

Análisis de imágenes RGB para incrementar el valor probatorio de los estudios comparativos del pelo

Castillo Medina Sebastián Guadalupe¹✉, Díaz Cortés Erika², Morales Otal Adriana Margarita³

¹Laboratorio de Patología Forense, Coordinación General de Investigación Forense y Servicios Periciales de la Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México. México.

²Laboratorio de Patología Forense, Coordinación General de Investigación Forense y Servicios Periciales de la Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México. México.

³Área de Neurociencias, Departamento de Biología de la Reproducción, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Ciudad de México. México.

✉ sgcm1951@yahoo.com.mx

Datos del artículo

Cita

Castillo-Medina SG,
Díaz-Cortés E,
Morales-Otal AM.
Análisis de imágenes
RGB para incrementar
el valor probatorio de
los estudios
comparativos del
pelo. ReCiF, Año 4;
Núm.2:31-41

Editor

Vicente Torres Zúñiga

Revisión por pares:

Dos

Recibido

25/abril/2025

Aceptado

28/julio/2025

Publicado

30/octubre/2025

Creative Commons

CC-BY-NC-SA 4.0

Internacional

Resumen

Este estudio tiene como objetivo vincular el análisis de imágenes digitales con el estudio comparativo forense del pelo humano. Para ello, se digitalizaron imágenes microscópicas del tallo piloso correspondientes a la muestra problema (MP) y a la muestra testigo (MT), utilizando el modelo de color RGB. A través del sistema de análisis Ks 400, se obtuvieron los valores de los píxeles en los canales rojo, verde y azul, los cuales fueron procesados en una hoja de cálculo para generar histogramas en forma de polígonos de frecuencia y diagramas de dispersión.

Los resultados permitieron evaluar estadísticamente la relación entre ambas muestras, demostrando que el análisis de imágenes RGB constituye un procedimiento objetivo, cuantificable y no destructivo que puede fortalecer los estudios forenses capilares. Este enfoque ofrece una alternativa metodológica que complementa las técnicas tradicionales de comparación microscópica.

Asimismo, se destaca la necesidad de validar esta metodología frente a nuevas tecnologías emergentes, como cámaras digitales de alta resolución, microscopios con iluminación LED y sistemas automatizados de análisis de imagen. El presente estudio describe un enfoque objetivo para la medición del color en pelos humanos de tonalidad natural, aplicado en cuatro casos forenses que ilustran su utilidad y potencial probatorio.

Palabras clave: Modelo de color RGB, muestra problema, muestra testigo, histograma de frecuencia, imágenes digitales, diagramas de dispersión, comparación de imágenes digitales.

Abstract

This study aims to integrate digital image analysis into the forensic comparative examination of human hair. To achieve this, microscopic images of the hair shaft from the problem sample (MP) and the reference sample (MT) were digitized using the RGB color model. Through the KS 400 analysis system, pixel values for the red, green, and blue channels were obtained and processed in a spreadsheet to generate frequency polygon histograms and scatter plots.

The results enabled a statistical evaluation of the relationship between both samples, demonstrating that RGB image analysis is an objective, quantifiable, and non-destructive procedure that can enhance forensic hair examinations. This approach offers a methodological alternative that complements traditional microscopic comparison techniques.

Furthermore, the need to validate this methodology against emerging technologies is emphasized, including high-resolution digital cameras, LED-illuminated microscopes, and automated image analysis systems. This study presents an objective framework for measuring hair color in naturally pigmented human samples, applied across four forensic cases that illustrate its utility and evidentiary potential.

Keywords: RGB color model, problem sample, control sample, frequency histogram, digital images, scatter diagrams, digital image comparison.

Introducción

El pelo humano es una valiosa evidencia en los laboratorios de criminalística. Diversos investigadores han aportado estrategias para obtener información útil en los procesos de identificación y comparación forense.

Uno de los primeros desafíos en el examen del pelo es abordar sus variantes morfológicas. Los parámetros macroscópicos incluyen la longitud, el contorno, la curvatura y la forma. Por otro lado, los parámetros microscópicos abarcan la fase de crecimiento del bulbo piloso, el diámetro del tallo, la distribución de la cutícula, el color y la densidad de los pigmentos, así como la presencia de formaciones nodulares y fusiformes corticales, la formación distribución y diámetro del canal medular, y las características de la punta en el tercio. Cuando el bulbo se encuentra en fase anágena o catágena, el pelo es adecuado para estudios de DNA nuclear y mitocondrial (1, 2, 3, 4).

El color del pelo, tanto en su aspecto macroscópico como microscópico, es una característica relevante en los estudios comparativos realizados por peritos forenses. Este color depende de la melanina, un pigmento que se presenta en dos formas químicas: eumelanina (de tonalidad parda a negra) y feomelanina (de tonalidad amarilla a rojiza) (3).

Las variantes cromáticas del pelo incluyen incoloros, rubio, café dorado, café intermedio, café oscuro, castaño claro, intermedio y oscuro, rojo claro, intermedio y oscuro, café rojizo en distintas intensidades, negro y colores artificiales (4, 5, 6).

