



**Somos calidad,
somos USC**

Avances en Técnicas Espectroscópicas para la Detección y Análisis de Drogas Sintéticas en Química Forense: Una Revisión Sistémica

Autor

Vanessa Alexandra Torres Muñoz

**Título por el que opta
Química Farmacéutica**

Director

Dennis Mauricio Ocampo

Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente (GIEMA)

Línea de Investigación: Aseguramiento de la Calidad

**Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química Farmacéutica
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Visibilidad de las aplicaciones de técnicas espectroscópicas avanzadas para la detección rápida y precisa de drogas sintéticas.	Instituciones de salud pública y autoridades judiciales que optimizan recursos para la identificación eficiente de sustancias ilícitas.
Responsabilidad social	Mejora en la detección de drogas sintéticas, contribuyendo a la reducción de riesgos asociados al consumo y tráfico de estas sustancias.	Comunidades afectadas por el tráfico de drogas, autoridades encargadas de la seguridad pública y la justicia.
Científico	Nuevas metodologías espectroscópicas aplicadas en química forense para el análisis preciso y confiable de drogas sintéticas.	Comunidad científica y académica, enfocada en la mejora de tecnologías de análisis y seguridad pública.
Indicadores de Gestión	Optimización de los protocolos de análisis forense en la detección de drogas sintéticas mediante espectroscopía.	Organismos reguladores y fuerzas de seguridad que adoptan tecnologías más eficientes para la lucha contra el narcotráfico.
Tecnológico	Avances en dispositivos espectroscópicos que permiten la detección in situ y de alta sensibilidad de compuestos sintéticos.	Empresas tecnológicas y de seguridad, mejorando la capacidad de intervención en situaciones críticas y controladas.
Técnico	Innovación en la aplicación de espectroscopía en campo forense, con procedimientos más rápidos y menos invasivos.	Laboratorios forenses, policías y expertos en toxicología que implementan nuevas técnicas para la identificación de drogas.
Ambiental	Reducción del uso de químicos y materiales peligrosos en el proceso de análisis forense mediante técnicas no destructivas.	Medio ambiente, al reducir el impacto ambiental relacionado con el análisis de drogas, promoviendo métodos más ecológicos.
Social	Contribución a la seguridad y salud pública mediante la mejora en la detección de drogas y la lucha contra el crimen organizado.	La sociedad en general, beneficiándose de una mayor seguridad y reducción en los delitos relacionados con las drogas.
Cultural	Promoción de la conciencia social sobre la importancia de técnicas avanzadas para enfrentar el consumo y tráfico de drogas sintéticas.	Comunidades afectadas por el consumo de drogas sintéticas, promoviendo una cultura de prevención y educación sobre los riesgos asociados.

Avances en Técnicas Espectroscópicas para la Detección y Análisis de Drogas Sintéticas en Química Forense: Una Revisión Sistémica.

Vanessa Alexandra Torres Muñoz (Vanessa.torres01@usc.edu.co)

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

RESUMEN

El uso ilícito y el tráfico de drogas sintéticas se han expandido rápidamente a escala global y los métodos tradicionales de detección enfrentan desafíos para mantenerse al día con las nuevas estructuras moleculares que aparecen en el mercado de drogas de abuso. En este sentido, las técnicas de recolección espectroscópica han demostrado ser métodos útiles en la química forense de estos compuestos. La espectroscopía Raman, la espectroscopía NIR, la espectroscopía RMN y la espectroscopía FTIR son algunas de las muchas técnicas importantes para el análisis rápido, no invasivo y en tiempo real debido a la pronta identificación de drogas en matrices complejas; sin embargo, la implementación de estas metodologías enfrenta problemas de interferencias de matriz intensas, optimización tediosa y/o ausencia de bibliotecas espectrales que contengan drogas sintéticas. No obstante, la miniaturización de los instrumentos, la implementación de la inteligencia artificial y la presencia de espectrómetros Raman portátiles están convirtiendo estas técnicas en más accesibles y eficientes, particularmente en ubicaciones sobre el terreno; para superar estas limitaciones y ayudar en la lucha contra el tráfico ilícito de drogas, especialmente en países como Colombia, donde se está proliferando cada vez más la aparición de nuevas sustancias psicoactivas, es esencial que haya más avances en la tecnología espectroscópica, así como más personal forense especializado.

Palabras clave: *Técnicas espectroscópicas; drogas sintéticas; química forense; sustancias ilícitas.*

Advances in Spectroscopic Techniques for the Detection and Analysis of Synthetic Drugs in Forensic Chemistry: A Systemic Review.

ABSTRACT

The illicit use and trafficking of synthetic drugs have rapidly expanded on a global scale, and traditional detection methods face challenges in keeping up with the new molecular structures emerging in the market of drugs of abuse. In this context, spectroscopic collection techniques have proven to be valuable methods in the forensic chemistry of these compounds. Raman spectroscopy, NIR spectroscopy, NMR spectroscopy, and FTIR spectroscopy are among the many important techniques for rapid, non-invasive, and real-time analysis due to their ability to promptly identify drugs in complex matrices. However, the implementation of these methodologies faces challenges such as strong matrix interferences, tedious optimization processes, and/or the lack of spectral libraries containing synthetic drugs. Nonetheless, the miniaturization of instruments, the integration of artificial intelligence, and the availability of portable

Raman spectrometers are making these techniques more accessible and efficient, particularly for field applications. To overcome these limitations and aid in the fight against illicit drug trafficking especially in countries like Colombia, where the emergence of new psychoactive substances is increasingly prevalent it is essential to achieve further advancements in spectroscopic technology, as well as to increase the number of specialized forensic personnel.

