Uso de la microespectrofotometría para la discriminación de fibras textiles en química forense: revisión sistemática

Autor
Haddy Andrés Ortiz Pedroza

Título por el que opta
Química Farmacéutica

Director
Yhors Alexander Ciro Monsalve

Grupo de Investigación
QUIBIO

Línea de Investigación
Desarrollos tecnológicos y biotecnológicos

Facultad de Ciencias Básicas
Química Farmacéutica
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026

IMPACTOS

Tabla 1. Impacto del trabajo de grado en diferentes dimensiones.

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Promoción de metodologías no destructivas de menor costo con un enfoque hacia una química verde.	Laboratorios de criminalística y laboratorios afines.
Responsabilidad social	Divulgación sobre el valor probatorio de las fibras textiles en investigaciones forenses.	Comunidad en general, departamentos de justicia gubernamental.
Científico	Aporta un escrito de revisión sistemática en donde se recolecta las metodologías actuales.	Comunidad académica y científica, centros de investigación pericial.
Indicadores de Gestión	Aporte de conocimiento valioso para toma de decisiones por departamentos de justicia gubernamental.	Jueces, policía, peritos, personal relacionado con departamentos de justicia gubernamental.
Tecnológico	Recopilación de tecnologías acopladas que aumenta el valor probatorio de las fibras textiles.	Industria de tecnología forense, organismos de investigación policial.
Técnico	Fortalecimiento de protocolo en el procesamiento de fibras textiles como material probatorio.	Peritos, analistas de evidencias, profesionales en ciencias forenses.
Ambiental	Divulgación de técnicas analíticas alineadas hacia la química verde.	Comunidad científica, laboratorios de criminalística, profesionales en ciencias forenses.
Social	Contribución a la certeza jurídica en la utilización de microespectrofotometría como técnica probatoria.	Ciudadanía en general, departamentos de justicia gubernamental.
Cultural	Redirección a una cultura de objetividad en bases técnicas no destructivas.	Comunidad forense, peritos, departamentos de justicia gubernamental.

USO DE LA MICROESPECTROFOTOMETRÍA PARA LA DISCRIMINACIÓN DE FIBRAS TEXTILES EN QUÍMICA FORENSE: REVISIÓN SISTEMÁTICA

Haddy Andres Ortiz Pedroza (haddy.ortiz00@usc.edu.co)

1Química y Biotecnología - QUIBIO, Programa de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La identificación de fibras textiles en química forense ha adquirido gran relevancia bajo el principio del intercambio de Locard, si bien persisten desafíos críticos relacionados con la subjetividad del análisis visual. Este factor ha dificultado la comparación objetiva de muestras, aunque idénticas bajo luz blanca, presentan firmas espectrales distintas. Por ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2005 y 2026, con el objetivo de analizar el uso de la microespectrofotometría (MSP) como técnica principal para la discriminación de fibras textiles, evaluando las tendencias y ventajas de la técnica. Para el desarrollo de esta metodología, se aplicaron los principios del protocolo PRISMA, que incluyó búsquedas en seis bases de datos científicas, además del uso del software Rayyan para la gestión y selección de artículos. Los principales hallazgos indican que la MSP UV-VIS presenta una sensibilidad excepcional, permitiendo la detección de colorantes en concentraciones extremadamente bajas. Asimismo, la aplicación de la primera derivada mediante el algoritmo de Savitzky-Golay, integrada con herramientas quimiométricas como el análisis de componentes principales y la regresión Lasso, permitió alcanzar un poder discriminatorio superior a 0,999 en fibras de algodón. Finalmente, se concluyó que el MSP se establece como el estándar instrumental objetivo para la discriminación de fibras, transformando la comparación de colores en un proceso cuantitativo con una sólida base estadística.

Palabras clave: *Análisis no destructivos, Cotejo en fibras textiles, Química Forense, valor probatorio.*

USE OF MICROSPECTROPHOTOMETRY FOR THE DISCRIMINATION OF TEXTILE FIBERS IN FORENSIC CHEMISTRY: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

The identification of textile fibers in forensic chemistry has gained significant relevance under the principle of Locard's exchange, although critical challenges still persist related to the subjectivity of visual analysis. This factor has hindered the objective comparison of samples that appear identical under white light but possess distinct spectral signatures. As a result, a systematic review of the scientific literature published between 2005 and 2026 was conducted, with the aim of analyzing the use of microspectrophotometry (MSP) as a primary technique for the discrimination of textile fibers, evaluating methodological trends and advantages. For the development of this methodology, the principles of the PRISMA protocol were applied, involving searches across six scientific databases, in addition to using the Rayyan software for article management and selection. The main findings indicate that UV-VIS MSP exhibits exceptional sensitivity, enabling the detection of dyes at extremely low concentrations. The application of the first derivative using the Savitzky-Golay algorithm, integrated with chemometric tools such as Principal Component Analysis and Lasso regression, made it possible to achieve a discriminative power greater than 0.999 in cotton fibers. Finally, it was concluded that MSP is established as the objective instrumental standard for fiber discrimination, transforming color comparison into a quantitative process with a solid statistical foundation.

Keywords: *Non-destructive analysis, Textile fiber comparison, Forensic Chemistry, Evidentiary value*

HIGHLIGHTS

- La utilización de protocolos en microespectrofotometría extendidos al rango de ultravioleta entre 240 y 380 nm resulta particularmente útil al momento de detectar agentes blanqueadores, aditivos y firmas químicas del textil, que en el rango visible serían indetectables lo que proporciona una medida más factible de alcanzar un valor discriminante de 0.999.

- El uso de tratamiento matemático en base a la primera derivada es fundamental en el análisis de resultados de absorbancia al proporcionar un mayor valor discriminante en la distinción de fibras metaméricas con perfiles visuales similares mejorando la resolución de los picos y su comparación objetiva.

- La microespectrofotometría con luz polarizada plana (MSP-PPL), cuenta con la cualidad de cuantificar el dicroísmo lineal en fibras textiles teñidas y pigmentadas, lo que permite diferenciar la unión del colorante con la zona amorfa de las fibras, siendo útil al momento del cotejar muestras identificas a la vista, pero con diferentes procesos de manufactura.

- La discriminación cuantitativa basada en la carga de colorante a través de microespectrofotometría demuestra su capacidad de distinguir entre fibras con el mismo colorante en base a su saturación y simetría de los picos y cambios en la curtosis.

1. INTRODUCCIÓN

Las fibras textiles constituyen uno de los materiales probatorios a nivel de trazas más importantes en la reconstrucción de eventos delictivos, siendo de elevado interés en caso de asesinatos y desaparición, su recolección y búsqueda en estos eventos es basada en el principio de intercambio de Locard en donde el contacto físico genera inevitablemente un intercambio de material microscópico (Mane & Devika, 2022). Este principio ha sido relevante para la química forense ya permite establecer conexiones entre sospechosos, victimas y lugares. Fundamentalmente cuando hay alta presencia de fibras específicas y únicas lo que eleva su valor probatorio en modelos probabilísticos (Marnane et al., 2006; Schnegg et al., 2018).

Al tratarse de un elemento probatorio de relación, debe velarse por su integridad en cadenas de custodias robustas capaces de garantizar la autenticidad desde su recolección hasta la presentación de resultados ante jueces (Marchal González, 2023). Las fibras textiles son una de las pocas fuentes de información que resisten en mayor medida condiciones adversas donde otros elementos como fluidos orgánicos que sean poseedores de ADN presentan una degradación severa que los inutilizaría como fuente de evidencia (Lepot et al., 2017). Esta persistencia técnica las convierte en muchos casos en el único testigo, que puede relacionar herramientas directivas tales como armas blancas con el daño que presenta la prenda de vestir de una víctima (Cammarota et al., 2019). En la práctica parcial, este elemento probatorio suele ser clasificado inicialmente según su origen; ya sea su origen sintético o natural, siendo estas fibras la de mayor complejidad al ser materiales metalizados o derivados de poliéster, lo que presenta el gran desafío analítico debido a la saturación de estas en la escena del análisis(Wąs-Gubała et al., 2021).

En análisis de espectrofotometría rutinarios que se les realizan a las fibras se logra determinar la morfología, diámetro y en algunos casos el tipo de polímero siendo útil en la determinación de cuerina o cueros artificiales (Sano & Suzuki, 2009). Siendo capaz esta técnica de determinar propiedades como la cristalización, para discriminar fibras de acrílico incoloras que morfológicamente seria indistinguibles (Causin et al., 2005). No obstante, esta técnica exige un alto rigor al momento del montaje, como el uso de placas de cuarzo en vez de las típicas de cristal, además de un medio de montaje específico, como lo es el Entellan New, esto con el fin de preservar la birrefringencia y propiedades únicas de cada fibra para realizar un cotejo con valor significativo (Wiggins & Drummond, 2007).

La limitación principal de las técnicas tradicionales como la microespectrofotometría se encuentra en la subjetividad del analista y la reducida especificidad analítica de mezclas de colorantes modernos (Goodpaster & Liszewski, 2009). Aunque siendo este mismo rasgo de color que permite la diferenciación entre fibras naturales de algodón. Las investigaciones relacionadas deducen que hay miles de prendas que son indistinguibles bajo una revisión visual humana, lo que delimita el valor discriminativo de la comparación ocular (Schnegg et al., 2018). Relacionado al fenómeno de metamerismo, el cual dicta que dos muestras pueden parecer técnicamente iguales bajo condiciones de iluminación contraladas, pero poseer firmas espectrales distintas, por lo que es necesario una recopilación de datos objetivos validos en procesos judiciales (Zięba-Palus & Trzcińska, 2012). Donde adicionalmente, un análisis morfológico tradicional no es capaz de diferenciar la composición de aditivos químicos y su alta cantidad de variantes en base al proceso de fabricación (Biermann, 2007).

Debido a las limitaciones antes mencionadas se ha optado por la utilización de la microespectrofotometría (MPS), lo que se ha vuelto un estándar a combinar la presión microscópica con la capacidad analítica de la espectrofotometría UV-VIS (Hu et al., 2020). Teniendo la ventaja de ser una técnica no destructiva lo que permite obtener resultados numéricos en medidas de absorbancia en fragmentos mínimos de fibras teñidas sin destruir la evidencia (Forster et al., 2017). Igualmente posee la capacidad de identificar las firmas electrónicas de grupos cromóforos lo que permite identificar el colorante principal más posible incluso en los casos que no se dispone estándares de comparación (Ziba-Palus & Ws-Gubała, 2011).

En variaciones avanzadas de la técnica se encuentra la incorporación del uso de herramientas matemáticas como cálculos de la primera derivada en los espectros de absorbancia obtenidos, lo que delimita los picos y facilita significativamente el cotejo con una menor subjetividad (Wiggins et al., 2007). De la misma manera, entre las técnicas emergentes se encuentra la microespectrofotometría con luz polarizada (MSP-PPL), siendo esta capaz de medir el dicroísmo lineal de los tintes, revelando la orientación molecular del tinte de dentro de las fibras (De Wael et al., 2012). Dándole importancia a estas técnicas emergentes debido a su alta capacidad de detalle para distinguir materiales específicos como fibras de poliéster en prendas de lana negra, que en la mayoría de los casos son indistinguibles en las fibras espectrales en el rango visible (Lunstroot et al., 2016).

La integración con otras técnicas complementarias a fortalecido un análisis a nivel de trazas, por ejemplo, los acoples con fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) con el fin de detectar catalizadores metálicos como Titanio, Antimonio y/o Manganeso utilizados como opacificantes y estabilizantes de color en materiales textiles (Takahara et al., 2021). Asimismo, la ultimación de espectrómetros portátiles en rango de infrarrojo cercano (NIR) es una técnica preliminar rápida que puede llegar a ser utilizada en la escena del crimen lo que ayuda a preservar el material probatorio dándole mayor valor a los análisis posteriores (Rashed et al., 2021). A pesar de estas innovaciones, las nuevas técnicas como son la Espectroscopia Raman de Transmisión (TRS) o DUVRS Espectroscopia Raman en el Ultravioleta Profundo; han demostrado tener igualmente limitaciones en las que se puede incluir la degradación de la muestra por fotoxidación al utilizar radiación UV Profunda (Anderson et al., 2023), por lo que se refuerza la utilización de microespectrofotometría UV-VIS en el ámbito forense sobre las técnicas con la limitante de degradación en la muestra.

La integración de métodos estadísticos avanzados y quimiométricos son también un gran salto en la clasificación de fibras. Algoritmos de aprendizaje automático y la utilización de regresión logarítmica permite una clasificación con una precisión superior al 96% en las mejores condiciones, lo que minimiza el error humano en la subjetividad (Sharma et al., 2024). Otras herramientas como el modelado independiente suave de analogías de clase (SIMCA) y el análisis de componentes principales (PCA) favorecen la comparación y discriminación de entre los subtipos de polímeros (Aljannahi et al., 2022). Por otra parte, la incorporación de técnicas de imagen hiperespectral ha permitido la visualización química selectiva de fibras cruzadas y mezclas complejas, transformando los datos analíticos en mapas de color demostrables (Chauhan et al., 2025; Zapata et al., 2022). Se debe tener en cuenta que la fiabilidad de estos modelos avanzados es altamente ligada a las condiciones ambientales a las que fueron sometidas las fibras, lo que llega ocasionar una disminución en las señales de los tintes y alterar el perfil óptico lo que dificulta la comparación con una muestra patrón (Bianchi et al., 2016).