La observación microscópica del color puede verse influida por factores como el ajuste de la iluminación, el uso de filtros, el contraste y la habilidad del observador para distinguir las tonalidades. Por ello, algunos investigadores han desarrollado atlas de imágenes del pelo que permiten asignar nombres estandarizados a las muestras, facilitando su comparación cromática (4).

Deedrick ha señalado la falta de evaluaciones cuantitativas confiables que permitan establecer asociaciones estadísticas en el estudio comparativo de imágenes (5). Sin embargo, en los últimos 20 años los avances en la tecnología digital y software de análisis de imagen han abierto nuevas posibilidades para cuantificar el color capilar. El uso de modelos de color permite detectar diferencias sutiles que escapan al ojo humano (6).

Mills y cols. Combinó en las imágenes digitales el diámetro del cabello y el número de píxeles de color rojo, verde y azul (RGB) para realizar sus comparaciones microscópicas: el muestreo lo realizó en 10 campos aleatorios de la corteza, excluyendo la cutícula y la médula. Utilizó software de análisis discriminante y encontró una validación de 18 de 20 participantes que se asignaron correctamente al participante del que procedían (7). Funes y Bridge estudiaron mediante microscopia digital las características de textura cortical, la densidad y el color. La distribución del color de los pelos utilizó el modelo de color RGB y el cálculo de la relación de densidad del pigmento utilizando el modelo en color tono-saturación-valor. Encontró que el color y la textura presentaban un mejor potencial de diferenciación a 20 mm del extremo proximal del pelo (8).

Con el fin de reforzar el estudio comparativo del pelo, se adoptó el modelo de color RGB porque reproduce de forma directa la percepción humana del color en imágenes microscópicas. Al descomponer cada imagen en sus componentes rojo, verde y azul, se migran los datos a valores cuantificables de píxeles (0-255 tonos) sin alterar la muestra, lo que mejora la objetividad en la comparación de parámetros morfológicos y cromáticos además facilita el análisis estadístico y la representación gráfica, así como la representación gráfica de diferencias mínimas entra las MP y la MT.

Materiales y Métodos:

Población de estudio: A partir del archivo del laboratorio de Patología Forense, perteneciente a la Coordinación General de Investigación Forense y Servicios Periciales de la Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México, se obtuvieron cuatro estudios comparativos de pelos representativos en los que resultaron positivos en la confronta de la MP con la MT, y fueron elaborados de manera colegiada por dos examinadores con más de 15 años de experiencia en el análisis y dictaminación de comparativos capilares. Desde el año 2004, se incorporó al dictamen el análisis microscópico mediante histogramas en su modalidad de polígonos de frecuencia, lo cual permite comparar la MP y la MT con mayor precisión y visualizar la relación entre ambas variables.

Preparación de las muestras: Los pelos fueron colocados individualmente sobre portaobjetos de vidrio y fijados mediante resina sintética al 60 % disuelta en xileno. Posteriormente, se colocaron cubreobjetos de vidrio sobre cada muestra, asegurando una adecuada adhesión y preservación para su

observación microscópica. Este procedimiento permitió mantener la integridad estructural del tallo piloso y garantizar condiciones óptimas para el análisis comparativo.

Las muestras fueron examinadas utilizando un microscopio de comparación modelo FS 4000, diseñado específicamente para el análisis de fibras y pelos, marca Leica. Este instrumento permitió la observación simultánea de la muestra problema (MP) y la muestra testigo (MT) bajo condiciones controladas de iluminación y aumento. Los resultados obtenidos de cada cabello fueron registrados sistemáticamente en una base de datos para su posterior procesamiento digital y análisis estadístico.

Captura de imágenes digitales: Se seleccionaron imágenes microscópicas del tallo piloso correspondientes a la MP y la MT. La adquisición se realizó con una videocámara CCD-RGB Sony, acoplada a un microscopio Carl Zeiss Axioplan 2 imaging, equipado con un objetivo 40x y la iluminación se realizó con luz halógena constante (12V 100 W), complementado con un filtro de temperatura de color de 3200-5500 K.

Para garantizar la calidad y consistencia del registro, se eligieron zonas del tercio proximal del tallo piloso que presentaban condiciones óptimas de limpieza y ausencia de artefactos (1.3 mm desde el bulbo piloso). En todas las muestras se mantuvieron constantes los parámetros de iluminación, centrado, orientación transversal y contraste, asegurando así la estandarización de las imágenes obtenidas.

Las imágenes digitales (640 x 480 px) se procesaron en el sistema KS 400 (Kontron Elektronik, GmbH, Alemania) instalado en un equipo con procesador Intel Pentium II y tarjeta digitalizadora Matrox. Para el análisis se empleó el modelo RGB, separando los canales rojo, verde y azul para asegurar condiciones semejantes para la MP y la MT. Durante el análisis se utilizó el modelo de color RGB para separar los canales rojo, verde y azul y cuantificar cada tomo (0-255).

Las imágenes microscópicas obtenidas durante el análisis fueron almacenadas en formato TIFF (Tagged Image File Format), debido a sus ventajas técnicas en el contexto forense. Este formato permite conservar la calidad original de la imagen sin aplicar compresión destructiva, lo cual es fundamental para preservar la fidelidad de los detalles morfológicos y cromáticos del tallo piloso. Además, el formato TIFF es compatible con la mayoría de los sistemas de análisis digital, incluyendo el software KS 400 y plataformas estadísticas como IBM SPSS, lo que facilita su procesamiento, visualización y análisis cuantitativo. Su capacidad para manejar imágenes de alta resolución lo convierte en una opción óptima para estudios comparativos que requieren precisión en la medición de valores RGB.