Keywords: *Spectroscopic techniques; synthetic drugs; forensic chemistry; illicit substances.*

HIGHLIGHTS

- Los métodos espectroscópicos proporcionan un análisis rápido, no invasivo y en tiempo real para la verificación de drogas sintéticas.
- Las técnicas Raman, NIR, RMN y FTIR tienen un gran potencial para su uso en ambientes biológicos y complejos.
- La modificación estructural de las drogas de las sintéticas dificulta su análisis con métodos tradicionales.
- La inteligencia artificial y la miniaturización del equipo mejoran la portabilidad y la precisión del análisis espectroscópico.
- Es necesario mantener y capacitar al personal forense para combatir la continua evolución de nuevas sustancias psicoactivas.

1. Introducción

El abuso y comercio de drogas sintéticas representan un problema global creciente debido a la variedad y complejidad en la estructura de estas sustancias, que se han vuelto tan sofisticadas que eluden la monitorización clásica y han dejado de ser sustancias previsibles. En química forense, la caracterización definitiva de estas drogas es esencial para propósitos de aplicación de la ley y para asegurar una mayor protección de la salud pública (1,2). No obstante, los métodos analíticos tradicionales están limitados por la complejidad estructural y la variabilidad estructural de estos compuestos; por lo cual la aplicación de las técnicas espectroscópicas más modernas se ha vuelto esencial para la identificación y caracterización de drogas sintéticas (3,4). Los términos “drogas sintéticas” se refieren a químicos que están diseñados específicamente en laboratorio para producir efectos similares a los de las drogas controladas, con alteraciones estructurales que hacen que su clasificación y detección sean más desafiantes mediante herramientas convencionales (5,6). Ejemplos son los cannabinoides sintéticos, catinonas sustituidas, opioides sintéticos y derivados de fenetilamina, entre otros (5,6).

La rápida aparición de nuevos derivados, facilitada por la capacidad de los productores clandestinos para modificar estructuras químicas y evitar la legislación, ha llevado a los análisis forenses a enfrentar la dificultad de tratar con muchas sustancias que no aparecen en las bases de datos de referencia en análisis rutinarios de laboratorio (7,8). Los métodos espectroscópicos se vuelven útiles, ya que han surgido ofreciendo detalles estructurales, son muy sensibles y en cierta medida, no destructivos y permiten la detección en tiempo real. Así, la espectroscopía Raman ha evidenciado el potencial para encontrar drogas en el campo, a través de empaques y en mezclas sucias, mientras que la

espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (NMR) mejoraron las posibilidades de elucidación química con un mínimo tratamiento previo de las muestras (9-11).

La espectroscopía ATR-FTIR, como una técnica directa, rápida y relativamente económica, ha sido estudiada por Sangamnerkar (2023) para cuantificar metanfetaminas en suero y orina; los resultados indicaron que este método conveniente, sin ningún tratamiento previo de las muestras, tenía sensibilidades en suero y orina alrededor del 91 y 95.5%, respectivamente, y fue prometedor en la toxicología forense y clínica (12). Otra investigación realizada por Sunil et al. (2023) describió el uso de la espectroscopía Raman en el estudio de marcos organometálicos (MOFs), que proporciona datos en tiempo real sobre sitios de adsorción y defectos estructurales; su estudio destacó la capacidad potencial de la espectroscopía Raman en el campo de las pruebas operativas y el almacenamiento de energía (13).

Las metodologías espectroscópicas se basan en la interacción de la materia con la radiación electromagnética y son capaces de identificar y caracterizar materiales por su capacidad para absorber, emitir o dispersar energía; cada compuesto tiene una huella digital (espectral) única, lo que ayuda a su detección en diferentes matrices (14). Los métodos más frecuentemente utilizados son las espectroscopías de infrarrojo (IR), Raman, ultravioleta-visible (UV-Vis) y fluorescencia; estas metodologías son muy importantes en química forense, ya que proporcionan la determinación rápida y no destructiva de drogas sintéticas en fluidos biológicos y sustancias confiscadas (15). Sin embargo, incluso con el progreso realizado en estas tecnologías, su uso en laboratorios forenses aún presenta varios desafíos; los principales inconvenientes son el costo y mantenimiento del equipo, la experiencia e interpretación de los datos espectroscópicos por parte de personal bien capacitado, la implementación de enfoques estándar validados a nivel forense, así como la actualización de las bases de datos espectrales que incluyan nuevas drogas sintéticas que se comercializan constantemente, lo que limita el uso generalizado y la accesibilidad de estas técnicas por parte de numerosos laboratorios forenses, particularmente en países de bajos recursos (16,17)

Para Colombia, un país que experimenta un problema económico y social asociado con el tráfico y consumo de drogas ilegales, la detección de drogas sintéticas ha cobrado más importancia en los últimos años como resultado de la expansión de nuevas sustancias psicoactivas en el mercado ilícito mundial de drogas (18). A pesar del avance de técnicas analíticas en muertes violentas, la detección de drogas representa un desafío en los laboratorios, necesitando así de técnicas avanzadas y fortaleciendo la capacidad analítica de los organismos responsables (18,19). Es la implementación de métodos espectroscópicos recientes lo que puede, en este caso, ser una solución favorable para la identificación de drogas sintéticas en el entorno forense nacional.