Por lo que la presente revisión sistemática tiene como finalidad analizar la información científica disponible sobre el uso de las microespectrofotometría para la discriminación de fibras textiles útiles para la química forense. Se busca identificar las principales tendencias metodológicas en los rangos UV-VIS y los acoples técnicos, evaluando sus ventajas y limitaciones técnicas frente a fenómenos como la subjetivad analística y fotodecoloración además de determinar su aplicación en análisis criminalistas reales. A través de esta revisión, se presenta un marco con las novedades y metodologías recientes utilizadas para discriminar y cotejar este tipo de evidencia con el fin de apoyar la toma de decisiones analísticas y fortalecer la interpretación de la evidencia.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se trata de una revisión sistemática de literatura por lo que no hubo aplicación experimental, sino más bien se llevó a cabo un enfoque definido siguiendo las directrices planteadas por PRISMA 2021 (Page et al., 2021). Donde se utilizó el software RAYYAM para la gestión y depuración de referencias con el propósito de maximizar la identificación de publicaciones que de muestren la alta capacidad de las técnicas de microespectrofotometría para analizar, identificar, discriminar y aportar valor probatorio a las fibras textiles en el ámbito de la química forense.

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión:

- Artículos originales
- Artículos con Open Access
- Artículos en idioma inglés y/o español
- Estudios publicados entre 2005 y 2026
- Estudios en donde la microespectrofotometría fue utilizada como la técnica principal
- Estudios donde la muestra analizada fueron fibras o materiales textiles con valor para la química forense

Criterios de exclusión:

- Investigaciones no experimentales
- Artículos donde la técnica difiera de la microespectrofotometría
- Artículos de opinión, revisiones narrativas y editoriales

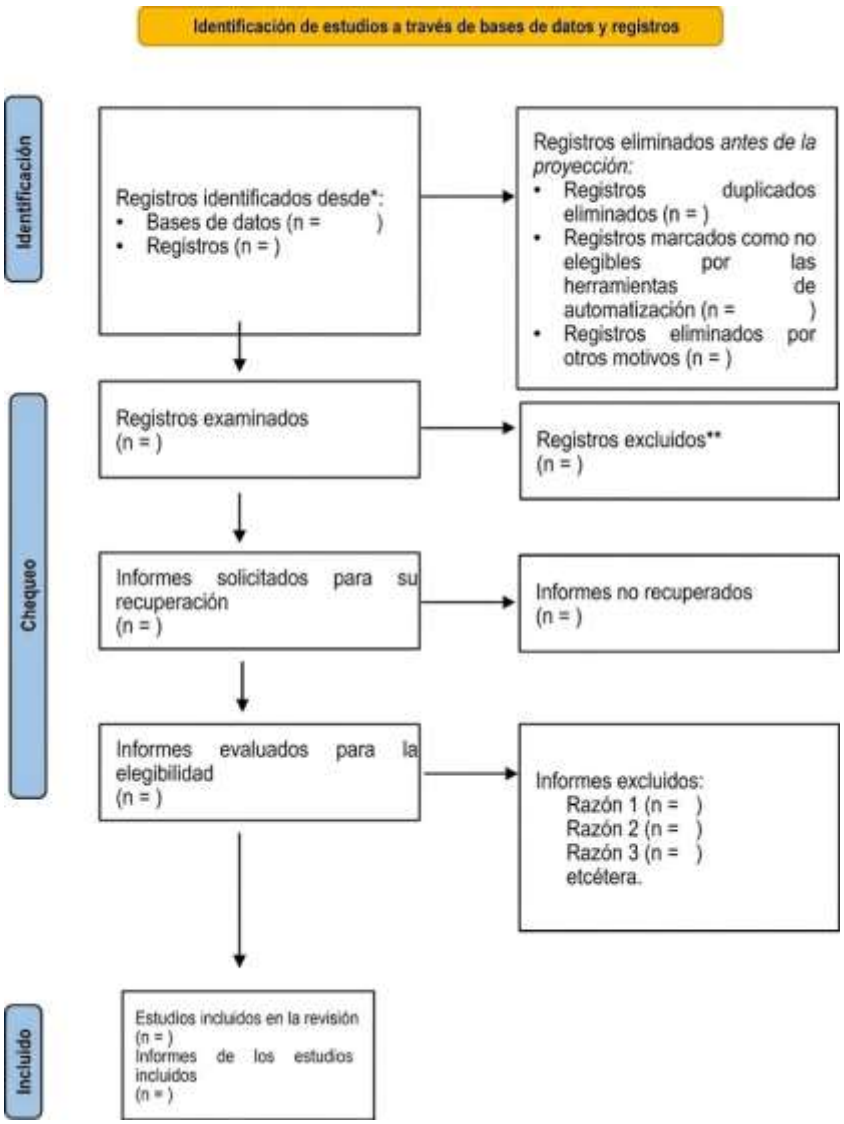
Por consiguiente, al tratarse de una revisión sistemática, se llevó a cabo una búsqueda en las bases de datos científicas Oxford University Press, PubMed, ScienceDirect, Scopus, Springer y Web of Science. En donde las diversas bases de datos mencionadas se utilizaron operadores booleanos (AND,OR,NOT) en combinación con las siguientes palabras: microspectrophotometry , textile fibers, forensic science fiber discrimination , forensic, chemometrics , forensic fibers y spectral analysis. Se tuvo en cuenta los criterios antes mencionados como prefiltros en las mismas bases de datos.

2.2. PROCESO DE SELECCIÓN Y ANÁLISIS

El programa de RAYYAN , se utilizó como herramienta primordial para la gestión, depuración y selección de los estudios presentes en esta revisión sistemática. Este software permitió la importación de referencias en formato RIS, por lo que se pudo unificar los resultados de manera eficiente obtenidos en la estrategia de búsqueda.

Posterior a la importación al programa se ejecutó la eliminación semiautomática de duplicados en donde fueron confirmados de manera manual, seguidamente se realizó la revisión de títulos y resumes , clasificándolos en incluidos, excluidos o dudosos, se siguieron los criterios previamente definidos. A los artículos preseleccionados (incluyendo los artículos dudosos) se los realizo una revisión del texto completo con el objetivo de confirmar su relevancia para el review en donde los artículos no relacionados que no estuvieran dentro criterio de selección fueron descartados. Finalmente, las investigaciones que pasaron a través de todos los filtros fueron categorizados como aptos y anexado al presente escrito. A continuación, se presentan los filtros de revisión en base a el esquema PRISMA ver figura 1.

Figura 1. Flujo de la revisión en el esquema PRISMA. Elaboración propia con base en (Page et al., 2021).



Nota: *Adaptado de Page et al (2021).*

A continuación, se identifican las acciones realizadas con la ayuda de software de Rayyan con el fin de minimizar el sesgo:

- Eliminación de los artículos duplicados: A través de Rayyan se identificación y eliminaron los artículos duplicados.
- Revisión preliminar de títulos y resúmenes con el fin de identificar los artículos que no cumplieron con los criterios de inclusión.
- Lectura completa de cada uno de los estudios para determinar su importancia para esta revisión sistemática
- Análisis de cada artículo con el fin de identificar su limitaciones y ventajas.

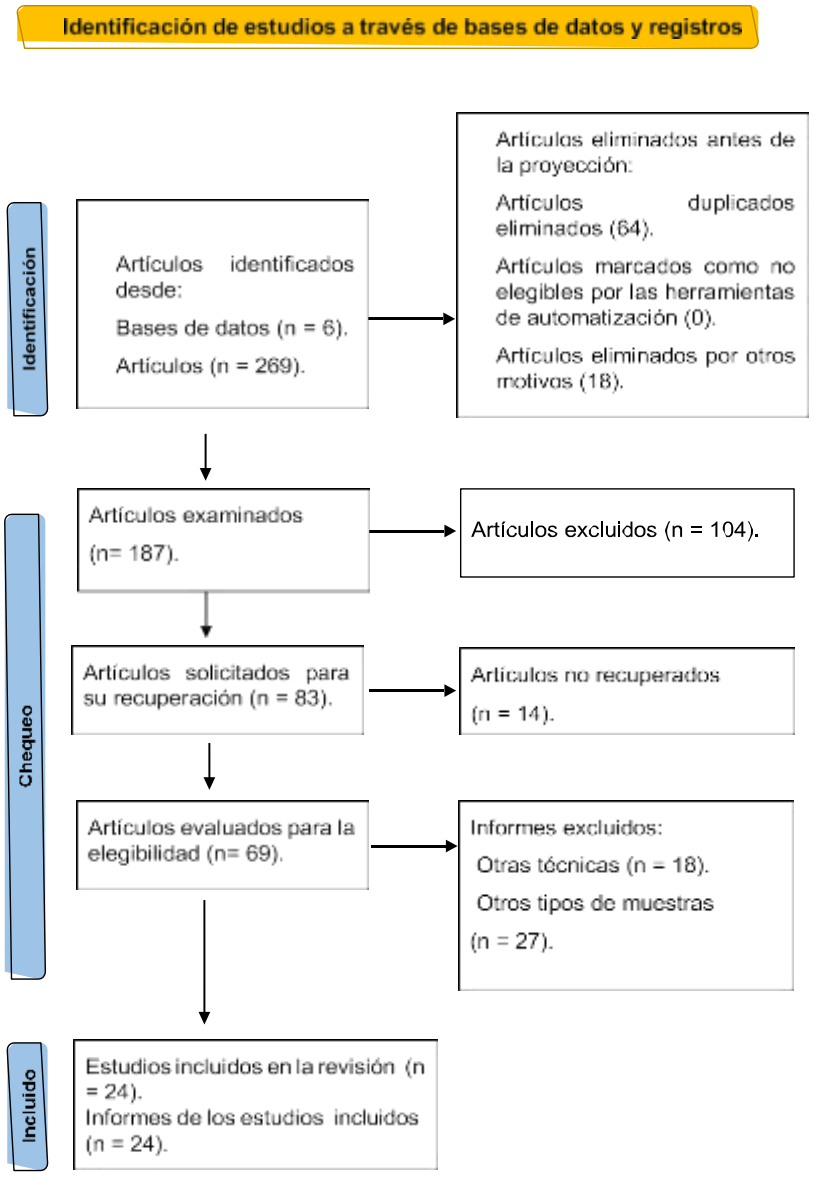
3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

En esta sesión se recopilo la información extraída de las investigaciones citadas sobres las técnicas, metodologías y avances de importancia para la identificación, comparación y el valor probatorio que tienen las fibras textiles en el ámbito forense limitando esta revisión únicamente a técnicas de microespectrofotometría como técnica principal y fundamental además de su integración con nuevas técnicas y/o sistemas que optimizan el procesamiento de este tipo de muestras.

3.1. DELIMITACIÓN Y ALCANCE DEL MARCO DE REVISIÓN

En esta revisión sistemática se utilizó las directrices planteadas por Prisma (Page et al., 2021), por lo que se determinaron criterios claros de inclusión y exclusión lo que garantiza un proceso exhaustivo de selección. Se utilizaron un total de 6 bases de datos (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Pud med, Oxford university press, Springer) en donde los artículos recolectados fueron procesados por el sistema Rayyan, lo que facilito la selección, eliminación y exclusión de los artículos que no cumpliera con los criterios requeridos.

Figura 2. Flujo PRISMA con base en los resultados obtenidos por RYYAN.



Nota: *Adaptado de Page et al (2021).*

3.2. OPTIMIZACIÓN DE LOS RESULTADOS AL UTILIZAR TRATAMIENTO MATEMÁTICO DE DATOS OBTENIDOS EN MICROESPECTROFOTOMETRÍA.

La integración de algoritmos y tratamiento estadístico en los resultados de la microespectrofotometría (MSP) es capaz de eliminar la subjetividad pericial, permitiendo análisis rápidos y no destructivos en trazas de solo 1-3 mm (Starczak & Wąs-Gubała, 2016). Por lo que la información recopilada en los artículos se encuentra en la tabla 2.

Tabla 2. Recopilación de estudios con trapiento matemático. Elaboración propia.