Análisis estadístico: Se analizaron los datos correspondientes a cuatro casos comparativos de cabello en los que se observó semejanzas entre las muestras MP y MT. La comparación digital entre ambas se realizó mediante el uso de histogramas RGB generados por el software de análisis, los cuales permitieron calibrar el centrado entre los histogramas de la MP y la MT, asegurando que ambas compartieran las mismas condiciones de análisis.

Los datos obtenidos fueron exportados a Microsoft Excel, donde se generaron histogramas y polígonos de frecuencia comparativos entre MP y MT. En estos gráficos, el eje X representa los tonos de color (rango 0-255), mientras que el eje Y indica el número de píxeles correspondientes a cada componente RGB.

Dado que la base de datos de píxeles RGB de cada imagen digital, tanto de las MP como de las MT, no presentó una distribución normal, se procedió a emplear el coeficiente de correlación de rangos

de Spearman, utilizando el software IBM SPSS Statistics 27. Asimismo, se calcularon los valores de promedio y desviación estándar correspondientes a los cuatro casos estudiados (10,11).

Resultados

De los cuatro casos analizados, los casos uno y tres corresponden a pelos de la región craneal, el caso dos a la región axilar, y el caso cuatro a la región púbica. Para cada uno se realizó una medición comparativa del color en píxeles RGB entre la muestra problema (MP) y la muestra testigo (MT), identificadas visualmente mediante el uso de un microscopio de comparación.

Al cuantificar los valores de los píxeles en sus componentes rojo, verde y azul, se generaron histogramas en forma de polígonos de frecuencia para cada tonalidad de ambas muestras. Las tonalidades se representaron en el eje horizontal (X), mientras que el número de píxeles se ubicó en el eje vertical (Y), correspondiente a cada componente de color. Las curvas RGB de las MP se resaltaron en sus colores rojo, verde y azul, y de las MT se marcaron en color negro para facilitar la visualización de su cercanía y correspondencia con sus homólogas respectivas.

Los diagramas de dispersión permitieron contrastar, por separado, los valores de los píxeles correspondientes a cada canal cromático (rojo, verde y azul). En estos gráficos, el eje X representó los valores de la MP y el eje Y los de la MT, evidenciando asociaciones positivas, lineales y ascendentes para cada canal: rojo (A), verde (B) y azul (C), en los cuatro casos analizados. Cabe destacar que los polígonos de frecuencia obtenidos no presentaron distribuciones normales.

Mediante el software IBM SPSS Statistics, versión 27, se aplicó el coeficiente de correlación bivariado de Spearman para evaluar la relación estadística entre los tonos rojo, verde y azul de las muestras comparadas en cada caso. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Canal de color	Caso 1 Cabello	Caso 2 Axilar	Caso 3 Cabello	Caso 4 Púbico	Promedio (p)	Desviación estándar
ROJO	0,98	0,99	0,92	0,99	0,97	0,0291
VERDE	0,96	0,99	0,86	0,89	0,925	0,0522
AZUL	0,86	0,97	0,87	0,63	0,8325	0,1245

Tabla 1. *Coefficientes de Correlación de Spearman por canal RGB en los cuatro casos.*

El coeficiente de correlación de Spearman fue estadísticamente significativo en todos los canales RGB, con un nivel de significancia bilateral de 0.01 ($p < 0.001$). Esto confirma que el grado de asociación entre las variables MP y MT fue positivo, lineal y ascendente en cada caso analizado, reforzando la fiabilidad del enfoque digital aplicado en los estudios comparativos capilares.

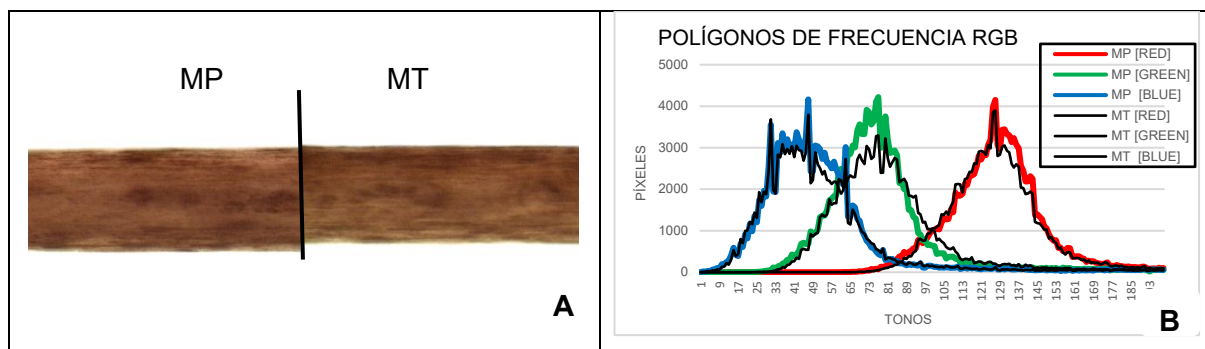


Figura 1. Caso Uno. A. imágenes microscópicas de pelos de la cabeza, correspondientes a la MP y la MT, observadas a 400 aumentos. Muestra las imágenes microscópicas confrontada entre la MP y la MT (400 aumentos). B. Polígonos de frecuencia de los valores de los canales rojo, verde y azul (RGB) de la MP comparados con los valores correspondientes de la MT (representados en color negro para ilustrar la relación entre ambas variables).