En la clasificación del Grupo de Trabajo Científico para el Análisis de Drogas Incautadas (SWGDRUG), que es una referencia académica altamente confiable y reconocida mundialmente en el área técnico-científica en el campo forense, las técnicas espectroscópicas de dispersión energética con Raman, IR y NMR resultan ser altamente sensibles. Dichas técnicas proporcionan información esencial para la identificación de muestras de drogas incautadas, sugiriendo aplicaciones prometedoras en el cribado y detección de drogas sintéticas (20,21).

1.1. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los avances y tendencias en las técnicas espectroscópicas para la detección y análisis de drogas sintéticas en química forense?

1.2. Objetivos

Objetivo General: Realizar una revisión sistemática sobre los desafíos y avances en técnicas espectroscópicas aplicadas a la detección y análisis de drogas sintéticas en química forense.

Objetivos Específicos:

1. Identificar estudios de los últimos avances de técnicas espectroscopias para la identificación de drogas sintéticas.
2. Comparar ventajas y limitaciones de las técnicas espectroscópicas más recientes con métodos tradicionales de análisis forense.
3. Identificar los desafíos y avances recientes en el uso de técnicas espectroscópicas utilizadas en la detección de drogas sintéticas.

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo de acuerdo con el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) con el fin de evaluar nuevas técnicas espectroscópicas utilizadas para la identificación y el estudio en el área de drogas sintéticas en química forense.

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión

Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos electrónicas conocidas desde 2018 hasta 2025 para artículos científicos, utilizando las siguientes bases de datos: PubMed, Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La búsqueda empleó términos MeSH (Medical Subject Headings), así como palabras clave para "espectroscopía Raman", "espectroscopía infrarroja", "espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN)", "detección de drogas sintéticas", "química forense" y "técnicas analíticas forenses". Se usaron operadores BOOLEANOS ('AND', 'OR' y 'NOT') para mejorar la relevancia de los hallazgos. Además, también se revisaron las referencias de los estudios seleccionados para buscar otros estudios relacionados.

Criterios de inclusión:

- Artículos publicados en inglés y español entre 2018 y 2025.
- Estudios que analizaran el uso de técnicas espectroscópicas en la detección de drogas sintéticas en el ámbito forense.
- Investigaciones que evaluaran la sensibilidad, especificidad y precisión de dichas técnicas en comparación con otros métodos analíticos.
- Revisiones sistemáticas y reportes forenses relevantes.

Criterios de exclusión:

- Estudios sin acceso al texto completo.
- Estudios que no abordaran específicamente la detección de drogas sintéticas mediante espectroscopía.
- Investigaciones duplicadas, cartas al editor o comentarios carentes de datos experimentales.

2.2. Fuentes de información

La búsqueda de artículos relevantes para la investigación se llevará a cabo en las siguientes bases de datos bibliográficas, durante el periodo de 2018 a 2025:

- Scopus
- PubMed
- Science Direct
- Google Académico
- Pubmed

2.3. Búsqueda

Tabla 1. *Matriz de términos para la búsqueda de literatura.*

N°	TÉRMINOS	MESH
1	Espectroscopía Raman	Raman Spectroscopy
2	Espectroscopía infrarroja	Infrared Spectroscopy
3	Resonancia magnética nuclear	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy
4	Detección de drogas sintéticas	<i>Synthetic Drugs Detection / Illicit Drugs</i>
5	Química forense	<i>Forensic Chemistry / Forensic Sciences</i>
6	Técnicas analíticas forenses	<i>Analytical Techniques / Analytical Chemistry Techniques</i>
7	Sensibilidad y especificidad	Sensitivity and Specificity
8	Comparación de métodos analíticos	<i>Comparative Study / Method Comparison</i>
9	Matrices biológicas (sangre, orina, cabello, superficies)	<i>Biological Specimens / Biological Samples</i>
10	Validación de métodos espectroscópicos	<i>Method Validation / Spectroscopic Validation</i>