#	Titulo	Tipo de estudio	Resumen	Metodología	Resultados	Ventajas y Desventajas
1	An investigation into the use of calculating the first derivative of absorbance spectra as a tool for forensic fibre analysis. (Wiggins et al., 2007)	Investigación experimental analítica.	El estudio se centra en investigar y calcular el potencial de la primera derivada de los espectros de absorbancia para aumentar la capacidad de discriminación en muestras que presentan picos amplios y sin rasgos distintivos. Esta técnica permite resolver componentes espectrales que no son visibles en los datos brutos, siendo así una herramienta valiosa para la Microespectrofotometría y métodos estadísticos avanzados para la discriminación de fibras textiles en química forense, especialmente cuando se busca comparar muestras casi opacas o pálidas que dificultan la identificación por métodos convencionales.	Se analizaron muestras de fibras naturales (lana, algodón, cashmere) y fibras sintéticas (acrílico, poliéster, nailon) utilizando microespectrofotometro J&M MSP400 y MSP800 en los rangos visible (380–710 nm) y UV-VIS (240–760 nm). Para transformar los datos y facilitar la discriminación de muestras con espectros de absorción anchos o sin rasgos distintivos, se empleó el algoritmo de Savitzky–Golay con 21 puntos de suavizado y un tamaño de paso de 1 nm, calculando la primera derivada entre puntos adyacentes para resaltar cambios en la pendiente del espectro original. Este procedimiento permitió identificar puntos de comparación adicionales en las curvas, mejorando la capacidad del análisis para distinguir entre fibras que presentan variaciones sutiles en la captación del tinte.	En fibras con espectros planos, como el cashmere amarillo, la primera derivada proporcionó puntos de comparación adicionales que facilitaron su diferenciación. De igual modo, en el análisis de lotes de tinte, permitió visualizar variaciones sutiles en la región UV (370–390 nm) que no eran evidentes en la absorbancia estándar. No obstante, en materiales con alta variabilidad interna de color (como el algodón o la lana teñida de forma desigual), la técnica resaltó tanto estas diferencias que podría haber resultado en exclusiones erróneas si no se consideraba el espectro original.	La ventaja principal es el incremento en la resolución de los datos espectrales sin necesidad de métodos destructivos como la cromatografía. Sin embargo, la mayor sensibilidad de la derivada a los cambios de gradiente exige extrema precaución: los resultados nunca deben interpretarse de forma aislada, ya que la variabilidad en la absorción del tinte puede generar diferencias drásticas en los perfiles derivados entre fibras que realmente pertenecen a la misma fuente.
2	Enhancing the evidential value of textile fibres Part 1: Development of a spectral database and evaluative comparison strategy. (Powell et al., 2018b)	Investigación con enfoque descriptivo.	El artículo aborda la creación de una base de datos espectral diseñada para enfrentar los retos de casos criminales con volúmenes masivos de material recuperado (fibras). La integración de sistemas automatizados permitió optimizar la comparación de	La metodología descrita dicta que se desarrolló un sistema capaz de procesar más de 20000 espectros mediante el uso de un coeficiente de correlación de Pearson modificado, en donde se integra la microespectrofotometría y la discriminación estadística para la exclusión de fibras textiles con importancia en la	Se demostró que el sistema es eficaz en pruebas de competencia y casos reales, en una investigación con más de 4000 fibras, la herramienta facilitó la clasificación de 156 grupos de interés distintos. Los métodos de pretratamiento de datos, como las convoluciones de	La principal ventaja radica en la reducción del tiempo de análisis y la eliminación de la subjetividad en la percepción del color, además de permitir clasificaciones preliminares reduciendo el número de muestras que deben ser reevaluadas; por ejemplo, el uso de la microespectrofotomet

			perfiles cromáticos y morfológicos, mejorando la eficiencia en la generación de inteligencia investigativa, además de facilitar el establecimiento de vínculos entre víctimas y las escenas del crimen.	química forense para la gestión de grandes conjuntos de datos, implementando una estrategia de fibras diana que reduce el número de comparaciones manuales mediante la clasificación de grupos preliminares que deben ser verificados por microscopía.	Savitzky-Golay, permitieron mantener la integridad espectral y mejorar la exclusión de no coincidencias en comparación con el uso exclusivo de espectros de absorbancia.	ría (MSP) y una base de datos permitió procesar más de 4000 fibras y agruparlas eficientemente en 156 conjuntos distintos basados en 25000 espectros. Igualmente, se encuentra la limitante de que el sistema es menos efectivo con fibras incoloras o pigmentadas con negro de carbón debido a la ausencia de rasgos espectrales distintivos en el rango analizado de 240 a 760 nm.
3	Enhancing the evidential value of textile fibres Part 2: Application of a database-driven fibre comparison strategy to a cold-case investigation. (Powell et al., 2021)	Investigación forense con enfoque descriptivo y comparativo.	En este estudió se abordó la gestión técnica de una investigación de gran escala caracterizada por la recuperación de más de 10800 fibras textiles, donde la implementación de protocolos para el análisis de datos masivos permitió establecer vínculos entre víctimas y entornos sospechosos, resaltando la relevancia de las herramientas analíticas para optimizar la identificación de hechos delictivos.	La metodología descrita indica que se empleó una base de datos con más de 25000 registros con el fin de facilitar la microespectrofotometría y el tratamiento estadístico para la discriminación de fibras dentro del protocolo analítico. Se utilizaron mediciones en el rango de 250 a 900 nm utilizando soportes de cuarzo, microscopía de comparación y técnicas complementarias como FTIR y TLC. Se integró un estudio poblacional local sobre 17000 fibras para evaluar la universalidad de los materiales hallados.	Se obtuvo que el sistema permitió la organización de 156 grupos distintivos de fibras. Se identificaron un conjunto de 20 fibras de poliéster gris con un perfil espectral único coincidente con textiles de un vehículo. En total, se asociaron 98 fibras con 6 fuentes textiles vinculadas a un sospechoso. El análisis estadístico de la población urbana confirmó la baja probabilidad de encontrar estas combinaciones por causalidad.	El enfoque basado en datos permitió eliminar fibras adventicias y consolidar pruebas en casos con historiales complejos, donde se detectó como limitación que el tiempo transcurrido tan prolongado en la recolección dificultó la interpretación de la actividad. En donde el uso de la microespectrofotomería fue relevante porque permitió gestionar más de 10800 fibras recuperadas y crear una base de datos con 25000 espectros, ofreciendo la ventaja de una alta capacidad de discriminación mediante rasgos únicos como el doblete espectral a 516 y 555 nm. No obstante, se observaron limitaciones como la imposibilidad de determinar el momento exacto de la transferencia.
4	Evaluating performance of Lasso relative to PCA and LDA to classify dyes on fibers. (Rich et al., 2020)	Investigación experimental y quimiométrica.	En el estudio se abordó el reto de interpretar grandes volúmenes de datos espectrales complejos mediante el uso de modelos matemáticos para la identificación de colorantes en	Se utilizó una base de datos con más de 700 muestras de fibras en la metodología, guiando hacia el enfoque un subconjunto de 29 clases de acrílico azul, los datos de absorbancia en el rango UV-VIS fueron	El enfoque basado en la contracción de parámetros alcanzó una precisión predictiva del 96.6% en el conjunto de prueba, superando el 89.7% obtenido por métodos multivariantes convencionales,	Se tiene como ventaja que la quimiométrica dispersa simplifica la interpretación y aumenta la fiabilidad del análisis espectroscópico no destructivo, como la MSP UV-VIS, técnica que destaca por ser

			trazas, con el objetivo de mejorar la precisión predictiva y la interpretabilidad de los resultados en el análisis comparativo, proporcionando herramientas que faciliten la toma de decisiones periciales mediante la evaluación de componentes químicos específicos en la microevidencia.	procesados mediante regresión logística con penalización Lasso, comparando su desempeño con técnicas tradicionales de reducción de dimensionalidad. Por lo que el enfoque de selección de variables permitió identificar las longitudes de onda críticas para la caracterización de las muestras, integrando la optimización numérica para el tratamiento de datos instrumentales en el laboratorio.	además de observar que limitar el modelo a un número reducido de variables críticas evita el sobreajuste y permitió diferenciar materiales que comparten colorantes similares y superponibles, pero que en distintas concentraciones, detectando variaciones sutiles que la inspección visual humana no logra percibir.	rápida, reproducible y por requerir solo 2 a 5 mm de longitud de fibra. No obstante, el sistema alcanzó una precisión predictiva del 96,6% frente al 89,7% de métodos tradicionales, pero con la limitación de que la efectividad del sistema está vinculada a la representatividad de los conjuntos de entrenamiento y a la complejidad de los datos (Big Data) generados por los espectros.
5	Forensic discrimination of fiber microspectrophotometry data by resampling and repeating two-sample hypothesis testing (Sharma et al., 2019)	Investigación experimental y quimiométrica.	El articulo propone un enfoque para evaluar la similitud de espectros mediante pruebas de hipótesis de dos muestras con remuestreo repetitivo. Donde se busca superar las limitaciones de la comparación visual subjetiva cuando los perfiles son muy similares, con el fin de proporcionar criterios objetivos para la identificación de fuentes comunes en la investigación de delitos mediante el análisis de microevidencia.	Para fortalecer la objetividad en la comparación de trazas forenses, se analizaron fibras de algodón teñidas con ocho colorantes de tina mediante microespectrofotometría (MSP) en un rango extendido de 240 a 780 nm. La metodología consistió en obtener 55 espectros por cada tipo de fibra, realizando cinco mediciones en diferentes puntos de 11 fibras individuales, los cuales se procesaron en los siguientes formatos: absorbancia original, transmitancia original y sus respectivas primeras derivadas. El análisis estadístico aplicó pruebas de hipótesis de dos muestras utilizando seis algoritmos especializados para datos de alta dimensionalidad (M1-M6), que permiten realizar cálculos con la totalidad de los datos sin necesidad de suavizar los espectros ni reducir variables. Se empleó una técnica de remuestreo aleatorio en la que se generaron grupos de 25 espectros de manera iterativa, repitiendo las pruebas de hipótesis 10000 veces para	La aplicación de la primera derivada de la absorbancia junto con el modelo de Chen y Qin demostró ser la estrategia más eficaz utilizando microespectrofotometría (MSP). Este enfoque logró reducir las falsas inclusiones a casi el 0% y mantener las falsas exclusiones cerca del nivel de significancia establecido del 5%, evaluado mediante 10000 repeticiones de remuestreo sobre 14 muestras de algodón. La MSP permitió obtener espectros en el rango de 240 a 760 nm, y el tratamiento computacional de la información permitió identificar puntos de comparación críticos, como inflexiones que la inspección visual humana suele omitir debido a la variabilidad entre muestra.	Como ventaja se determinó que la técnica de microespectrofotometría (MSP) aprovecha la totalidad de los datos medidos entre los 240 y 760 nm sin necesidad de reducir variables ni emplear conjuntos de entrenamiento previos, destacando por ser un método estándar no destructivo. El uso de la prueba de hipótesis de dos muestras (modelo de Chen y Qin) con 10000 repeticiones de remuestreo permitió alcanzar tasas de error de falsas inclusiones cercanas al 0% en 14 muestras de algodón, pero teniendo como limitación la necesidad de profundizar en el tamaño mínimo de muestra necesario para garantizar la confianza de los resultados ante la naturaleza limitada y traza de la evidencia recolectada en escenas criminales.

				cada par de muestras con un nivel de significancia de 0.05. Este enfoque sistemático permitió evaluar la fiabilidad del análisis mediante el cálculo de las tasas de error de tipo I (falsa exclusión) y error de tipo II (falsa inclusión).		
6	Improving the confidence of ‘‘questioned versus known” fiber comparisons using microspectrophotometry and chemometrics. (Sauzier et al., 2016)	Investigación experimental con enfoque analítica.	En la investigación se evalúa la microespectrofotometría con quimiometría para diferenciar fibras acrílicas de tonalidades azules visualmente idénticas, con el objetivo de establecer un marco riguroso para sustentar conclusiones periciales, simulando comparaciones de muestras cuestionadas frente a indubitadas para reducir la subjetividad de las evaluaciones visuales.	Se tomó como muestra 11 juegos de fibras acrílicas azules que fueron analizadas mediante microespectrofotometría en el rango de 400 a 800 nm. El tratamiento de los datos incluyó una normalización de longitud de vector unitario y diversos métodos estadísticos como el análisis de componentes principales y un análisis discriminante para procesar la información. Además, se utilizó la prueba exacta de Fisher para obtener una medida cuantitativa de la similitud mediante el análisis de tablas de contingencia resultantes de la clasificación binaria de los espectros. Esta metodología permite transformar grandes cantidades de datos multivariados en resultados objetivos para la identificación de agrupaciones de muestras.	Se obtuvieron inclusiones correctas en 10 de 11 casos de la misma fuente y exclusiones en 108 de 110 comparaciones de fuentes distintas, se cree que las fallas en la discriminación fueron debido a la falta de reproducibilidad espectral o a la existencia de perfiles químicos idénticos entre lotes de tintes, se resalta que los primeros componentes principales explicaron más del 98% de la varianza total de los datos espectrales.	La metodología propuesta ofrece criterios objetivos para interpretar la evidencia traza y su validez como material probatorio. Entre sus ventajas, la combinación de microespectrofotometría (MSP) con quimiometría permite distinguir fibras visualmente similares de manera rápida y no destructiva, logrando una exclusión correcta en 108 de 110 escenarios evaluados. No obstante, la técnica presenta limitaciones ya que depende de la estabilidad instrumental y de la homogeneidad en la absorción del tinte, factores que pueden derivar en exclusiones falsas por falta de reproducibilidad en los espectros o variaciones sistemáticas por la recalibración del equipo.
7	Microspectrophotometric analysis of yellow polyester fiber dye loadings with chemometric techniques. (Reichard et al., 2017)	Investigación experimental con enfoque analítico.	EL articulo presenta el análisis de espectros de absorbancia en fibras de poliéster amarillo teñidas con diferentes concentraciones mediante técnicas de quimiometría con el propósito de determinar si la variación en la carga del colorante permite una diferenciación objetiva, aportando herramientas de alta resolución para la comparación de muestras que	Se tomaron como muestras 10 ejemplares de fibras textiles con cargas de colorante entre 0,1% y 3,5%, donde se aplicó análisis por microespectrofotometría en el rango visible (380 nm y 750 nm), junto con microscopía de luz polarizada y espectroscopía infrarroja. Los datos espectrales fueron preprocesados mediante sustracción de fondo y normalización estándar, posteriormente se	Se determinó que el aumento en la carga del tinte provocó un desplazamiento hacia el rojo en la máxima absorción y cambios en la uniformidad de los picos, por otra parte, el análisis discriminante alcanzó un 96% de exactitud al agrupar las fibras en tres categorías de carga de colorante: baja, media y alta. Tras una validación externa pudieron confirmar que la identificación de diferencias en la concentración de	El uso de la microespectrofotometría ofrece un método rápido, preciso y no destructivo para la comparación objetiva de color en fibras forenses. Como limitante técnica en el análisis de carga de tintes, se encuentra que la discriminación de diferencias inferiores al 0.5% resulta ser poco confiable. Además, en fibras altamente teñidas, la transmitancia se aproxima a la del blanco (ruido), lo que