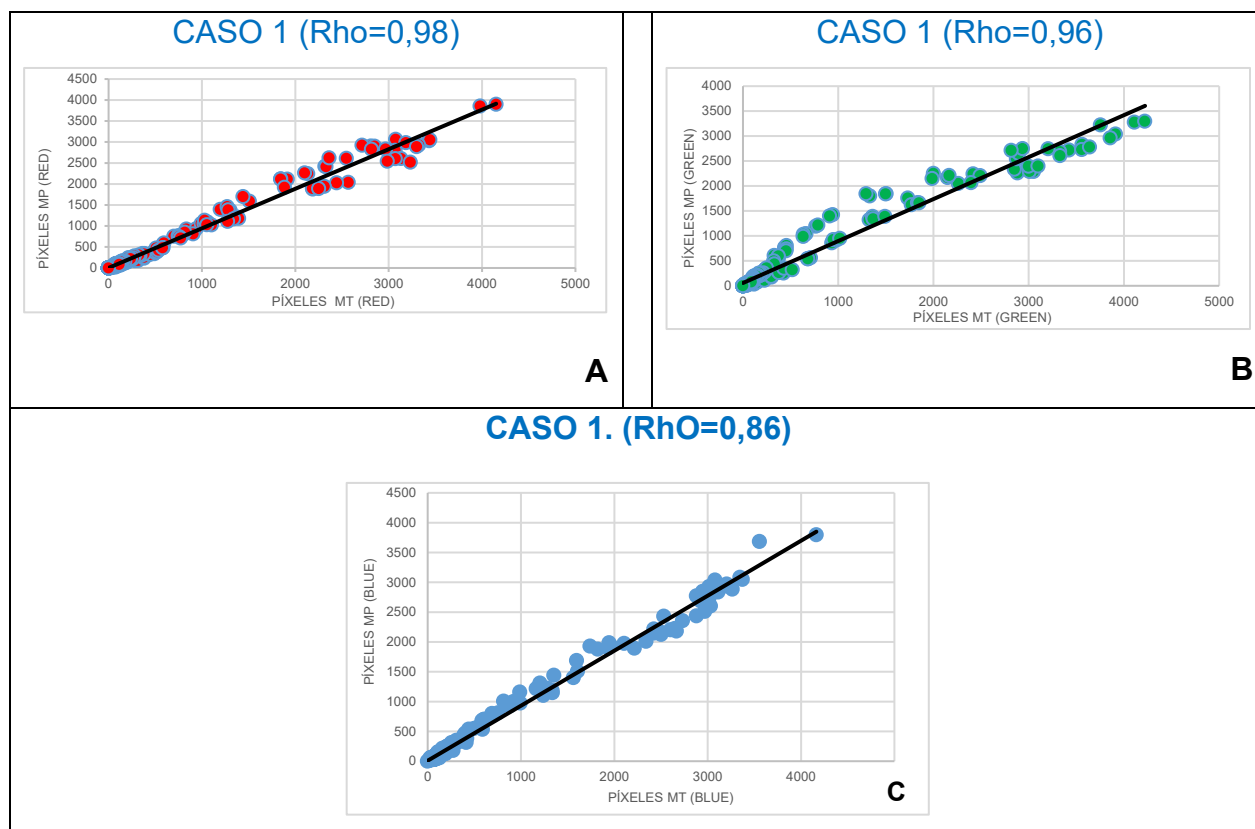


Figura 2. Caso Uno. Diagramas de dispersión que evidencian una asociación positiva, lineal y ascendente entre los valores de los píxeles de la MP y la MT en los canales rojo, verde y azul (Figuras A, B y C, respectivamente). El coeficiente de correlación de Spearman es significativo al nivel 0.01 (bilateral), con valores de $p < 0.001$: $\rho = 0.98$ (rojo), $\rho = 0.96$ (verde) y $\rho = 0.86$ (azul).