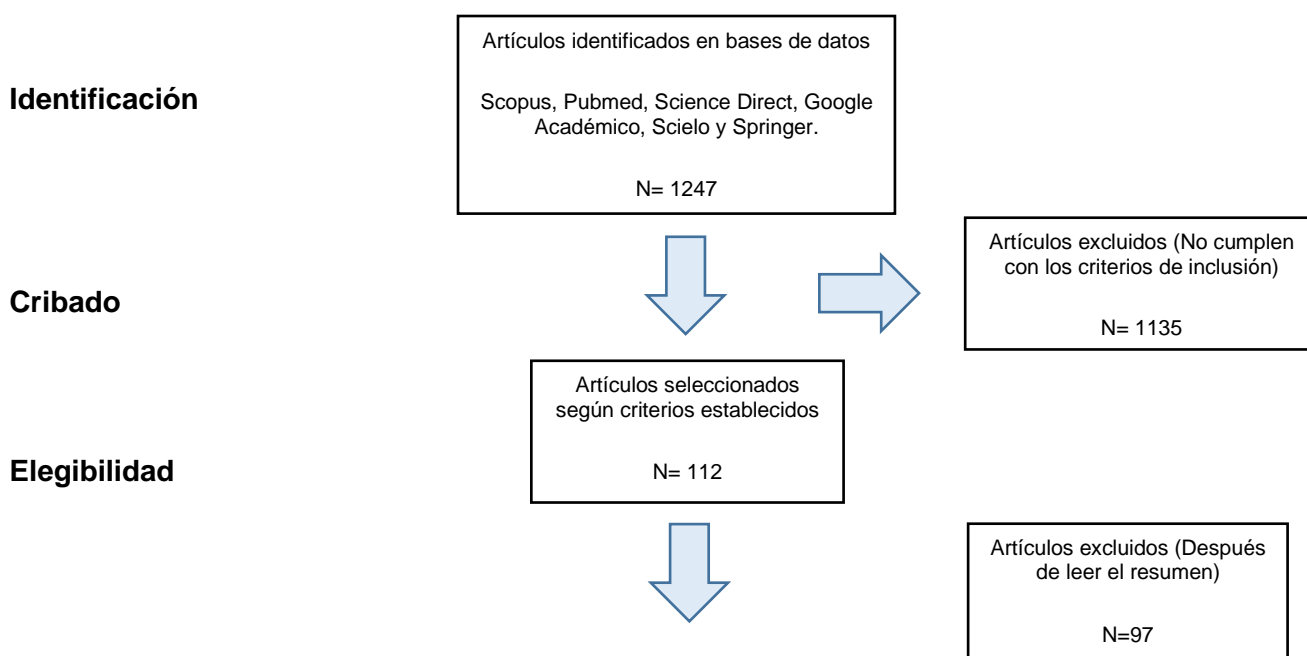
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Matriz de búsqueda para la revisión de literatura.

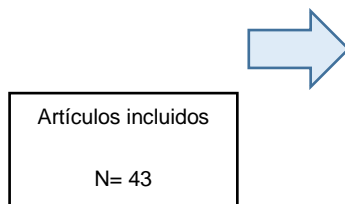
N°	Términos de combinación de búsqueda (español)	Search combination terms (inglés)
1+4	Espectroscopía Raman AND Detección de drogas sintéticas	Raman Spectroscopy AND Synthetic Drugs Detection
2+4	Espectroscopía infrarroja AND Detección de drogas sintéticas	Infrared Spectroscopy AND Synthetic Drugs Detection
3+4	Resonancia magnética nuclear AND Detección de drogas sintéticas	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy AND Synthetic Drugs Detection
4+5	Detección de drogas sintéticas AND Química forense	Synthetic Drugs Detection AND Forensic Chemistry
1+2+6	Espectroscopía Raman AND Espectroscopía infrarroja AND Técnicas analíticas forenses	Raman Spectroscopy AND Infrared Spectroscopy AND Analytical Techniques
4+7+8	Detección de drogas sintéticas AND Sensibilidad y especificidad AND Comparación de métodos analíticos	Synthetic Drugs Detection AND Sensitivity and Specificity AND Method Comparison
1+4+9	Espectroscopía Raman AND Detección de drogas sintéticas AND Muestras biológicas	Raman Spectroscopy AND Synthetic Drugs Detection AND Biological Samples
2+4+10	Espectroscopía infrarroja AND Detección de drogas sintéticas AND Validación de métodos espectroscópicos	Infrared Spectroscopy AND Synthetic Drugs Detection AND Spectroscopic Method Validation

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Gráficos



Inclusión



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. *Flujograma de selección de artículos en la búsqueda bibliográfica.*

2.5. Ecuación de Búsqueda

((("espectroscopía Raman" AND "detección de drogas sintéticas") OR ("Raman spectroscopy" AND "synthetic drugs detection")) AND (("espectroscopía infrarroja" AND "detección de drogas sintéticas") OR ("infrared spectroscopy" AND "synthetic drugs detection")) AND (("resonancia magnética nuclear" AND "detección de drogas sintéticas") OR ("nuclear magnetic resonance spectroscopy" AND "synthetic drugs detection")) AND (("detección de drogas sintéticas" AND "química forense") OR ("synthetic drugs detection" AND "forensic chemistry")) AND (("espectroscopía Raman" AND "espectroscopía infrarroja" AND "técnicas analíticas forenses") OR ("Raman spectroscopy" AND "infrared spectroscopy" AND "analytical techniques")) AND (("detección de drogas sintéticas" AND "sensibilidad y especificidad" AND "comparación de métodos analíticos") OR ("synthetic drugs detection" AND "sensitivity and specificity" AND "method comparison")) AND (("espectroscopía Raman" AND "muestras biológicas") OR ("Raman spectroscopy" AND "biological samples")) AND (("espectroscopía infrarroja" AND "validación de métodos espectroscópicos") OR ("infrared spectroscopy" AND "spectroscopic method validation")) AND (2018:2025[Fecha - Publicación])

2.6. Aspectos Legales

Esta revisión de las tendencias actuales de las técnicas espectroscópicas aplicadas en la determinación y análisis de drogas sintéticas en química forense cumple con las leyes del ordenamiento colombiano y con las normas vigentes en los estándares éticos internacionales para la investigación científica.