			resultan visualmente similares.	aplicaron métodos estadísticos multivariantes como el análisis de conglomerados jerárquicos, componentes principales y análisis discriminante.	tintes es factible mediante el tratamiento estadísticos de los datos.	dificulta la resolución de rasgos espectrales y reduce la precisión al momento de su clasificación.
8	The use of indigo derivatives to dye denim material. (Grieve et al., 2006)	Investigación descriptiva.	El articulo analiza el uso de la microespectrofotometría para distinguir entre fibras teñidas con índigo tradicional y sus derivados sintéticos, debido que el índigo es ubicuo, estas fibras suelen descartarse en estudios de transferencia por su bajo valor probatorio, en el estudio investiga si el uso de sustitutos modernos permite que estas fibras funcionen como dianas relevantes en las investigaciones criminales incluyendo, pero no limitándose a investigaciones forenses.	Se analizaron 160 muestras de denim de uso corriente, montando las fibras individuales en portaobjetos de cuarzo utilizando glicerina de inmersión para realizar mediciones de transmitancia en el rango ultravioleta y visible (240-760 nm). Para la obtención de los datos instrumentales, se empleó un microespectrofotómetro Zeiss MPM 800 bajo condiciones de medición específicas: un ancho de paso de 2.5 nm, un promedio de 20 escaneos y un área de medición de 5.8 µm x 58.9 µm. Se registraron espectros de al menos seis fibras por muestra para representar el rango de concentración del colorante. Además, se aplicaron métodos estadísticos de comparación por mínimos cuadrados y el cálculo de la primera derivada espectral.	Determinaron que aproximadamente el 95% de las muestras examinadas fueron de algodón teñido con Vat Blue 1 (índigo=CI 73000). Además, no se hallaron derivados halogenados o metilados entre las 160 muestras, pero sí se identificaron colorantes como Reactive Black 5 en 3 muestras y Sulphur Blue en 1 muestra con perfiles espectrales específicos. Para finalizar, el cálculo de la primera derivada permitió diferenciar claramente el índigo de sus variantes cloradas y bromadas, especialmente en la región de "huella digital" comprendida entre una longitud de onda de 325 y 450 nm.	La microespectrofotometría pudo ofrecer una distinción objetiva entre colorantes visualmente idénticos, permitiendo diferenciar el Vat Blue 1 de sus siete derivados, como los clorados, bromados y el dimetilo. No obstante, la alta frecuencia del índigo en el mercado, presente en aproximadamente el 95% de las 160 muestras analizadas, limita el valor de estas fibras como evidencia convencional. El valor probatorio aumenta significativamente solo en casos de variantes raras, como el uso de Reactive Black 5 o Sulphur Blue, o ante el hallazgo inusual de derivados de índigo.

Como resultados principales, se encuentra que la aplicación de la primera derivada mediante el algoritmo de suavizado Savitzky-Golay (utilizando 21 puntos de suavizado y un tamaño de paso de 1 nm) permite revelar rasgos químicos invisibles al transformar máximos de absorbancia en cruces por cero, lo que facilita la resolución de hombros espectrales y puntos de inflexión en picos anchos (Wiggins et al., 2007). Este procesamiento matemático, integrado con pruebas de hipótesis de dos muestras y un método de remuestreo tipo bootstrap de 10000 iteraciones, es capaz de reducir hasta casi el 0% las falsas inclusiones (error de Tipo II) al proporcionar un criterio de inclusión/exclusión objetivo basado en la distribución de la varianza de la muestra (Itamiya et al., 2024).

De igual manera, en la clasificación de fibras acrílicas, la incorporación del algoritmo de quimiometría dispersa, Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) alcanzó una precisión del 96.6%, superando a los métodos tradicionales gracias a su capacidad de realizar una selección automática de variables que reduce a cero los coeficientes de las longitudes de onda irrelevantes (Rich et al., 2020). Por su parte, el Análisis de Componentes Principales (PCA) permite la reducción de dimensionalidad al transformar datos multivariantes en componentes ortogonales no correlacionados, logrando describir más del 98% de la varianza total de los datos y facilitando la visualización de agrupamientos mediante el cálculo de la distancia de Mahalanobis en modelos de Análisis Discriminante (DA)(Sauzier et al., 2016) .

Por último, el uso de Agrupamiento Jerárquico Aglomerativo (AHC), empleando la distancia euclidiana multivariante y el Método de Ward para la agregación de muestras, permite clasificar cargas de tinte en poliéster con un 96% de exactitud, identificando desplazamientos espectrales hacia el rojo de hasta 13 nm conforme aumenta la concentración (Reichard et al., 2017). Asimismo, el desarrollo de bases de datos que utilizan un Coeficiente de Correlación de Pearson Modificado (MPCC) para comparar más de 25000 espectros normalizados y derivados facilita en gran medida la agrupación eficiente de miles de fibras en casos complejos, optimizando los tiempos del laboratorio mediante la automatización de la búsqueda de correspondencias matemáticas (Powell et al., 2018).

3.2. PODER DISCRIMINATIVA DE LA MICROESPECTROFOTOMETRÍA EN FIBRAS TEXTILES.

La microespectrofotometría UV-VIS se ha consolidado como una técnica de excepcional sensibilidad, capaz de detectar y cuantificar perfiles cromáticos en microevidencias que resultan casi incoloras bajo la inspección ocular pericial. En investigaciones sobre fibras de algodón teñidas con colorantes reactivos, la microespectrofotometría ha demostrado detectar colorantes en concentraciones de 0.18% p/p, logrando identificar máximos y mínimos característicos en muestras donde el color es prácticamente imperceptible al utilizar técnicas tradicionales como el microscopio óptico (Starczak & Wąs-Gubała, 2016). La información se encuentra condensada en la tabla 3.

Tabla 3. Recopilación de estudios donde se evaluó el poder discriminante de la microespectrofotometría. Elaboración propia.

#	Titulo	Tipo de estudio	Resumen	metodología	Resultados	Ventajas y Desventajas
9	A study of background population of fibres on knife Blades. (Cammarota et al., 2019)	Investigación experimental analítica.	El objetivo del estudio en cuestión fue determinar la variedad, distribución y tamaño de la población de fibras textiles presentes de forma endógena en hojas de cuchillos de origen doméstico y también de aquellos decomisados por la policía; teniendo como finalidad proporcionar datos empíricos que permitan a los entes judiciales diferenciar si las fibras encontradas en las pruebas provienen de un evento criminal tipo apuñalamiento o si ya estaban presentes como ruido de fondo, facilitando así la interpretación de la evidencia bajo	Se analizaron un total de 20 cuchillos mediante levantamiento con cinta adhesiva siguiendo la técnica 1:1, lo que permitió recuperar un promedio de 11.2 fibras por cada hoja analizada. Además, se realizó un exhaustivo estudio de población examinando 1509 fibras bajo microscopía estereoscópica para clasificarlas detalladamente por color y tipo, determinando que un 62% correspondía a fibras naturales y un 38% a sintéticas. Posteriormente, se efectuó un estudio por bloque de color enfocado específicamente en las fibras de algodón azul, las más comunes con un 48% de presencia total, utilizando microscopía de comparación y microespectrofotometría (MSP) UV-vis en un rango de 240 a 740 nm; lo que permitió identificar diversos grupos de fibras que resultaron indistinguibles entre sí, aportando datos clave sobre la frecuencia de estos hallazgos en la	Se encontró que el número de fibras de fondo por hoja varió entre 2 y 572, con un valor medio de 23 fibras. Entre las combinaciones más frecuentes se encontraron algodón incoloro o blanco (31%), algodón azul (16%) y algodón gris (11%) y el 70 % de los grupos de fondo detectados consistió en apenas 1 a 5 fibras. En el estudio de las muestras de algodón azul, solo el 30 % de las hojas mostró más de una fibra; los grupos hallados fueron pequeños 2 a 6 fibras, lo cual contrasta significativamente con las grandes cantidades de fibras que son transferidas usualmente tras un apuñalamiento.	El estudio tuvo como ventaja el aportar parámetros de transferencia y fondo fundamentales para calcular razones de verosimilitud en contextos legales, identificando un promedio de 11.2 fibras por cuchillo y una frecuencia de transferencia del 36% tras un apuñalamiento. Como limitación, el nulo historial de uso de los cuchillos incautados dificulta interpretar ciertas acumulaciones de fibras, además de que la alta variabilidad espectral del algodón, presente en el 48% de los hallazgos, puede complicar la discriminación definitiva mediante MSP debido a las sutiles diferencias en las curvas de absorción.

			el marco bayesiano.	población de fondo.		
10	A study of black fleece garments: Can fleece fibres be recognized and how variable are they? (Lunstroot et al., 2016a)	Investigación forense sobre la variabilidad morfológica y espectral de fibras.	La investigación tuvo como objetivo caracterizar las propiedades distintivas de las fibras de lana de color negro con el objetivo de que el personal de química forense pueda identificarlas como una fuente probable de evidencia en casos criminales. Además, se buscaba establecer el grado de discriminación entre prendas de color negro uno de los más frecuente en el ámbito forense, evaluando si estas fibras son útiles para análisis comparativos.	Se recolecto la cantidad de 201 prendas de lana color negro de diversas fuentes. Las muestras fueron analizadas mediante técnicas recomendadas de examen forense: microscopía (campo claro, luz polarizada y fluorescencia), microespectrofotometría (MSP) en el rango visible (380–800 nm) y espectroscopía infrarroja (FT-IR). De la misma manera se evaluó la capacidad de desprendimiento (sheddability), mediante levantamiento con cinta adhesiva, también se realizaron comparaciones directas con microscopía de comparación.	Se identifico que el 97% de las muestras eran 100 % poliéster, con una sección transversal predominantemente poligonal (60%). Se encontraron los rasgos característicos de estas telas como su alta tasa de desprendimiento, fibras largas y rizadas, y extremos con forma de "hongo" derivados del proceso de manufactura. Los resultados de MSP se clasificaron en 10 tipos, siendo el Tipo 1 el más abundante (84%). Inclusive se encontró el valor discriminante (DP) calculado de 0.9985, por lo que indica que casi todas las muestras pudieron diferenciarse entre sí.	En este artículo se recopilaron datos sólidos sobre la alta variabilidad de las fibras de lana color negro, lo que las convierte en evidencia valiosa en donde la combinación de rasgos como los extremos de hongo y la presencia de fibras más gruesas de la "capa base" sugerir con confianza el origen de la fibra. Como limitación, se encontro que los extremos en forma de hongo no son exclusivos de la lana, ya que puede estar presente en otros textiles de poliéster sometidos a procesos similares.
11	Basic forensic identification of artificial leather for hit-and-run cases. (Sano & Suzuki, 2009)	Investigación experimental.	La investigación aborda métodos para identificar fragmentos de cuero artificial y fibras recuperadas en casos de atropello y fuga. La integración de análisis morfológicos y químicos permite vincular de forma objetiva a las víctimas con los vehículos sospechosos, mejorando la capacidad de cotejo de trazas que suelen ser complejas de clasificar.	Se tomaron 182 muestras de cuero liso y 9 de tipo gamuza obtenidas de fabricantes japoneses y comercios minoristas, se determinó la morfología al observar con microscopía electrónica de barrido, mientras que el color fue evaluado mediante microespectrofotometría en un rango de 380 a 760 nm. Los componentes poliméricos se midieron con micro-FT-IR y los elementos inorgánicos con fluorescencia de rayos X, además de aplicación de métodos estadísticos para calcular intensidades promedio a partir de mediciones por triplicado en cinco posiciones distintas de cada lámina de 5 cm por 5 cm.	La creación del protocolo permitió discriminar aproximadamente el 92% de las 15576 comparaciones por pares en cueros de superficie lisa. Por otra parte, en las muestras de tipo gamuza, se logró diferenciar la totalidad de los 9 ejemplares analizados combinando datos químicos y de color. Se concluyo que la microespectrofotometría fue capaz de distinguir muestras de color similar con variaciones sutiles alrededor de los 510 nm. Adicionalmente, el análisis de elementos inorgánicos resultó fundamental para discriminar 15 muestras negras donde la evaluación del color es difícil y principalmente	El uso de la microespectrofotometría en este estudio destaca por su alta capacidad de resolución analítica, permitiendo en algunos casos definir la marca y el fabricante del material. Igualmente se encuentra la limitación que en los cueros de policloruro de vinilo debieron ser excluidos del estudio debido a que su falta de variabilidad instrumental y superficies planas limitan su potencial de identificación forense básica. De igual manera en muestras color negro, la evaluación del color por MSP resultó difícil, por lo que fue necesario complementar el análisis con XRF para detectar diferencias