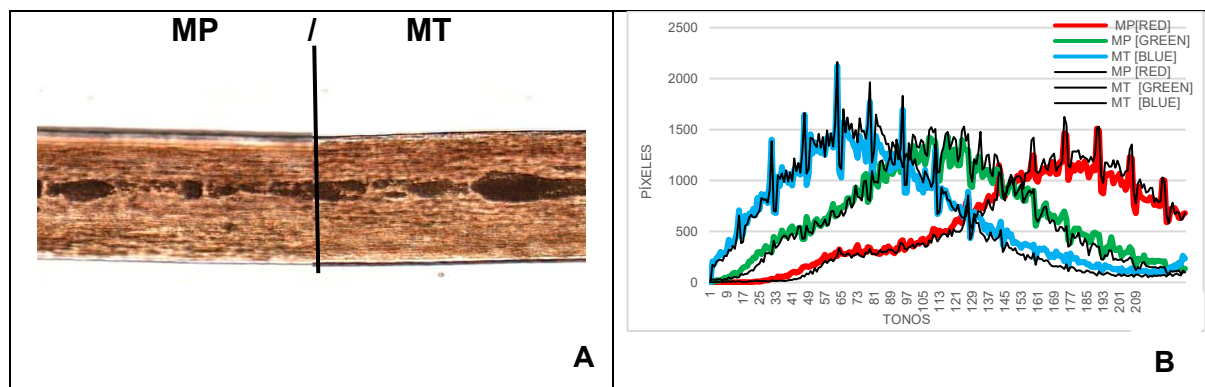


Figura 3. Caso Dos. A. Imágenes microscópicas de pelos de la región axilar correspondientes a la MP y la MT, observadas a 400 aumentos. B. Polígonos de frecuencia de los valores de los canales rojo, verde y azul (RGB) de la MP, comparados con los valores correspondientes de la MT. Los datos de la MT se representan en color negro para ilustrar la relación entre ambas variables.

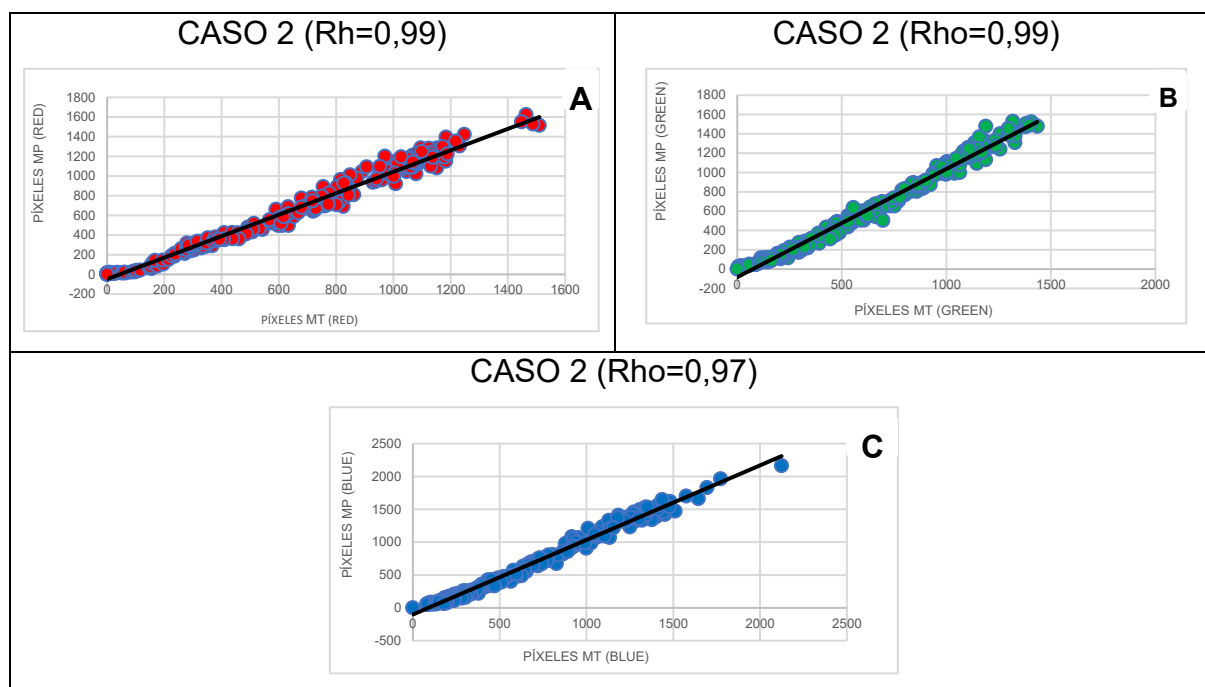


Figura 4. Caso Dos. Diagramas de dispersión que muestran una asociación positiva, lineal y ascendente entre los valores de los píxeles de la MP y la MT en los canales rojo, verde y azul (Figuras A, B y C, respectivamente). El coeficiente de correlación de Spearman es significativo al nivel 0.01 (bilateral), con $p < 0.001$: $\rho = 0.99$ (rojo), $\rho = 0.99$ (verde) y $\rho = 0.97$ (azul).