En primer lugar, respetamos la Ley 1581 de 2012 de Colombia (que trata sobre la protección de datos personales), ya que el estudio no contenía datos personales sensibles o identificativos (sólo se basó en el análisis de artículos científicos disponibles públicamente) (22). Además, se tomó en cuenta la Ley 23 de 1981, que establece las normas éticas que deben cumplirse en la realización de ciencias de la salud, para la interpretación ética y responsable de los resultados descritos en los estudios revisados, de manera que no se manipulara ni distorsionara la información y que se respetara la dignidad humana, incluso en los casos presentados para una investigación forense (23).

Dado que la investigación trata un tema sobre drogas, se debe tener en cuenta el marco legal de la Ley 30 de 1986 y sus regulaciones complementarias, que regulan el control y vigilancia de sustancias narcóticas y psicotrópicas en el Estado de Colombia; aunque esta revisión no involucró el manejo real de sustancias sintéticas, pense que era esencial tener también un ajuste científico ético-legal en los estudios analizados (24).

Los derechos de autor también se observaron de acuerdo con la Ley 23 de 1982 y la Ley 1032 de 2006, en la indicación de riesgos correcta, el reconocimiento a los autores y publicaciones consultados, garantizar la honestidad académica y evitar el plagio (39). Todo el proceso siguió los criterios del

protocolo PRISMA para asegurar la transparencia, robustez metodológica, trazabilidad y honestidad de la forma en que se realizó la revisión.

Por esta razón, esta investigación se adhirió a las leyes nacionales y a los estándares éticos de la investigación científica, siendo una contribución válida y confiable que respeta los derechos de los autores y los participantes indirectos cuando se trata del uso general de estudios forenses (25).

3. Desarrollo y Discusión

La Tabla 3 resume algunos trabajos relacionados con técnicas espectroscópicas y la detección y análisis de drogas sintéticas en química forense; estos estudios se incluyeron por su calidad metodológica y su contribución al avance de la organización del conocimiento y abarcan varias áreas alrededor del mundo, igualmente representan avances tanto en entornos de laboratorio como en casos forenses reales; se registran el país y los objetivos del estudio, con el porcentaje de precisión obtenido para cada método, y el resumen de los principales resultados comparados con técnicas espectroscópicas.

También se presentan estudios comparativos con técnicas espectroscópicas y métodos tradicionales como la cromatografía o la espectrometría de masas para ofrecer perspectivas sobre las ventajas y limitaciones de cada técnica. Se destaca fuertemente el gran potencial que estas técnicas tienen para el análisis no destructivo, la detección in situ y la caracterización rápida de nuevas sustancias. Por último, la información recopilada se resume en tablas y gráficos para apoyar el juicio, identificar patrones tecnológicos y obtener una visión general del estado actual en el área de detección forense de drogas sintéticas.

Tabla 3. Principales hallazgos relacionados con los avances en técnicas espectroscópicas.

N°	Título	Año	País	Objetivo	% de precisión del método	Método	Principales hallazgos	Referencia
1	Transitioning surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) into the forensic drug chemistry and toxicology laboratory: Current and future perspectives	2023	Estados Unidos	Revisar los avances y aplicaciones actuales de la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS) en química forense y toxicología.	No reportado	Espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS) con diversos sustratos y dispositivos portátiles.	SERS demuestra ser prometedora para el análisis forense por su alta sensibilidad, portabilidad y capacidad para analizar mezclas complejas. Su validación y adaptación a laboratorios forenses es el próximo paso clave.	Ott & Arroyo, 2023 (26)
2	Espectroscopia NIR de medicamentos naturales con el apoyo de nuevos instrumentos y métodos para el análisis e interpretación de datos	2021	Austria	Analizar el uso de espectroscopía NIR en fitofarmacos y su potencial en el análisis no invasivo y de alta eficiencia.	No reportado	Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) con espectrómetros miniaturizados portátiles.	NIR es eficaz para el análisis cualitativo y cuantitativo de productos naturales. Su desarrollo reciente la hace viable para análisis rápidos y en campo, especialmente en fitofarmacos.	Beć et al., 2021 (27)
3	Vibrational spectroscopy and chemometrics in forensic chemistry: critical review, current trends and challenges	2019	Brasil	Revisar críticamente el uso de espectroscopía vibracional y quimiometría en química forense, destacando	No reportado	Espectroscopía Raman e Infrarroja, junto con PCA, DA y MCR-ALS.	Raman e IR muestran gran utilidad forense, especialmente con enfoques quimiométricos. Se identifican desafíos en la interpretación de datos y en la validación de resultados.	Silva et al., 2019 (28)