					limitada bajo técnicas comunes.	significativas.
12	Blocks of colour IV: The evidential value of blue and red cotton fibres (Biermann, 2007a)	Investigación experimental con enfoque analítico.	La investigación analiza muestras de fibras de algodón azules y rojas mediante técnicas ópticas y espectrales para determinar su grado de variabilidad y frecuencia en la población. A pesar de ser materiales comunes en el flujo de casos criminales su caracterización detallada en sus perfiles permite establecer una alta individualidad, refutando la idea de que estas trazas carecen de valor investigativo por su ubicuidad.	Se colectaron 351 muestras de fibras azules y 287 rojas de diversas prendas y de orígenes geográficamente variados. Se utilizó microscopía de comparación y microespectrofotometría en el rango de 240 a 760 nm, empleando portaobjetos de cuarzo y glicerina. Se calculó la primera derivada de los espectros para identificar puntos de inflexión diagnósticos posteriormente se realizó una evaluación mediante métodos estadísticos basados en el modelo de la urna. El análisis incluyó la observación de la fluorescencia bajo distintas excitaciones para diferenciar aditivos y abrillantadores ópticos.	Se analizaron 293 muestras azules, generando 42778 comparaciones posibles, y 275 muestras rojas con 36675 comparaciones. En donde se alcanzó un poder discriminante de 0.9996 para las fibras azules y 0.9995 para las rojas. También se determinó que el 44% de las muestras azules mostraron perfiles tipo Reactive Black 5, estas pudieron diferenciarse por variaciones específicas en el rango UV entre 240 y 320 nm. Tras el análisis completo, solo 7 parejas y un grupo de 3 muestras azules resultaron indistinguibles.	La principal ventaja radica en la capacidad de individualizar fibras mediante información espectral en el rango UV en donde los aditivos del baño de tinte ofrecen rasgos inconfundibles y rastreables, alcanzando un poder de discriminación de hasta 0.999, siendo la principal limitación que el valor probatorio disminuye cuando se encuentran patrones frecuentes, como ocurre con el colorante Negro de Azufre 1, cuya variabilidad es de apenas 0.13, o el Reactive Black 5, presente en el 44% de las muestras de algodón azul analizadas.
13	Obtaining absorption spectra from single textile fibers using a liquid crystal tunable filter microspectrophotometer. (Markstrom & Mabbott, 2011a)	Investigación experimental con enfoque analítico.	En el trabajo se describe el uso de un filtro sintonizable de cristal líquido integrado a microespectrofotometría con el fin de obtener perfiles de absorbancia visibles de fibras individuales. La utilización de la técnica permitió la adquisición rápida de datos espectrales sin destruir la muestra, facilitando la comparación simultánea de múltiples fibras y mejorando la capacidad de clasificación de colorantes en trazas textiles.	Como muestras se tomaron fibras de lana, algodón, poliéster y seda montadas entre portaobjetos de vidrio regular. Además, se empleó una combinación de lámpara de deuterio y luces led y filtro de cristal líquido (400-720 nm) con un ancho de banda de 7 nm y una cámara CCD. Los datos fueron procesaron como archivos tridimensionales, permitiendo reconstruir el espectro en cualquier píxel del área de visión. Para finalizar se aplicaron procedimientos de promediado de señal para mejorar la relación señal-ruido mediante la selección de regiones de interés tras la recolección de datos.	Se obtuvieron como resultados que los espectros obtenidos con el sistema de filtrado mostraron una alta correlación con los registros de instrumentos convencionales de matriz de diodo, también se identificó que la microespectrofotometría directa evita sesgos analíticos propios de la extracción de colorantes. Además, se detectaron agentes blanqueadores en fibras blancas mediante su firma en el rango visible cercano al ultravioleta.	Como principal ventaja se encuentra la flexibilidad para analizar cualquier punto de la fibra y múltiples muestras a la vez en un campo de visión de aproximadamente 0.9 mm de ancho, lo que reduce el error experimental. Pero teniendo como limitante que la resolución espectral, con un ancho de banda de 7 nm, es ligeramente inferior a los 2 nm de los monocromadores estándar, aunque suficiente para resolver bandas de absorción en fases condensadas.
14	Raman spectroscopy and microspectrophotometry of	Investigación experimental analítica.	El trabajo evalúa la capacidad de respuesta de técnicas espectroscópicas	Se analizaron telas de algodón teñidas con RY145 y RB221 en concentraciones desde 5% hasta 0,005%., la	La microespectrofotometría demostró un límite de detección de 0,5%, coincidiendo con el	Como ventaja se obtuvo que la microespectrofotometría es de carácter no destructivo y su alta

	reactive dyes on cotton fibres: Analysis and detection limits. (Massonnet et al., 2012)		en comparación a la inspección visual tradicional en fibras de algodón. Donde se tuvo como enfoque establecer límites cuantitativos para la identificación de componentes cromáticos sutiles, permitiendo una diferenciación más profunda de muestras textiles en el ámbito de la criminalística analítica.	metodología incluyó el uso de microespectrofotometría en el rango de 240 a 780 nm empleando soportes de cuarzo y glicerina. También se utilizó espectroscopía raman con seis líneas de excitación láser. Por último, se aplicó una definición estandarizada para el límite de detección basada en la relación señal-ruido para validar la sensibilidad de los instrumentos mediante criterios técnicos estandarizados.	umbral de percepción del color mediante microscopía de luz. por otro lado, la espectroscopía raman alcanzó sensibilidades superiores siendo capaz de detectar concentraciones de hasta 0,05% para tintes amarillo y 0,005% para tintes azules. En mezclas de colorantes los componentes minoritarios fueron identificados hasta un nivel del 1,5% con técnicas de absorción y del 0,5% mediante dispersión de luz.	capacidad de medición objetiva, aunque su sensibilidad disminuye en fibras pálidas. En donde el uso de herramientas complementarias y la aplicación de procedimientos de validación resultan esenciales para la caracterización total de los colorantes, dado que la eficacia analítica depende de la longitud de onda empleada y la experiencia del operador siendo la principal desventaja de esta metodología además de su menor poder discriminativo en comparación con el raman.
15	The discrimination of (non-denim) blue cotton. (Palmer et al., 2009)	Investigación experimental original.	El estudio evalúa el grado de discriminación alcanzable en fibras de algodón azul (no denim) utilizando microespectrofotometría en los rangos visible y ultravioleta. El objetivo fue revalorizar la importancia probatoria de estas fibras, a menudo subestimadas en el ámbito forense por su ubicuidad, y proponer un protocolo donde la MSP actúe como herramienta de cribado primario.	Se analizaron muestras de 100 prendas de algodón azul (73 azul oscuro y 27 azul medio) de diversos orígenes. Las fibras se extrajeron mediante cinta adhesiva, se lavaron en alcohol absoluto y se montaron en portaobjetos de cuarzo con glicerol. Se utilizó un microespectrofotómetro Zeiss Axioplan 2 con J&M MSP400, configurado para el rango UV-VIS y operado con el software Spectralys v1.82. Se realizaron comparaciones mediante superposición espectral en el rango visible y ultravioleta.	Se identificaron 43 poblaciones espectrales distintas en las muestras azul oscuro y 17 en las de azul medio. El Poder discrimínate en el rango visible fue de 0.89 para el azul medio y 0.87 para el azul oscuro; al extender el análisis al rango UV, el DP aumentó a 0.96 para ambas poblaciones, representando un incremento de eficiencia del 7%. Además, se determinó que la variación entre las fibras de la misma prenda es despreciable.	El uso de la microespectrofotometría (MSP) ofrece un nivel de discriminación de 0.96, muy similar al 0.99 que se obtiene combinando microscopía de luz blanca y la microscopía de fluorescencia, lo que permite su uso como una herramienta de cribado primario muy eficiente. No obstante, presenta como limitante que las fibras con coloraciones extremadamente pálidas dificultan la obtención de espectros de absorbancia con calidad suficiente para un análisis confiable.
16	UV–Vis microspectrophotometry as a method of differentiation between cotton fibre evidence coloured with reactive dyes. (Was-Gubala &	Investigación experimental.	El propósito central de este estudio fue evaluar la utilidad de la MSP en los rangos UV y Visible para discriminar fibras individuales de algodón teñidas con colorantes reactivos de un	Se analizaron fibras individuales de tejidos teñidos con concentraciones controladas de 8 colorantes (Cibacron/Novacron) en un rango de 0.18% a 6.00%. Se utilizó un microespectrofotómetro 20/20 PV™ (CRAIC Technologies) equipado	La microespectrofotometría demostró que todas las muestras eran distinguibles entre sí, logrando identificar máximos y mínimos característicos incluso en la concentración más baja del 0.18%,	El uso de MSP proporciona un método de medición objetivo e independiente del observador que es altamente reproducible para el análisis de color. Sin embargo, presenta como limitación que las fibras naturales

	Starczak, 2015)		mismo fabricante (Cibacron/Novacron). Se investigó la capacidad de la técnica para estimar la concentración del colorante y determinar los límites analíticos de detección en microevidencia.	con una lámpara de Xenón y un objetivo Ultrafluar 40x de Zeiss. Los espectros de transmitancia se registraron entre 200 y 800 nm y se convirtieron a unidades de absorbancia para el análisis de la relación señal-concentración, en donde las mediciones se realizaron siguiendo las guías de buenas prácticas del grupo europeo (ETFG), convirtiendo los espectros de transmitancia en absorbancia para evaluar la relación señal-concentración según la Ley de Beer.	donde las fibras parecen casi incoloras bajo el microscopio. El estudio concluyó que la Ley de Beer no se cumple de forma lineal en estas microevidencias debido a la dispersión de la luz y la naturaleza no homogénea del algodón.	como el algodón muestran una variabilidad intramuestra significativa debido a su estructura química heterogénea, lo que puede inducir a errores si no se realizan la cantidad sufrientes de replicas en diferentes puntos de la misma fibra.

La capacidad de resolución de MPS permite alcanzar un poder discriminante (DP) extremadamente alto, llegando a valores de 0.9996 en fibras de algodón azul y 0.9995 en fibras rojas, lo que refuta la idea de que las fibras textiles, por ser un material fácil de encontrar en casi todo lado, carecen de valor probatorio en la química forense (Biermann, 2007)**.** Se encontró que, en análisis de poblaciones de fondo, la microespectrofotometría es fundamental para reducir el tamaño de los grupos de fibras hallados en superficies de contacto, permitiendo una interpretación basada en el marco bayesiano. Estudios realizados en hojas de cuchillos revelaron que, aunque el algodón azul representa el 48% de los hallazgos endógenos, el uso de la microespectrofotometría permite subdividir estas poblaciones en grupos más pequeños, facilitando la exclusión de trazas no relacionadas con el evento criminal (Cammarota et al., 2019). De manera similar, en prendas de lana negra, se alcanzó un poder discriminante de 0.9985, logrando diferenciar casi la totalidad de las 183 muestras analizadas basándose en diez tipos espectrales distintos, a pesar de que visualmente todas las fibras parecían idénticas (Lunstroot et al., 2016).

En fibras de algodón azul no pertenecientes a mezclilla, la extensión del rango de medición al UV incrementó el poder discriminante en un 7%, pasando de 0.89 a un 0.96, lo que optimiza su uso como herramienta de cribado primario en laboratorios forenses (Palmer et al., 2009). El uso de este poder discriminante también se aplica a materiales complejos como cueros artificiales en casos de atropello y fuga, donde se logró discriminar el 92% de más de 15000 pares de muestras y el 100% de los cueros tipo gamuza, identificando variaciones sutiles en la absorbancia alrededor de los 510 nm (Sano & Suzuki, 2009).

Las innovaciones tecnológicas, como la incorporación de filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF), han permitido mejorar la eficiencia en la captura de datos de muestras extremadamente pequeñas. Este enfoque de microespectrofotometría avanzada es aplicable a fragmentos de fibra de 1 mm o menos, permitiendo la comparación simultánea de múltiples muestras y evitando los sesgos analíticos producidos por la extracción destructiva de colorantes (Markstrom & Mabbott, 2011). Finalmente, se ha establecido que la microespectrofotometría presenta un límite de detección máximo de 0.5% p/p, correlacionándose directamente con la visibilidad del color bajo el microscopio; esto garantiza que, siempre que una fibra muestre coloración visual, la microespectrofotometría podrá generar un espectro válido para el cotejo objetivo (Massonnet et al., 2012).

3.3 MICROESPECTROFOTOMETRÍA EN EL RANGO UV Y EN LUZ POLARIZADA PLANA.

La expansión de la microespectrofotometría hacia el rango ultravioleta (240-380 nm) ha permitido identificar agentes blanqueadores ópticos y aditivos de fabricación que son invisibles en el espectro visible tradicional. De la misma manera la incorporación de la MSP-PPL a permitido cuantificar el dicroísmo lineal lo que permitiendo

distinguir fibras con perfiles cromáticos idénticos pero que poseen diferentes procesos de manufactura o estiramiento. La información recopilada se encuentre condensada en la tabla 4.