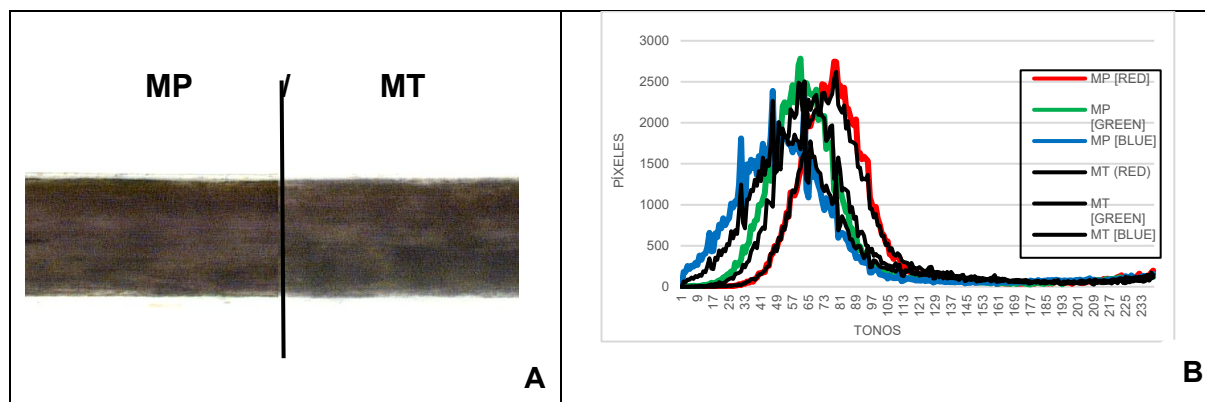


Figura 5. Caso Tres. A. Imágenes microscópicas de pelos de la región de la cabeza correspondientes a la MP y la MT, observadas a 400 aumentos. B. Polígonos de frecuencia de los valores de los canales rojo, verde y azul (RGB) de la MP, comparados con los valores correspondientes de la MT. Los datos de la MT se representan en color negro para ilustrar la relación entre ambas variables.

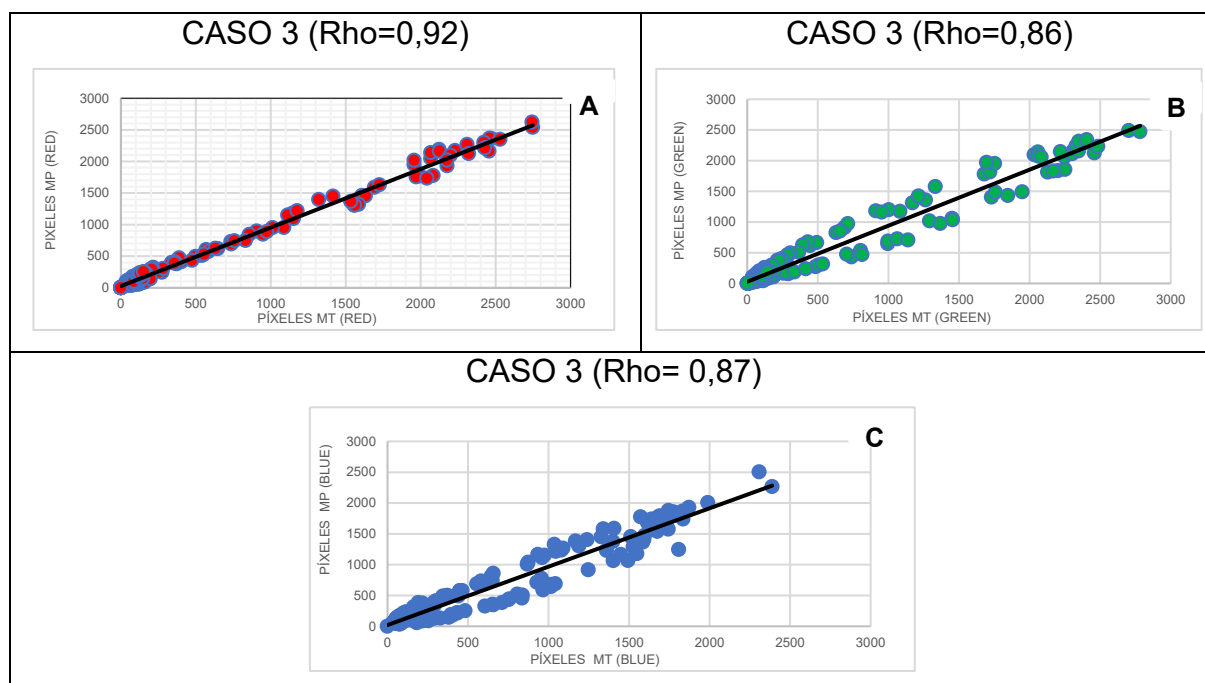


Figura 6. Caso Tres. Diagramas de dispersión que muestran una asociación positiva, lineal y ascendente entre los valores de los píxeles de la MP y la MT en los canales rojo, verde y azul (Figuras A, B y C, respectivamente). El coeficiente de correlación de Spearman es significativo al nivel 0.01 (bilateral), con $p < 0.001$: $\rho = 0.92$ (rojo), $\rho = 0.86$ (verde) y $\rho = 0.87$ (azul).