				tendencias y retos.				
4	Portable testing techniques for the analysis of drug materials	2022	Estados Unidos	Evaluar técnicas portátiles actuales para el análisis de drogas en campo, destacando su aplicabilidad y eficacia.	No reportado	FTIR, Raman (SORS), IMS, GC-MS portátil, PSI-MS, biosensores ópticos/electroquímicos.	Las técnicas portátiles modernas permiten análisis rápidos, no destructivos y sensibles en campo, cruciales para aduanas, aeropuertos y escenas de crimen.	Alonzo et al., 2022 (29)
5	Raman Spectroscopic Detection of Synthetic Cannabinoid-related 1H-indazole-3-carboxamide on Seized Paper Stamps: A Forensic Challenge in Providing Nondestructive Analyses and Feasible Counterevidence	2025	Brasil	Detectar cannabinoides sintéticos en papel incautado utilizando métodos no destructivos que preserven la evidencia.	No reportado	Raman (785 nm y 1064 nm), GC-MS, ESI-MS, RMN-1H.	Raman permite identificar estructuras clave de cannabinoides sintéticos sin destruir la muestra, destacando su utilidad para pruebas legales y análisis rápido de drogas emergentes.	Silva et al., 2025 (30)
7	On-site illicit-drug detection with an integrated near-infrared spectral sensor: A proof of concept	2022	Países Bajos	Establecer un método rápido, no destructivo y preciso para la identificación de NPS usando SERDS y aprendizaje automático.	97.3% (SVM con optimización BOA)	Shifted-Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) + Machine Learning	Identificación efectiva de 37 NPS; SERDS reduce la interferencia por fluorescencia; útil para seguridad en eventos y análisis in situ.	Kranenburg et al., 2022 (32)
8	Detection and identification of drug traces in latent fingerprints using Raman spectroscopy	2022	Estados Unidos	Evaluar un sensor espectral NIR miniaturizado para la detección in situ de drogas ilícitas.	>90% en muestras reales; 100% en 11 estándares	Espectroscopía NIR con sensor multipíxel + quimiometría	Alta precisión en clasificación de cocaína y MDMA; posible integración en smartphones para uso policial directo.	Amin et al., 2022 (33)
9	Portable near infrared spectroscopy applied to abuse drugs and medicine analyses	2018	Brasil	Detectar trazas de fármacos en huellas latentes mediante espectroscopía Raman.	100% en validación externa (análisis de FMs contaminadas con AINEs)	Espectroscopía Raman + Análisis multivariado	Detección confiable de AINEs en huellas; aporta datos sobre contacto del sospechoso con fármacos.	Correia et al., 2018 (34)
10	Comparison of spectroscopic techniques combined with chemometrics for cocaine powder analysis	2020	Bélgica	Cuantificar y clasificar drogas sintéticas y medicamentos mediante NIR portátil.	RMSEP: 6% para cocaína; alta discriminación cualitativa	MicroNIR portátil + PLS, PCA, HCA	Diferenciación de derivados de LSD y NBOMes; identificación de adulteraciones/falsificaciones en medicamentos.	Elijaerts et al., 2020 (35)
11	Can X-Ray powder diffraction be a suitable forensic method for illicit drug identification?	2020	República Checa	Comparar técnicas espectroscópicas para análisis cuali y	Clasificación: MIR 99.7%, Raman 99.5%, NIR	MIR, Raman, NIR + SVM	MIR superior en clasificación, NIR mejor en cuantificación; espectroscopía reduce necesidad de	Jurásek et al., 2020 (36)