Tabla 4: Recopilación de investigaciones sobre microespectrofotometría acoplada a UV, a luz polarizada plana y otros. **Elaboración propia.**

#	Titulo	Tipo de estudio	Resumen	metodología	Resultados	Ventajas y Desventajas
17	A further study of dye batch variation in textile and carpet fibres. (Wiggins & Holness, 2005)	Investigación de tipo experimental con un enfoque comparativo.	En el estudio se investiga la variación entre lotes de teñido en fibras textiles y de alfombra, en lo que se evalúa su detectabilidad mediante microscopía de comparación, microespectrofotometría en el rango UV-VIS, además de cromatografía en capa fina. Teniendo como objetivo central determinar el impacto de la variación de lotes de tinte en la interpretación analítica de las muestras y su relevancia para estudios comparativos avanzados.	Los investigadores analizaron 6 conjuntos de muestras textiles diferentes, derivados de 4 conjuntos pertenecieron a fibras acrílicas teñidas utilizadas en la industria de la moda, con entre 7 a 10 lotes por conjunto. Adicionalmente, 2 conjuntos correspondieron a fibras utilizadas en alfombrillas automotrices: 26 lotes de nylon naranja teñido con colorantes ácidos y 24 lotes de mezclas de nylon mostaza y viscosa marrón. Por lo que las fibras se examinaron mediante microscopía de comparación bajo luz blanca y UV, microspectrofotometría UV-VIS (250–730 nm, intervalo de 5 nm ancho de banda) utilizando un microespectrofotómetro Zeiss UMSP 50/80, y cromatografía en capa fina tras una extracción de colorantes a temperaturas de 100 °C durante un periodo de 20 minutos.	Entre los resultados más importantes se encontró que en tres de los cuatro conjuntos de fibras acrílicas no se pudieron detectar diferencias entre lotes mediante ninguna de las técnicas mencionadas. También que un conjunto acrílico mostró diferenciación clara en dos grupos de lotes, con discrepancias microscópicas, espectrales y cromatográficas; los espectros UV-VIS presentaron máximos en 261, 461, 545, 592 y 640 nm frente a 266, 461 y 545 nm en los otros lotes. Por el lado de las muestras de nylon naranja, un lote presentó mayor fluorescencia UV, sin confirmación consistente por microespectrofotometría o TLC. En el grupo de viscosa marrón, la variación entre lotes solo fue detectable mediante la tecnica TLC.	En el estudio se demuestra que la microespectrofotometría UV-VIS es eficaz para confirmar similitud espectral, pero no es capaz de sustituir a la TLC en la detección de variaciones mínimas de tinte. La principal limitación es la incapacidad de estas técnicas espectrales para identificar variaciones de lote cuando las diferencias cromáticas son mínimas, como se observó en el set F de viscosa marrón donde solo la TLC detectó diferencias entre los 21 lotes analizados.
18	Dichroism measurements in forensic fibre examination. Part 1 — Dyed polyester fibres(De Wael & Vanden Driessche, 2011)	Investigación experimental.	Esta investigación es la primera de una serie dedicada al estudio del dicroísmo lineal en fibras textiles como herramienta de individualización forense. El estudio explora la relación entre la estructura del colorante y el efecto	Se examinaron 120 muestras de fibras de poliéster teñidas con colorantes dispersos (azoicos, antraquinónicos, nitros). Las muestras se montaron en resina sintética Histomount y se analizaron mediante microespectrofotometría con luz polarizada plana (MSP-PPL). El procedimiento consistió en registrar espectros con el polarizador orientado norte-sur, rotando la platina 90° para obtener mediciones	Se calcularon picos máximos de absorbancia y relaciones dicroicas para cada colorante en donde se halló que casi todos los colorantes en poliéster muestran un efecto dicroico observable, con valores de R significativos, en el caso de Disperse Yellow 56 se obtuvo un valor discriminativo de 4.3. Por lo que el dicroísmo permite	La técnica de MSP-PPL permite una medición objetiva del dicroísmo, logrando diferenciar fibras que poseen el mismo espectro bajo luz no polarizada. Como desventaja principal de esta metodología, se requiere un posicionamiento extremadamente preciso de la fibra en el eje norte-sur y un control estricto de la saturación espectral, que suele ocurrir en absorciones

			dicroico, buscando validar un método objetivo aplicable a comparaciones de fibras de poliéster teñidas para aumentar la discriminación entre muestras metaméricas.	paralelas y perpendiculares al eje de la fibra, con un tiempo de integración de 350 milisegundos y 5 acumulaciones.	diferenciar fibras que poseen el mismo espectro bajo luz no polarizada pero que difieren en la orientación molecular de sus componentes cromáticos.	superiores a 1.2 unidades (AU).
19	Dichroism measurements in forensic fibre examination. Part 4—dyed acrylic and acetate fibres. (De Wael, 2012)	Investigación experimental analítica.	La investigación analizo el comportamiento dicroico de fibras acrílicas y de acetato teñidas mediante técnicas de luz polarizada con el objetivo de establecer una metodología válida para el examen forense que permita identificar la absorción diferencial de luz según la orientación de la fibra, proporcionando un nivel de individualización que distingue muestras basadas en la interacción química entre el colorante y el entorno molecular del polímero.	Se analizaron 40 muestras de fibras acrílicas y 64 de acetato (44 triacetato y 20 diacetato) utilizando microscopía óptica y microespectrofotometría con luz polarizada plana. La metodología implementó 10 acumulaciones de 500 milisegundos para captar efectos sutiles en materiales con baja birrefringencia, como el triacetato con valores cercanos a cero. Posteriormente se calcularon las relaciones dicróicas (R) y desplazamientos de banda, utilizando métodos estadísticos de mínimos cuadrados lineales para comparar la magnitud de los efectos entre diversas clases de fibras como poliamida y poliéster.	La técnica de MSP-PPL detectó en las fibras acrílicas relaciones dicroicas máximas de 1.25 para tintes básicos y de 1.35 para colorantes dispersos. En el caso de los acetatos el valor se limitó a un máximo de 1.60, detectándose visualmente un dicroísmo débil en solo 19 de las 44 muestras de triacetato. Donde los investigadores concluyeron que la magnitud del efecto medido instrumentalmente sigue un orden decreciente de poliamida mayor a poliéster y estos mayores a acetatos, con una respuesta en poliamidas 1.2 veces superior a la del poliéster según la correlación lineal con R^2=0.89 calculada para colorantes dispersos.	La microespectrofotometría con luz polarizada plana (MSP-PPL) permitió cuantificar relaciones dicróicas que son indetectables mediante microscopía convencional, aumentando la especificidad del análisis forense. Se encontró como limitación fundamental, las muestras con tintes intensos pueden presentar efectos de saturación cuando la absorbancia supera las 1.2 unidades, lo que requiere seleccionar puntos de medición menos densos. Además, la baja birrefringencia de algunas fibras produce señales dicróicas débiles que exigen una metodología de 10 acumulaciones y un posicionamiento exacto de la muestra para evitar interferencias de polarización que comprometan la reproducibilidad de los espectros.
20	Dichroism measurements in forensic fibre examination Part 5— Pigmented fibres. (De Wael & Lepot, 2012)	Investigación experimental analítica.	La investigación se basó en determinar la presencia de dicroísmo en fibras pigmentadas mediante el uso de luz polarizada, estableciendo	Se seleccionaron 80 muestras de diversas clases como poliéster, polipropileno, viscosa y poliamida. El protocolo empleó microespectrofotometría con luz polarizada plana para registrar espectros de absorción en el rango visible además se complementó con el uso espectroscopía raman	Se identifico dicroísmo fuerte en 38 muestras y débil en 16 ejemplares, mientras que 26 muestras no mostraron efecto. Por lo que se determinó que el 81 % de las fibras dicroicas presentan un efecto positivo y el 19 % un dicroísmo inverso o	Como principal ventaja fue la capacidad de discriminar mezclas complejas de pigmentos mediante perfiles de absorción y orientaciones granulares únicas. También se obtuvo la limitante en fibras con alta densidad de

			una analogía técnica con los polarizadores de hoja. el trabajo busca diferenciar microevidencias basándose en la orientación física de los granos de pigmento dispersos dentro de la matriz polimérica, lo cual ofrece una dimensión de análisis distinta a la de las fibras teñidas convencionalmente para la identificación de fuentes comunes.	como método de apoyo para identificar la composición química de pigmentos como la Ftalocianina de cobre y el negro de carbón, las fibras fueron evaluadas en posiciones paralelas y perpendiculares al eje para clasificar la intensidad y el tipo de efecto observado.	negativo. el estudio detectó por primera vez efectos dicroicos significativos en muestras acrílicas pigmentadas. Se estableció que el comportamiento óptico depende de la estructura cristalina del pigmento y de la relación de estiramiento del polímero durante la fabricación.	pigmento era necesario realizar las mediciones en los bordes para evitar la saturación de las bandas, y el negro de carbón presenta rasgos espectrales muy amplios que limitan su valor discriminatorio.
21	Forensic Fibre Analysis by UV-Visible Microspectrophotometry. (Almer et al., 2010)	Investigación experimental.	El articulo describe la evolución diversos aspectos de la Microespectrofotometría UV-visible para el análisis cromático de rutina de fibras en laboratorios forenses, comparándola con la técnica comúnmente utilizada en el rango visible. el trabajo identifica las interferencias espectrales causadas por los medios de montaje y la composición polimérica de los materiales textiles para establecer criterios fundamente que permitan aumentar la capacidad de discriminación en la comparación de trazas.	Se utilizó un sistema Zeiss MPM 800 para realizar mediciones de transmitancia en fibras naturales y sintéticas, las mediciones se realizaron en el rango visible entre 380 y 770 nm, mientras que el rango UV-VIS cubrió desde 240 hasta 770 nm. Posteriormente se examinó la estabilidad del instrumento y las interferencias de absorbancia de portaobjetos de vidrio y cuarzo, de la misma manera sobre los medios de montaje como la glicerina y el XAM, la metodología incluyó el análisis de fibras no teñidas para caracterizar la absorbancia inherente de los polímeros, validando los resultados mediante el uso de herramientas estadísticas y espectroscopía complementaria.	Se definió que el vidrio y el medio XAM absorben significativamente por debajo de los 320 nm, limitando el análisis espectral en esas condiciones. En donde polímeros como la lana, la seda y el poliéster presentaron una alta absorbancia por debajo de los 310 nm, lo que limita el análisis del colorante en esa región específica, pero en fibras como el algodón, la rayona y las olefinas, el uso de portaobjetos de cuarzo permitió identificar picos diagnósticos adicionales en el rango UV profundo, proporcionando una mayor resolución analítica y facilitando la identificación de fuentes comunes.	La microespectrofotometría UV-visible incrementa sustancialmente el poder discriminante frente al análisis tradicional al detectar componentes cromáticos entre los 240 y 380 nm, invisibles al ojo humano. No obstante, flaquea ante el alto costo del cuarzo, el carácter no permanente del montaje en glicerina y la interferencia de polímeros como lana o poliéster, que presentan absorbancias superiores a 1.0 AU por debajo de los 310 nm. Por lo que se debe aplica un árbol de decisión para evitar el laborioso desmontaje de fibras en XAM y optimizar el tiempo de análisis según los picos diagnósticos de cada polímero.

22	Guilty by his fibers: suspect confession versus textile fibers reconstructed simulation. (Suzuki et al., 2009)	Investigación experimental mediante reconstrucción y simulación de conducta criminal.	En el artículo se evalúa la veracidad de la confesión de un sospechoso mediante la reconstrucción de la escena del crimen y la simulación de sus acciones con el objetivo de comparar la distribución y cantidad de microevidencias textiles recuperadas en la simulación frente a las halladas en la investigación real, aplicando el análisis de trazas para verificar si el contacto físico descrito coincide con la evidencia física disponible.	Se realizaron cuatro simulaciones empleando la prenda del sospechoso y recreando la organización de la habitación, las fibras se recolectaron mediante levantamiento con cinta adhesiva siguiendo el protocolo de recolección .la identificación se realizó mediante observación morfológica y comparación de color mediante los espectros de transmitancia con un microespectrofotometría en el rango ultravioleta-visible de 240 a 780 nm, por lo que se utilizaron portaobjetos de cuarzo con glicerina para asegurar la precisión de los perfiles espectrales.	Se encontraron diferencias significativas entre la reconstrucción de los hechos y la escena real, especialmente en el número de fibras cerca de la cabeza de la víctima y en las mantas, mientras que las simulaciones basadas en la confesión produjeron transferencias limitadas, la evidencia original presentaba una densidad mucho mayor, lo que demostró un contacto físico más intenso que el admitido por el sospechoso. Este análisis permitió desmentir el relato, siendo determinante para la condena.	El estudio se destaca el valor de la reconstrucción científica frente a pruebas tradicionales que resultaron insuficientes en este caso, donde se presenta limitantes en la variabilidad en la transferencia de fibras de lana depende de la naturaleza de los contactos, lo que requiere el uso de procesos comparativos rigurosos para sustentar la interpretación de la evidencia.
23	The kinetics of colour change in textiles and fibres treated with detergent solutions Part II — Spectrophotometric measurements. (Was-Gubala & Grzesiak, 2010b)	Investigación experimental.	En el artículo se evalúo las variaciones de color en diversos polímeros textiles sometidos a la acción prolongada de agentes tensioactivos durante catorce días, se emplea la caracterización espectral para monitorizar la cinética de alteración de los tintes, lo que aporta datos críticos para la interpretación de transferencias de fibras en el ámbito de la química forense y la reconstrucción de hechos.	Se estudiaron muestras de algodón, lana, poliéster y acrílico tratadas con 5 detergentes comerciales a 40°C. Y posteriormente se cuantifico las mediciones de valores de remisión en tejidos y de transmitancia en fibras individuales mediante microespectrofotometría en el rango de 380 a 700 nm y para el tratamiento de los datos se calcularon índices colorimétricos además se aplicó un análisis de varianza para evaluar si la duración del tratamiento tuvo una influencia estadísticamente significativa en la alteración cromática. Por último, utilizaron métodos estadísticos de regresión y correlación para proyectar matemáticamente la degradación mediante funciones lineales o polinómicas.	Se estableció que las fibras naturales de lana y algodón presentaron las mayores variaciones espectrales, mientras que los materiales sintéticos mostraron una mayor estabilidad relativa. En el caso de la lana se detectaron cambios en la transmitancia, permitiendo modelar la pérdida de pigmentación según el tipo de detergente utilizado además el seguimiento de las soluciones mediante absorbancia, lo cual confirmó que la transferencia máxima de colorante ocurre en los primeros 6 días del proceso.	El enfoque instrumental permite predecir alteraciones cromáticas derivadas del uso cotidiano, mejorando la capacidad de clasificación en estudios comparativos forenses, pero sosteniendo la limitación de la alta variabilidad intrínseca en ciertos polímeros sintéticos que puede dificultar la resolución de diferencias estadísticas sutiles si la desviación estándar de las mediciones es elevada.