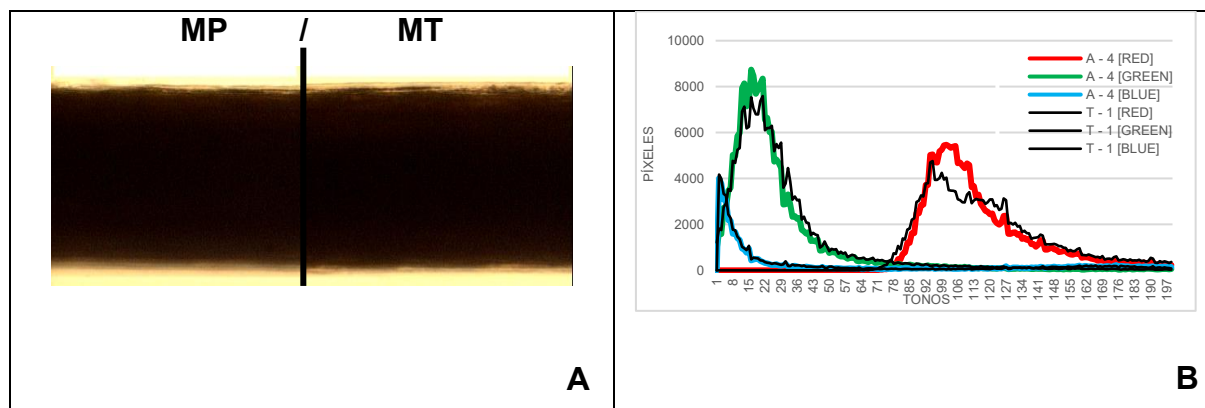


Figura 7. Caso Cuatro. A. Imágenes microscópicas de pelos de la región púbica correspondientes a la MP y la MT, observadas a 400 aumentos. **B.** Polígonos de frecuencia de los valores de los canales rojo, verde y azul (RGB) de la MP, comparados con los valores correspondientes de la MT. Los datos de la MT se representan en color negro para ilustrar la relación entre ambas variables.

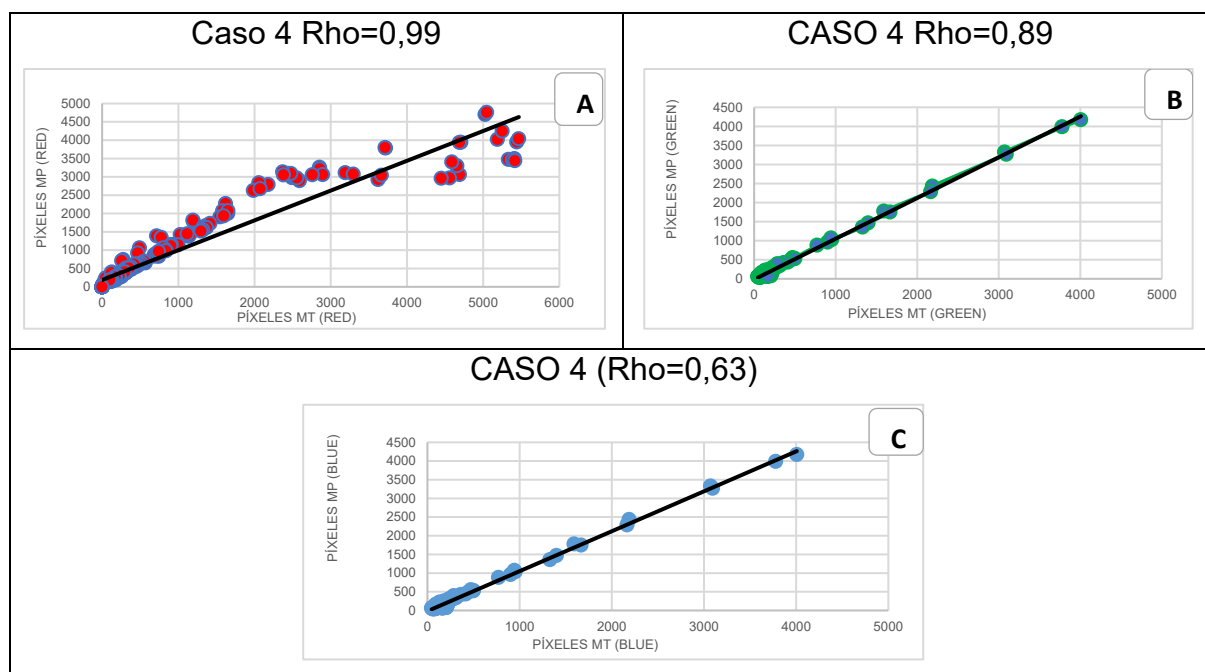


Figura 8. Caso Cuatro. Diagramas de dispersión que muestran una asociación positiva, lineal y ascendente entre los valores de los píxeles de la MP y la MT en los canales rojo, verde y azul (Figuras A, B y C, respectivamente). El coeficiente de correlación de Spearman es significativo al nivel 0.01 (bilateral), con $p < 0.001$: $\rho = 0.99$ (rojo), $\rho = 0.89$ (verde) y $\rho = 0.63$ (azul).

Discusión:

En el ámbito forense, los estudios comparativos del pelo constituyen una herramienta fundamental para la identificación y vinculación de individuos con escenas del crimen. Con el objetivo de garantizar la fiabilidad y consistencia de estos análisis, se ha desarrollado una norma internacional que establece los lineamientos para la normalización y estandarización de los procedimientos en laboratorios forenses. Esta guía contempla aspectos como los métodos de examen capilar, el uso de instrumentos, la recolección de muestras, la definición de la terminología especializada, la formación técnica del personal, los estándares instrumentales, las prácticas de seguridad, salud y medio ambiente, así como el reconocimiento de las limitaciones inherentes a la disciplina (4).

Una de las principales debilidades identificadas en las técnicas actuales de comparación microscópica del pelo es la escasez de métodos cuantitativos aplicables al análisis capilar (8). Como alternativa, la incorporación de imágenes digitales ofrece un enfoque complementario que permite al examinador aplicar criterios cuantificables para evaluar el grado de asociación entre las estructuras microscópicas del tallo piloso de la muestra problema (MP) y la muestra testigo (MT).