				cuantitativo de cocaína.	98.9%; Cuantificación: NIR R ² =0.97		confirmación cromatográfica.	
1 2	Analysis of drugs including illicit and new psychoactive substances in oral fluids by gas chromatography-drift tube ion mobility spectrometry	2022	España	Evaluar la viabilidad del XRPD para identificar NPS en muestras del mercado negro.	No reportado	Difracción de Rayos X en Polvo (XRPD)	XRPD identificó todas las sustancias analizadas, incluso donde Raman e IR fallaron; útil como herramienta complementaria forense.	Denia et al., 2022 (37)
1 3	FTIR and NIRS in forensic chemical sensing	2019	India	Desarrollar un método para detectar sustancias psicoactivas en fluidos orales.	Errores relativos <8.4%; recuperación 70–115%	Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Movilidad Iónica (GC-IMS)	Alta sensibilidad y selectividad en fluidos orales; método robusto para detección de múltiples NPS y adulterantes.	Sharma & Kumar, 2019 (38)
1 4	A review of artificial intelligence methods combined with Raman spectroscopy to identify the composition of substances	2022	China/Tailandia	Revisar el uso combinado de la espectroscopía Raman con inteligencia artificial para identificar componentes en mezclas complejas	No reportado	Espectroscopía Raman + IA (Machine Learning, Deep Learning)	La combinación de Raman con IA mejora significativamente la identificación no invasiva y rápida de mezclas complejas frente a métodos tradicionales.	Pan et al., 2022 (39)
1 5	Nuclear Forensic Analysis via Machine Learning Assisted Laser-based Spectroscopy and Spectral Imaging	2022	Kenia	Aplicar LIBS y Raman asistidos por ML para análisis forense nuclear, identificando firmas de uranio y su origen	REP de 2.25% a 69.31% dependiendo del modelo	LIBS, Raman, PCA, ANN (Machine Learning)	Identificación precisa y rápida de uranio en muestras traza; clasificación del origen del mineral mediante PCA; alta aplicabilidad en análisis forense nuclear.	Bhatt, 2022 (40)
1 6	ATR-FTIR spectroscopy as the future of diagnostics: a systematic review of the approach using bio-fluids	2021	Pakistán	Revisar el uso de ATR-FTIR en biofluidos para diagnóstico de enfermedades	No reportado	ATR-FTIR + quimiometría	Se identificaron firmas moleculares reproducibles en saliva, sangre y orina; potencial diagnóstico no invasivo y rápido.	Naseer et al., 2021 (41)
1 7	Atomic absorption spectrometry—A multi element technique	2018	Brasil	Resumir el desarrollo de la espectroscopía de absorción atómica multielemental	No aplica (revisión)	HR-CS AAS (espectroscopía de absorción atómica de fuente continua de alta resolución)	Avances en sensibilidad y corrección de fondo permiten la determinación secuencial/simultánea de múltiples elementos con alta eficacia.	Ferreira et al., 2018 (42)
1 8	Raman and FTIR Spectroscopic Techniques and Their Applications	2022	India	Describir fundamentos y aplicaciones de Raman y FTIR en diversas disciplinas	No aplica (revisión)	Raman, FTIR	Versatilidad de ambas técnicas para obtener datos estructurales moleculares en tiempo real en múltiples estados físicos.	Ojha & Ojha, 2022 (43)
1 9	Caracterización y análisis de evidencias forenses mediante técnicas no destructivas y análisis multivariado	2020	Chile	Analizar evidencia forense traza (vidrio, pinturas, residuos de disparo) mediante	96% en calibración, 80–100% en validación	SEM-EDX, XRF, UV-Vis, CRM, NAA, ATR-FTIR, Raman, XRD, LDA, PLS-DA, OPLS-DA	Alta eficacia en la clasificación y procedencia de muestras traza mediante modelos multivariados y fusión de datos de técnicas complementarias.	Leiva Miranda, 2020 (44)

				técnicas no destructivas y análisis multivariado				
20	Peritaje de drogas sintéticas por cromatografía de gases y su relación con el proceso penal por tráfico ilícito de drogas	2022	Perú	Evaluar el uso de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) en la detección de drogas ilícitas en cabello humano	No reportado	Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR)	La técnica es rápida, no destructiva y sensible; permite detectar cocaína, anfetaminas y opioides; requiere calibración específica según tipo de cabello.	Guambo & Manzano, 2025 (45)
21	Desarrollo de sensores electroquímicos para la determinación de drogas sintéticas en fluidos biológicos y muestras de incautación	2023	Colombia	Valorar los aspectos metodológicos y de validez del test de detección de drogas en saliva	No reportado	Inmunoensayo, Cromatografía de Gases / Espectrometría de Masas en Tándem (GC-MS/MS)	Se detectan marihuana, cocaína, anfetaminas y opiáceos en saliva hasta 48h; requiere confirmación con técnicas complementarias; opción útil en contextos legales y clínicos.	Rotemberg et al., 2022 (46)
22	Papel que juega la espectroscopia de infrarrojo cercano en la detección de drogas ilícitas en muestras de cabello humano	2025	Ecuador	Analizar el uso de sensores electroquímicos para la detección de drogas emergentes	LOD hasta 0,608 pg/mL; sensibilidad comparable a métodos convencionales	Sensores electroquímicos voltamperométricos	Permiten detección in situ de drogas como BZP, mCPP, DMT, mefedrona y fentanilo; dispositivos portátiles, sensibles y con microcantidades de muestra; alternativa a métodos convencionales.	González - Hernández, 2023 (47)
23	Detección de drogas en saliva: aspectos metodológicos y legales	2022	Perú	Determinar cualitativamente MDMA mediante prueba de Marquis y espectroscopia IR	100% de verdaderos positivos y precisión para prueba de Marquis; <10% coef. de variación para IR	Prueba de Marquis (colorimetría), Espectroscopia Infrarroja (IR)	Ambas pruebas cumplieron criterios de validación; detección cualitativa confiable; robustas frente a variaciones de temperatura.	Vergara Gonzalez, 2024 (48)
24	Drogas emergentes: detección mediante sensores electroquímicos	2023	Colombia	Determinar la relación entre cromatografía de gases y el proceso penal por tráfico de drogas	No reportado	Cromatografía de Gases	Existe relación moderada ($r=0,592$; $p=0,000$) entre el peritaje por cromatografía de gases y procesos penales; destaca su relevancia legal y operativa en la criminalística.	Maldonado Laurente, 2022 (49)
25	Determinación cualitativa de 3,4-metilendioxi metanfetamina mediante la prueba de Marquis y espectroscopia infrarroja	2024	Panamá	Desarrollar sensores electroquímicos para detectar drogas sintéticas en fluidos biológicos y muestras de incautación.	92-100% (recuperación para fentanilo)	Sensores electroquímicos: transductores de carbono, platino, BDD; sensor Raman; biosensor enzimático	Desarrollo de sensores portátiles con alta sensibilidad y precisión, adecuados para análisis in situ de drogas sintéticas como fentanilo, 25B-NBOMe, DMT y catinonas.	González Hernández, 2023 (50)
26	Espectroscopia Vibracional Como Una Alternativa Para La Discriminación De Drogas Ilícitas	2020	Colombia	Discriminar entre formas de cocaína (base y clorhidrato) en muestras	100%	ATR-FTIR con análisis discriminante lineal (LDA)	La técnica ATR-FTIR permitió discriminar correctamente todas las muestras incluso con adulterantes y diluyentes presentes.	Mendez-Hernandez et al., 2020 (51)

