cada indicio biológico; El indicio biológico denominado R1, sometido a condiciones de sumersión, sufrió de una fermentación butírica por gases causando hinchazón en el tejido, a pesar de esta condición, este indicio se recuperó con casi nula fauna cadavérica y una conservación mucho más amplia del tejido.

El indicio biológico R2 estuvo expuesto sobre la tierra a condiciones climáticas variables, las cuales influyeron considerablemente en la degradación del cuerpo, ya que, debido a la gran precipitación de lluvias que se observó en la zona en los días posteriores al entierro, se generó una gran humedad y en consecuencia, una aceleración del proceso de putrefacción con porciones en adipocira y otras llegando a la fase de licuefacción, desprendiendo el tejido rápidamente; Esto permitió la exposición de los restos óseos y una amplia colonización de fauna cadavérica en el tejido remanente, en donde colonizó en su mayoría larvas de moscas del género *Phormia regina*.

El indicio biológico R3, con condiciones correspondientes a una inhumación, sufrió de una descomposición activa con procesos de fermentación butírica e hinchazón, así como una colonización de larvas de mosca, manteniendo el tejido preservado en su mayoría.

En referencia al análisis de la degradación de ADN, el gel de agarosa evidenció las diferencias en torno a la conservación del material genético según el tratamiento de cada indicio, en este se observa a las muestras del Indicio R2 expuesto a condiciones climáticas variables como el que más sufrió de una degradación de material genético, el Indicio R3 fue el siguiente más afectado y por último el Indicio R1 presentando una conservación más notable del ADN.

La primera variable de análisis es la temperatura; Las bajas temperaturas durante el almacenamiento de los restos promueven una mejor conservación, ya que ralentizan la velocidad de las reacciones químicas. Por el contrario, la presencia de altas temperaturas puede causar deshidratación y acelerar el proceso de hidrólisis del ADN. [7] Todos los indicios en este análisis se expusieron a una temperatura media constante de 20°C, donde no se observó una aceleración ni ralentización significativa de la degradación del ADN, debido a que la temperatura permaneció en un rango medio durante todo el periodo de análisis.

En torno al pH del suelo, los suelos ácidos ($\text{pH} < 7$) aceleran la descomposición de tejidos blandos debido a la alta actividad microbiana y enzimática, mientras que los suelos alcalinos ($\text{pH} > 7$) reducen de la tasa de descomposición de tejidos blandos debido a la menor actividad microbiana [2].

Esto lo podemos observar con la preservación más notable del tejido del Indicio R3, en comparación de indicios, ya que el pH del suelo del análisis correspondiente fue de 8.0, el indicio R2 permaneció expuesto y con una degradación considerable, y el Indicio R3 conservó mucho más el tejido con una disminución considerable de actividad microbiana y un aumento de la calidad del ADN.

Por último, el factor más relevante del análisis fue la pluviosidad y la humedad, en el estudio un factor que se tomó mucho a consideración fueron las notables precipitaciones de lluvia en la zona, generando una inundación del medio y en consecuencia una humedad muy presente, la rata más afectada por este proceso fue la R2 en donde los resultados indicaron que la lluvia tiene un efecto acelerador en el proceso de descomposición, ya que se observa una descomposición más rápida, caracterizada por un aumento en la actividad bacteriana y en la formación de líquidos de putrefacción. Además, la alta humedad favoreció la proliferación de insectos descomponedores, como larvas de mosca. [11] En contraste, los cuerpos en áreas menos afectadas por la lluvia mostraron signos de descomposición más lenta, con una preservación relativa de los tejidos en comparación con los expuestos a condiciones húmedas, de igual manera, la lluvia excesiva causó el lavado de restos óseos y tejidos, dispersándose y complicando la recuperación y análisis forense, y en consecuencia, se obtiene el perfil más degradado. [4]

CONCLUSIÓN

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las condiciones de almacenamiento y el tiempo transcurrido desde la muerte al realizar investigaciones de ADN en entornos forenses. Comprender los procesos de degradación tafonómica es crucial para el desarrollo de métodos que garanticen la conservación de varios tipos de evidencia en diferentes condiciones ambientales.

REFERENCIAS

1. Barrio-Caballero PA. Revisión de métodos de extracción de ADN a partir de restos óseos en el laboratorio forense. Rev Esp Med Pierna [Internet]. 2013;39(2):54–62. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.reml.2012.11.002>
2. Carter DO, Yellowlees D, Tibbitt M. Cadáver decomposition in terrestrial ecosystems. Naturwissenschaften. 2007;94(1):12-24.

3. Garzón L. La degradación natural del ADN: el concepto de edad térmica [Internet]. Seaf.es. [citado el 13 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.seaf.es/images/seaf/papers/vol23/final%20v%202023%2006%20065-076.pdf>
4. Gill-King H. Chemical and ultrastructural aspects of decomposition. In: Haglund WD, Sorg MH, editors. Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains. Boca Raton: CRC Press; 1997. p. 93-108.
5. González N, Rodríguez N, Torres W, O'Callaghan J. Protocolo sencillo para la extracción de ADN genómico de tejido de oreja del ratón y la rata, usando la enzima bromelina. Revista Científica [Internet]. 2011;XXI(3):233-238. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=95918239007>
6. Histórico del Clima en Aguascalientes - Meteored [Internet]. Meteored.mx | Meteorizado. [citado el 30 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.meteored.mx/aguascalientes/historico>
7. Rahi GS, Adams JL, Yuan J, Devone D-J-N, Lodhi KM. Whole human blood DNA degradation associated with artificial ultraviolet and solar radiations as a function of exposure time. Forensic Sci Int [Internet]. 2021;319(110674):110674. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110674>
8. Sánchez CRH. Efecto del Tiempo y la Temperatura en la Viabilidad del ADN en la Perfilación Genética de Muestras de Sangre. Dialnet [Internet]. 2014 [citado el 13 de julio de 2024];IV(V enero-julio 2015):13. Disponible en: <http://file:///C:/Users/SURFACE%20GO/Downloads/10.pdf>
9. Solla LP. Interpretando la Genética Forense [Internet]. 2017 [citado el 13 de julio de 2024]. Disponible en: https://senseaboutscience.org/wp-content/uploads/2019/04/SaS-ForensicGenetics-spanish-translation-WEB-spreads-13_03-amend.pdf
10. Tafonomía forense, el estudio de los procesos post mortem [Internet]. Funeral Natural. [citado el 13 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.funeralnatural.net/articulos/tafonomia-forense-el-estudio-de-los-procesos-post-mortem>

11. Toloza-Leones y César Valverde-Castro A. Tafonomía forense: estudio experimental del proceso de descomposición de un cuerpo sumergido en una ciénaga del Caribe colombiano. Intropica [Internet]. 2022 [citado el 13 de julio de 2024];17. Disponible en: [http://file:///C:/Users/SURFACE%20GO/Downloads/Dialnet-TafonomiaForenseEstudioExperimentalDelProcesoDeDes-8917151%20\(1\).pdf](http://file:///C:/Users/SURFACE%20GO/Downloads/Dialnet-TafonomiaForenseEstudioExperimentalDelProcesoDeDes-8917151%20(1).pdf)



**Revista Mexicana de Medicina Forense
y Ciencias de la Salud**