El análisis de imágenes mediante el modelo RGB permite obtener valores numéricos que proporcionan una medición más objetiva, precisa y reproducible. Esta metodología incrementa el valor probatorio del análisis, posibilita una evaluación estadística del color del pelo y contribuye a la formalización de los dictámenes forenses. No obstante, esta técnica debe considerarse como un recurso cuantitativo auxiliar; por lo tanto, el examinador debe complementar dicho análisis con todos los estudios pertinentes disponibles, incluyendo el análisis de ADN. Además, es fundamental considerar las limitaciones que pueden afectar la calidad de la MP, tales como la presencia de contaminantes ambientales, un montaje inadecuado, el uso de cosméticos, o situaciones particulares como muestras provenientes de gemelos monocigóticos.

Es importante señalar que los pelos correspondientes a la MP y a la MT no están obligados a presentar una imagen microscópica completamente coincidente. Esta variabilidad se explica, por un lado, por las distintas circunstancias en las que fueron recolectadas ambas muestras, y por otro, por la heterogeneidad natural que existe entre los pelos de una misma región anatómica, como ocurre con los cabellos. No obstante, la presencia de características morfológicas con un grado razonable de semejanza entre ambas muestras puede contribuir significativamente al fortalecimiento del análisis comparativo. Estas coincidencias no implican una correspondencia absoluta, pero sí aumentan la probabilidad de que los pelos compartan un origen común, lo cual resulta relevante para sustentar el valor probatorio del dictamen pericial.

Adicionalmente, se ha determinado que el tercio proximal del tallo piloso representa la región más adecuada para la obtención de imágenes digitales, debido a la mayor estabilidad en las características morfológicas y cromáticas. Tal como lo señala Mills en su estudio, el color y la textura del cabello presentan un mejor potencial de diferenciación a una distancia de aproximadamente 20 mm del extremo proximal del pelo (7), lo que refuerza la importancia de estandarizar esta zona como referencia en los análisis comparativos capilares.

Conclusión

La incorporación de esta metodología en los estudios comparativos del pelo contribuye significativamente a mejorar la percepción del color y proporciona una base numérica objetiva, reproducible y no destructiva. Mediante el uso de una base de datos con los valores de los píxeles RGB, es posible realizar evaluaciones gráficas y estadísticas que enriquecen el análisis forense capilar y fortalecen el valor probatorio de los dictámenes. No obstante, resulta imprescindible validar este procedimiento a través de investigaciones adicionales que permitan establecer su confiabilidad y aplicabilidad en distintos contextos forenses. Asimismo, es necesario evaluar su desempeño frente a nuevas alternativas tecnológicas emergentes, como el uso de cámaras digitales de alta resolución, microscopios con iluminación LED y softwares automatizados, entre otros recursos que podrían optimizar aún más la precisión y eficiencia del análisis capilar.

Referencias

1. Jiménez-Navarro, R. Estudio criminalístico de pelos y fibras. de Cuadernos del Cuadernos Instituto Nacional de Ciencias Penales. 1981: 7. México.
2. Rico, MF. Galán, GG. Pelos y fibras. Metodología Científica. Cuadernos del Cuadernos Instituto Nacional de Ciencias Penales. 1987. México.
3. Ogle, RR, Fox, MJ, Atlas of Human Hair Microscopic Characteristics. CRC Press. 1999. p 37-39. ISBN 0-8463-8134-7.
4. Standard Guide for Forensic Examination of hair by Microscopy. ASTM Committee E30 on Forensic Sciences. Subcommittee E30.01 on Criminalistics. Current edition approved. 2022. Published October 2022. DOI: 10.1520/ E3316-22.
5. Deedrick, D. W. Microscopy of hair. Part 1. A practical guide and manual for human hairs, Forensic Science Communications [Online]. 2024; 6(1). Jun 2004. <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/microscopy-hair-part-1-practical-guide-and-manual-human-hairs>
6. Funes, DSH, Bonilla, K, Baudelet, M, Bridge, C. Morphological and chemical orofiling for forensic hair examination: A review of cuantitative methods. Forensic Science International. 2023;346. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111622>
7. Mills M, Bonetti J, Brettell T, Quarino, L. Differentiation of human hair by colour and diameter using light microscopy, digital imagining and stadistical análisis. J. Microsc. 2017, September 2017. pp 1-14. DOI: 10.1111/jmi.12646.
8. Funes BS, DSH, Bridge, C. Analysis of hair color and textura for forensic examiners: J. Forensic Siences 2021;66(2): 520-533. DOI: 10.1111/1556-4029.14640.
9. Academi Lab. Histograma de color. [Online]. Enciclopedia. Revisado el 7 de noviembre del 2024 <https://academia-lab.com/enciclopedia/histograma-de-color/> (2024).
10. Daniel, WW. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. 2016 Ed. Limusa 2016. ISBN 978-968-18-6164-3.
11. Martínez Ortega RM, Tuya Pendas LC, Martínez Ortega M, Pérez Abreu A, Cánovas AM. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. Rev haban cienc méd. 2009;8(2) Versión On- line ISSN 1729-619X.