24	UV-Vis microspectrophotometric study of wool and polyamide fibres dyed with analogous gryfalan dyes. (Starczak & Was-Gubała, 2016)	Investigación experimental comparativa.	El estudio coteja fibras de lana y poliamida teñidas con tintes de complejo metálico análogos mediante el uso de microespectrofotometría con el objetivo de evaluar la afinidad de los tintes y la influencia del polímero en la calidad de los perfiles obtenidos, proporcionando criterios técnicos para establecer vínculos entre personas u objetos pudiendo ser utilizado en el ámbito de las ciencias forenses.	Se seleccionó una muestra de 15 tejidos de lana y 15 de poliamida teñidos con colorantes Gryfalan en diversas concentraciones. Las mediciones se realizaron con un equipo Microspectrophotometer 20/20 PV™ en el rango de 200 a 800 nm, utilizando portaobjetos de cuarzo y glicerina como medio de montaje. El procesamiento incluyó la extracción de fondo y la normalización de los datos para eliminar interferencias de luz dispersa y variaciones en el diámetro de la fibra. Finalmente realizaron la evaluación estadística donde se aplicó un análisis de agrupamiento jerárquico aglomerativo con el fin de clasificar muestras de color microscópico similar.	Se obtuvo que la afinidad de los colorantes es mayor en las fibras de poliamida que en las de lana ante concentraciones bajas además se detecta el efecto queratina en la lana que provoca una fuerte absorción de radiación ultravioleta por debajo de los 320 nm, aunque este fenómeno se ve disminuido conforme aumenta la concentración del tinte. El tratamiento quimiométrico permitió distinguir exitosamente la mayoría de las muestras que presentaban tonalidades visualmente indistinguibles.	La utilización de la microespectrofotometría (MSP) destaca por medir interacciones de radiación en muestras extremadamente pequeñas. Sin embargo, persiste la limitación de interferencia por parte del polímero en las fibras de lana, donde la queratina presenta una fuerte absorción de radiación ultravioleta. Este fenómeno, conocido como "efecto de queratina", restringe el análisis confiable principalmente al rango visible y UV-A, siendo menos efectiva por debajo de los 320 nm.

Se ha encontrado que el uso de portaobjetos de cuarzo y glicerina es esencial para evitar la absorción del vidrio por debajo de los 320 nm, lo que deja detectar picos diagnósticos en fibras de algodón y olefinas (Almer et al., 2010). Sin embargo, polímeros como la lana, la seda y el poliéster presentan una limitación técnica intrínseca al absorber intensamente por debajo de los 310 nm, que generando interferencias que pueden enmascarar la señal de los colorantes en el UV profundo (Almer et al., 2010; Starczak & Wąs-Gubała, 2016).

La incorporación de luz polarizada plana en la microespectrofotometría (MSP-PPL) a permitido cuantificar el dicroísmo lineal, revelando cómo se orientan molecularmente los tintes respecto a las cadenas del polímero. Empleando un sistema Tidas 800 (J&M), se ha demostrado que el poliéster teñido con colorantes dispersos exhibe efectos dicroicos significativos, alcanzando una relación dicroica (R) máxima de 4.3 en el amarillo disperso 56 (De Wael & Vanden Driessche, 2011). En donde estudios comparativos indican que la magnitud de este fenómeno sigue un orden decreciente desde la poliamida hacia el poliéster y los acetatos, permitiendo diferenciar fibras con perfiles de color idénticos pero distintos procesos de estiramiento y manufactura (De Wael, 2012; De Wael & Lepot, 2012).

En casos de homicidio, el uso de instrumentos M-800 permitió identificar densidades de fibras de lana verde amarillenta que contradecían las versiones de los sospechosos, consolidando la objetividad técnica sobre las pruebas testimoniales (Suzuki et al., 2009). Asimismo, el seguimiento instrumental durante 14 días ha permitido modelar la cinética de degradación de los tintes frente a detergentes comerciales, identificando que la mayor pérdida de colorante ocurre en los primeros seis días de tratamiento (Was-Gubala & Grzesiak, 2010). Por lo que la detección de variaciones sutiles en lotes de tinte mediante la microespectrofotometría en el rango UV (370-390 nm) ofrece un nivel de individualización superior al microscópico tradicional. Utilizando equipos Zeiss UMSP 50/80, se ha logrado diferenciar lotes de fibras acrílicas y de viscosa que presentaban picos de absorción coincidentes en el visible pero discrepantes en el ultravioleta (Wiggins & Holness, 2005).

La recolección de estos estudios se hizo con la finalidad de contribuir al conocimiento actual al demostrar que la integración de tratamientos matemáticos avanzados, optimización por software y creación en base de datos

refuerza la utilización de microespectrofotometría como una técnica analítica objetiva y cuantitativa. De la misma manera se recopilo metodologías y técnicas menos utilizadas como el acople a luz polarizada que destaca por ser una técnica capaz de diferenciar el dicroísmo en fibras, algo novedoso y útil en este tipo de muestras que antes por su variación colorimétrica era una limitante al momento de poder realizar su clasificación por métodos tradicionales.

Entre las futuras áreas que podrían llegar a impulsar a la MPS se encuentran los estudios en pruebas de hipótesis asimétricas, donde la cantidad de fibras recolectas son íntimamente pequeñas para la comparación con una gran cantidad de fibras patrón o sospechosas, esto con la finalidad de crear vinculación entre víctimas y sospechosos, se debe complementar los estudios con estos tratamientos matemáticos con el fin de reconocer cual es la cantidad mínima necesaria de muestras analizadas sin perder drásticamente el valor discriminativo de estas. De igual manera en un futuro se debería seguir los estudios de límites de detención con diferentes tipos de colorantes, ya que los estudios actuales no llegan más allá de los colores primarios; finalmente conocer el comportamiento de foto degradación, degradación química, y degradación ambiental bajo esta técnica seria de alta importancia al crear patrones que ayudarían a determinar el tiempo trascurrido desde el hecho delictivo o si hubo manipulación de la muestra con el fin de ocultar los sucesos.

Se resalta que en la recolección de datos se utilizaron los filtros antes mencionados, especialmente la exclusión por tiempo como un cribado preliminar en la búsqueda. En las 6 base de datos se recopilo en Scopus 21 artículos de los cuales 4 fueron excluidos; en la plataforma Wed of Science se recolecto un total de 471 informes donde 304 fueron descartados; en el repositorio de datos de Science Direct se encontró 261 artículos de los cuales 183 fueron descartados, en el caso de Pud Med se recolectaron 7 informes de los cuales 4 fueron excluidos, para Oxford University se identificaron 11 artículos de los cuales 7 no cumplieron con los parámetros establecidos finalmente, en el repositorio de Springer se cataron 11 fuentes de las cuáles todas fueron rechazadas debido a tratarse de artículos con aseso restringidos. En retrospectiva se encontraron 782 artículos en total de los cuales solo 269 pasaron aprobatoriamente por el cribado preliminar en el cual se puedo a ver incurrido en sesgo de igual manera se declara que para ser este cribado se basa exclusivamente en los filtros por tiempo que tenía asociada cada base de datos además de la búsqueda exacta del término microspectrophotometry.

4. CONCLUSIONES

La evidencia técnica recolectada en esta revisión sistemática permite concluir que la microespectrofotometría (MSP) es reconocida como estándar para la discriminación de fibras en donde su implementación trasciende la simple comparación visual de color para transformar la en un proceso instrumental, objetivo, reproducible y con una sólida base estadística (Palenik et al., 2016). Siendo el principal en foque de esta revisión su aplicación en el ámbito forense y partiendo como base el principio de intercambio de Locard, siendo la identificación de fibras textiles una de las herramientas más robustas en la reconstrucción criminal, debido a que el contacto físico entre objetos y personas genera inevitablemente un flujo constante de microevidencias que actúan como "testigos mudos" de la actividad delictiva, permitiendo establecer conexiones críticas entre sospechosos, víctimas y lugares (Houck, 2003; Nagwanshi et al., 2025).

La superioridad de la persistencia técnica de las fibras frente a condiciones ambientales extremas siendo superior en comparación con otros elementos como los fluidos biológicos con ADN, los cuales suelen presentar una degradación irreversible en escenarios donde los polímeros textiles mantienen sus firmas químicas estables (Cammarota et al., 2019; Lepot et al., 2017). Donde se concluye que la resolución analítica de la técnica permite abordar con éxito el complejo fenómeno del metamerismo, y es aquí donde muestras que aparentan ser idénticas bajo luz blanca revelan firmas espectrales de absorbancia drásticamente diferentes debido a sutiles variaciones en la composición molecular del colorante que solo la aplicación de técnicas de MPS puede detectar (Zięba-Palus & Trzcińska, 2012)

En este contexto, se ha demostrado que el uso de la MSP permite alcanzar poderes discriminantes (DP) superiores a 0.999 incluso en fibras consideradas "ubicuas" o extremadamente comunes y que han sido en múltiples casos desechadas como material probatorio, como es el caso de algodón azul y rojo, lo que refuta técnicamente la percepción tradicional de que estos materiales carecen de valor investigativo por su alta frecuencia en el mercado (Biermann, 2007). No obstante, para el análisis de fibras incoloras o pálidas, donde el rango visible ofrece

información limitada, se determinó que resulta imperativo integrar la técnica con métodos complementarios como la microespectroscopía infrarroja (FTIR) para evaluar parámetros de cristalinidad y relaciones de comonómeros, garantizando una diferenciación cuantitativa basada en la estructura química profunda del polímero (Causin et al., 2005).

El avance metodológico más importante encontrado es la microespectrofotometría con luz polarizada plana (MSP-PPL), la cual permite cuantificar el dicroísmo lineal en fibras textiles teñidas y pigmentadas. Esta metodología revela la orientación molecular de los colorantes respecto a las cadenas del polímero, proporcionando un nivel de individualización superior capaz de distinguir fibras con perfiles cromáticos idénticos pero con distintos procesos de manufactura o estiramiento molecular, se debe resaltar que es una metodología en avance y son pocos los estudios realizados con ellos y su reproducibilidad es drásticamente afecta por el posicionamiento correcto de la fibra a evaluar (De Wael & Vanden Driessche, 2011). De igual manera esta especificidad resulta vital en el estudio de materiales pigmentados o "dope dyed", donde la detección de dicroísmo inverso permite identificar granos de pigmento específicos, como la Ftalocianina de cobre, que no podrían ser individualizados mediante inspecciones ópticas convencionales (De Wael, 2012).

Complementariamente, la extensión al rango ultravioleta (240-380 nm) se establece como un protocolo necesario para detectar agentes blanqueadores ópticos y aditivos químicos de fabricación o hasta contaminantes, incrementando la eficiencia del cribado primario en un 7% adicional respecto al análisis visible estándar (Almer et al., 2010; Palmer et al., 2009).Aunque no se ha investigado conocer su interacción con bloqueadores ópticos podría llegar a determina si hubo manipulación de esta evidencia.

En lo referente a la sensibilidad instrumental, la revisión destaca que la técnica ha logrado identificar componentes diagnósticos en concentraciones de carga de tintes específicos tan bajas como el 0.18% p/p, estableciendo un umbral en el que, siempre que una traza muestre coloración visual bajo el microscopio, la MSP será capaz de generar un espectro válido para un cotejo objetivo (Massonnet et al., 2012; Was-Gubala & Grzesiak, 2010). De igual manera para maximizar esta sensibilidad, es fundamental el uso de portaobjetos de cuarzo y glicerina, evitando así las interferencias de absorción del vidrio por debajo de los 320 nm que suelen enmascarar señales críticas de aditivos químicos (Almer et al., 2010).

La revisión también subraya el papel fundamental del tratamiento matemático y quimiométrico avanzado en la eliminación de la subjetividad pericial. El empleo de la primera derivada junto con el suavizado Savitzky-Golay se identifica como una práctica estándar para resolver hombros espectrales y puntos de inflexión en picos anchos, permitiendo una comparación de picos mucho más precisa (Wiggins et al., 2007) y la integración de pruebas de hipótesis de dos muestras con un método de remuestreo tipo bootstrap de 10000 interacciones ha demostrado ser capaz de reducir las tasas de error de falsas inclusiones a niveles cercanos al 0% (Itamiya et al., 2024). Además del uso de algoritmos de aprendizaje automático como Lasso ha alcanzado precisiones predictivas del 96.6% en la clasificación de fibras acrílicas, superando el desempeño de los métodos multivariantes tradicionales como el Análisis de Componentes Principales (PCA), el cual, aunque no selecciona variables, sigue siendo indispensable para describir más del 98% de la varianza total en comparaciones complejas (Rich et al., 2020; Sauzier et al., 2016).

Se determino que factores externos como el historial de uso y el lavado influyen drásticamente en la señal espectral. El estudio de la cinética de alteración cromática revela que la mayor pérdida de colorante frente a detergentes comerciales ocurre en los primeros seis días de tratamiento, siendo las fibras naturales como la lana las más susceptibles a estos cambios (Was-Gubala & Grzesiak, 2010). Se puede identificar con la MPS blanqueadores fluorescentes provenientes de detergentes específicos adsorbidos en la superficie de la fibra permitiendo rastrear el historial de lavado de una microevidencia de manera preliminar, proporcionando una capa adicional de individualización sin necesidad de procesos de extracción química(Heider et al., 2016).

Otra información relevante es el desarrollo de bases de datos masivas con más de 25000 espectros normalizados y derivados se consolida como un pilar estratégico de la inteligencia forense, lo que se espera en un futuro la resolución de casos mediante el uso de correlaciones matemáticas automatizadas como el Coeficiente de Correlación de Pearson Modificado (MPCC) (Powell et al., 2018, 2021). No obstante, se requiere profundizar en el estudio de las pruebas de hipótesis asimétricas, donde el tamaño de la muestra cuestionada es limitado, y en la validación de técnicas de espectroscopía Raman de resonancia para obtener firmas moleculares detalladas en

colorantes negros altamente absorbentes que desafían a la MSP convencional por lo que se requiere su integración en metodologías definidas (Abbott et al., 2010). Finalmente, el éxito judicial de estos hallazgos depende de una interpretación rigurosa del estudio en poblaciones de fondo, que permitan reducir el tamaño de los grupos de fibras coincidentes por azar y elevar la certeza jurídica de los resultados presentadas ante los tribunales de justicia (Cammarota et al., 2019; Houck, 2003).

5. AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos van dedicados especialmente al director de este trabajo por su acompañamiento y guía durante el desarrollo y a la universidad Santiago de Cali al proporcionar los recursos tecnológicos (acceso a las bases de datos) necesarias para el desarrollo y la culminación de este proyecto.

6. DECLARACN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, L. C., Batchelor, S. N., Smith, J. R. L., & Moore, J. N. (2010). Resonance Raman and UV-visible spectroscopy of black dyes on textiles. *Forensic Science International*, *202*(1–3), 54–63. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.04.026.

Aljannahi, A., Alblooshi, R. A., Alremeithi, R. H., Karamitsos, I., Ahli, N. A., Askar, A. M., Albastaki, I. M., Ahli, M. M., & Modak, S. (2022). Forensic Analysis of Textile Synthetic Fibers Using a FT-IR Spectroscopy Approach. *Molecules*, *27*(13). https://doi.org/10.3390/molecules27134281.

Almer, J., Mcansh, E., & Doupe, B. (2010). Forensic Fibre Analysis by UV-Visible Microspectrophotometry. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, *43*(1), 16–30. https://doi.org/10.1080/00085030.2010.10757617.

Anderson, B. R., Gese, N., & Eilers, H. (2023). Comparison of Novel Raman Techniques for Fiber Forensics. *Optics*, *4*(3), 447–458. https://doi.org/10.3390/opt4030032.

Bianchi, F., Riboni, N., Trolla, V., Furlan, G., Avantaggiato, G., Iacobellis, G., & Careri, M. (2016). Differentiation of aged fibers by Raman spectroscopy and multivariate data analysis. *Talanta*, *154*, 467–473. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.04.013.

Biermann, T. W. (2007). Blocks of colour IV: The evidential value of blue and red cotton fibres. *Science & Justice*, *47*(2), 68–87. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2006.08.001.

Cammarota, V., Schnegg, M., & Massonnet, G. (2019). A study of background population of fibres on knife blades. *Forensic Science International*, *296*, 132–143. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.01.006.

Causin, V., Marega, C., Schiavone, S., & Marigo, A. (2005). A quantitative differentiation method for acrylic fibers by infrared spectroscopy. *Forensic Science International*, *151*(2–3), 125–131. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.02.004.

Chauhan, S., Gupta, L., & Sharma, S. (2025). A systematic review on the analysis of trace materials via Raman spectroscopy: Advancements and forensic implications. In *Forensic Science International* (Vol. 377). Elsevier Ireland Ltd. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2025.112609.

De Wael, K. (2012). Dichroism measurements in forensic fibre examination. Part 4—dyed acrylic and acetate fibres. *Science & Justice*, *52*(2), 81–89. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2011.08.005.

De Wael, K., & Lepot, L. (2012). Dichroism measurements in forensic fibre examination. Part 5-Pigmented fibres. *Science and Justice*, *52*(3), 161–167. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2011.10.002.

De Wael, K., Lepot, L., & Lunstroot, K. (2012). The use of linear dichroism in forensic fibre examinations - Part 6. Validation and practical aspects of MSP-PPL. *Science and Justice*, *52*(4), 249–258. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2011.11.003.

De Wael, K., & Vanden Driessche, T. (2011). Dichroism measurements in forensic fibre examination. Part 1 - Dyed polyester fibres. *Science and Justice*, *51*(2), 57–67. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2010.10.001.

Forster, A. L., Bitter, J. L., Rosenthal, S., Brooks, S., & Watson, S. S. (2017). Photofading in cotton fibers dyed using red, yellow, and blue direct dyes during examination with microspectrophotometry (MSP). *Forensic Chemistry*, *5*, 72–78. https://doi.org/10.1016/j.forc.2017.06.006.

Goodpaster, J. V., & Liszewski, E. A. (2009). Forensic analysis of dyed textile fibers. In *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (Vol. 394, Number 8, pp. 2009–2018). https://doi.org/10.1007/s00216-009-2885-7.

Grieve, M. C., Biermann, T. W., & Schaub, K. (2006). The use of indigo derivatives to dye denim material. *Science & Justice*, *46*(1), 15–24. https://doi.org/10.1016/S1355-0306(06)71563-5.

Heider, E. C., Mujumdar, N., & Campiglia, A. D. (2016). Identification of detergents for forensic fiber analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *408*(28), 7935–7943. https://doi.org/10.1007/s00216-016-9927-8.

Houck, M. M. (2003). Inter-comparison of unrelated fiber evidence. *Forensic Science International*, *135*(2), 146–149. https://doi.org/10.1016/S0379-0738(03)00195-6.

Hu, C., Mei, H., Guo, H., & Zhu, J. (2020). Color analysis of textile fibers by microspectrophotometry. In *Forensic Chemistry* (Vol. 18). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.forc.2020.100221.

Itamiya, H., Oda, R., Yanagihara, H., Kasamatsu, M., & Tsuge, K. (2024). Forensic discrimination of fiber microspectrophotometry data by resampling and repeating two-sample hypothesis testing. *Microchemical Journal*, *206*, 111440. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111440.

Lepot, L., Vanden Driessche, T., Lunstroot, K., Barret, A., Gason, F., & De Wael, K. (2017). Extraneous fibre traces brought by river water — A case study. *Science & Justice*, *57*(1), 53–57. https://doi.org/10.1016/J.SCIJUS.2016.10.006.

Lunstroot, K., Ziernicki, D., & Vanden Driessche, T. (2016). A study of black fleece garments: Can fleece fibres be recognized and how variable are they? *Science and Justice*, *56*(3), 157–164. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2015.12.006.

Mane, M., & Devika, G. (2022). Study on transfer and persistence of fibers: A systematic review. In *Journal of Forensic Science and Medicine* (Vol. 8, Number 2, pp. 68–75). Wolters Kluwer Medknow Publications. https://doi.org/10.4103/jfsm.jfsm_59_21.

Marchal González, A. N. (2023). La cadena de custodia y su impacto en el proceso judicial. *Revista Vía Iuris*, (35), 214–251. https://doi.org/10.37511/viaiuris.n35a6.

Markstrom, L. J., & Mabbott, G. A. (2011). Obtaining absorption spectra from single textile fibers using a liquid crystal tunable filter microspectrophotometer. *Forensic Science International*, *209*(1–3), 108–112. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.01.014.

Marnane, R. N., Elliot, D. A., & Coulson, S. A. (2006). A Pilot Study to Determine the Background Population of Foreign Fibre Groups on a cotton/polyester T-shirt. *Science & Justice*, *46*(4), 215–220. https://doi.org/10.1016/S1355-0306(06)71601-X.

Massonnet, G., Buzzini, P., Monard, F., Jochem, G., Fido, L., Bell, S., Stauber, M., Coyle, T., Roux, C., Hemmings, J., Leijenhorst, H., Van Zanten, Z., Wiggins, K., Smith, C., Chabli, S., Sauneuf, T., Rosengarten, A., Meile, C., Ketterer, S., & Blumer, A. (2012). Raman spectroscopy and microspectrophotometry of reactive dyes on cotton fibres: Analysis and detection limits. *Forensic Science International*, *222*(1–3), 200–207. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.05.025.

Nagwanshi, B. K., Kosariya, S. S., Bhagat, P., Kujur, K., Thakur, V. S., & Tiwari, S. (2025). The Role of the Scientific Method in Forensic Crime Scene Investigation: A Vehicular Homicide Case Study. *Saudi Journal of Biomedical Research*, *10*(09), 293–297. https://doi.org/10.36348/sjbr.2025.v10i09.001.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

Palenik, C. S., Beckert, J. C., & Palenik, S. (2016). *Microspectrophotometry of Fibers: Advances in Analysis and Interpretation*.

Palmer, R., Hutchinson, W., & Fryer, V. (2009). The discrimination of (non-denim) blue cotton. *Science and Justice*, *49*(1), 12–18. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2008.07.001.

Powell, R., Collins, P., Horsley, G., Coumbaros, J., & van Bronswijk, W. (2021). Enhancing the evidential value of textile fibres Part 2: Application of a database-driven fibre comparison strategy to a cold-case investigation. *Forensic Science International*, *325*, 110894. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110894.

Powell, R., van Bronswijk, W., & Coumbaros, J. (2018). Enhancing the evidential value of textile fibres: Part 1: Development of a spectral database and evaluative comparison strategy. *Forensic Science International*, *287*, 54–62. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.025.

Rashed, H. S., Mishra, P., Nordon, A., Palmer, D. S., & Baker, M. J. (2021). A comparative investigation of two handheld near-ir spectrometers for direct forensic examination of fibres in-situ. *Vibrational Spectroscopy*, *113*, 103205. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103205.

Reichard, E. J., Bartick, E. G., Morgan, S. L., & Goodpaster, J. V. (2017). Microspectrophotometric analysis of yellow polyester fiber dye loadings with chemometric techniques. *Forensic Chemistry*, *3*, 21–27. https://doi.org/10.1016/j.forc.2016.11.001.

Rich, D. C., Livingston, K. M., & Morgan, S. L. (2020). Evaluating performance of Lasso relative to PCA and LDA to classify dyes on fibers. *Forensic Chemistry*, *18*, 100213. https://doi.org/10.1016/j.forc.2020.100213.

Sano, T., & Suzuki, S. (2009). Basic forensic identification of artificial leather for hit-and-run cases. *Forensic Science International*, *192*(1–3), e27–e32. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.08.018.

Sauzier, G., Reichard, E., van Bronswijk, W., Lewis, S. W., & Goodpaster, J. V. (2016). Improving the confidence of “questioned versus known” fiber comparisons using microspectrophotometry and chemometrics. *Forensic Chemistry*, *2*, 15–21. https://doi.org/10.1016/j.forc.2016.08.001.

Schnegg, M., Palmer, R., & Massonnet, G. (2018). Les paramètres clés de l'interprétation des fibres textiles en sciences criminelles. Partie I: Occurrence et bruit de fond. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, *51*(1), 1–25. https://doi.org/10.1080/00085030.2017.1379683.

Sharma, V., Kumar, R., & Kaur, P. (2019). Forensic Examination of Textile Fibers Using UV-Vis Spectroscopy Combined with Multivariate Analysis. *Journal of Applied Spectroscopy*, *86*(1), 96–100. https://doi.org/10.1007/s10812-019-00787-4.

Sharma, V., Mahara, M., & Sharma, A. (2024). On the textile fibre's analysis for forensics, utilizing FTIR spectroscopy and machine learning methods. *Forensic Chemistry*, *39*. https://doi.org/10.1016/j.forc.2024.100576.

Starczak, R., & Wąs-Gubała, J. (2016). UV–Vis microspectrophotometric study of wool and polyamide fibres dyed with analogous gryfalan dyes. *Dyes and Pigments*, *132*, 58–63. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.04.041.

Suzuki, S., Higashikawa, Y., Sugita, R., & Suzuki, Y. (2009). Guilty by his fibers: suspect confession versus textile fibers reconstructed simulation. *Forensic Science International*, *189*(1–3), e27–e32. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.03.035.

Takahara, H., Matsuda, W., Kusakabe, Y., Ikeda, S., Kuraoka, M., KOMATSU, H., & Nishiwaki, Y. (2021). An evaluation of total reflection x-ray fluorescence as a tool for forensic discrimination of single polyester fibers. *Analytical Sciences*, *37*(8), 1123–1129. https://doi.org/10.2116/analsci.20P348.

Was-Gubala, J., & Grzesiak, E. (2010). The kinetics of colour change in textiles and fibres treated with detergent solutions. Part II - Spectrophotometric measurements. *Science and Justice*, *50*(2), 55–58. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2009.05.002.

Wąs-Gubała, J., Skóra, K., & Brożek-Mucha, Z. (2021). Characterisation and discrimination of so-called metallised fibres found in clothing and decorative materials originating from the consumer market. *Science and Justice*, *61*(5), 535–541. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2021.06.012.

Was-Gubala, J., & Starczak, R. (2015). UV-Vis microspectrophotometry as a method of differentiation between cotton fibre evidence coloured with reactive dyes. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *142*, 118–125. https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.01.116.

Wiggins, K., & Drummond, P. (2007). Identifying a suitable mounting medium for use in forensic fibre examination. *Science and Justice*, *47*(1), 2–8. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2006.10.001.

Wiggins, K., & Holness, J.-A. (2005). A further study of dye batch variation in textile and carpet fibres. *Science & Justice*, *45*(2), 93–96. https://doi.org/10.1016/S1355-0306(05)71634-8.

Wiggins, K., Palmer, R., Hutchinson, W., & Drummond, P. (2007). An investigation into the use of calculating the first derivative of absorbance spectra as a tool for forensic fibre analysis. *Science & Justice*, *47*(1), 9–18. https://doi.org/10.1016/j.scijus.2006.11.001.

Zapata, F., Ortega-Ojeda, F. E., & García-Ruiz, C. (2022). Forensic examination of textile fibres using Raman imaging and multivariate analysis. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *268*. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120695.

Ziba-Palus, J., & Ws-Gubała, J. (2011). An investigation into the use of micro-Raman spectroscopy for the analysis of car paints and single textile fibres. *Journal of Molecular Structure*, *993*(1–3), 127–133. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.041.

Zięba-Palus, J., & Trzcińska, B. M. (2012). Comparing the Color of Forensic Traces. *Analytical Letters*, *45*(11), 1333–1346. https://doi.org/10.1080/00032719.2012.675483.