	Incautadas En La Ciudad De Cúcuta			incautadas en Cúcuta mediante ATR-FTIR.				
27	A review of 1D convolutional neural networks toward unknown substance identification in portable Raman spectrometer	2020	Canadá	Evaluar el uso de redes neuronales convolucionales 1D para identificación de sustancias desconocidas mediante espectroscopía Raman portátil.	No aplica (revisión)	Espectroscopía Raman con CNN 1D	CNNs superan a algoritmos convencionales en mezcla de compuestos; ideales para espectrómetros portátiles con bajo consumo.	Mozaffari & Tay, 2020 (52)
28	Comparison of augmentation and pre-processing for deep learning and chemometric classification of infrared spectra	2021	Noruega	Comparar técnicas de preprocesamiento y aumentación para clasificación de espectros IR mediante aprendizaje profundo y quimiometría.	No reportado	Espectroscopía infrarroja + Redes neuronales convolucionales profundas (DCNN)	La aumentación EMSA reemplaza el preprocesamiento convencional con buenos resultados en conjuntos pequeños de datos.	Blazhko et al., 2021 (53)
29	Chemical shifts in molecular solids by machine learning	2018	Suiza	Predecir desplazamientos químicos NMR en sólidos moleculares mediante aprendizaje automático.	Precisión dentro de la exactitud de DFT	NMR + Aprendizaje automático basado en entornos locales	El modelo predijo con precisión desplazamientos químicos para determinar estructuras de sólidos como cocaína y otros fármacos.	Paruzzo et al., 2018 (54)
30	New Raman spectroscopic methods' application in forensic science	2022	Estados Unidos	Revisar aplicaciones recientes de nuevas técnicas Raman en ciencia forense.	No aplica (revisión)	Raman mejorado por superficie (SERS), Raman con excitación desplazada, Raman con desplazamiento espacial	Combinación de técnicas Raman permite análisis sensible, sin fondo fluorescente y a través de empaques; útiles en escenarios forenses complejos.	Mojica & Dai, 2022 (55)
31	Infrared spectroscopy and forensic entomology: Can this union work? A literature review	2021	Brasil	Evaluar el uso de espectroscopía infrarroja en entomología forense.	No aplica (revisión)	NIRS, MIRS + análisis multivariado	Métodos vibracionales eficientes y no destructivos para taxonomía, toxicología y predicción de edad larval; subutilizados en entomología forense.	Jales et al., 2021 (56)
32	Forensic seized drug analysis: Current challenges and emerging analytical solutions	2023	Estados Unidos	Identificar desafíos actuales en el análisis de drogas incautadas y soluciones analíticas emergentes.	No aplica (revisión)	GC-MS, FTIR, test colorimétricos, técnicas emergentes	Se destacan limitaciones de métodos tradicionales y se propone integración de nuevas tecnologías para análisis más eficiente y preciso.	Joshi & Sisco, 2023 (57)

33	Recent advances in the use of surface-enhanced Raman scattering for illicit drug detection	2022	Canadá	Revisar los avances recientes del uso de SERS en la detección de drogas ilícitas	No reportado	Dispersión Raman mejorada por superficie (SERS)	SERS muestra alta sensibilidad para detectar drogas en muestras biológicas y acuosas; se destacan avances en la fabricación de sustratos para mejorar la detección cualitativa y cuantitativa.	Azimi & Docoslis, 2022 (58)
34	On-site analytical techniques for forensic chemistry	2025	Brasil	Presentar dispositivos analíticos portátiles para el análisis forense de drogas	No reportado	Miniaturización de espectrometría de masas, técnicas electroquímicas y espectroscópicas	Las técnicas miniaturizadas permiten análisis rápidos y precisos in situ, con bajo consumo de reactivos y generación mínima de residuos.	Cardoso et al., 2025 (59)
35	Recent advances in the direct electrochemical detection of drugs of abuse	2020	Italia	Resaltar avances recientes en el uso de sensores electroquímicos para detectar drogas de abuso	No reportado	Detección electroquímica directa	La oxidación electroquímica directa permite detectar múltiples drogas (cocaína, MDMA, etc.); dispositivos portátiles con sensores personalizados mejoran el muestreo a gran escala.	Zanfrogni et al., 2020 (60)
36	Chemometrics and infrared spectroscopy—A winning team for the analysis of illicit drug products	2022	Bélgica	Mostrar cómo la espectroscopía y la quimiometría se combinan para analizar productos de drogas ilícitas	No reportado	Espectroscopía infrarroja y Raman con quimiometría (PCA, HCA)	El uso de quimiometría mejora la identificación de adulterantes y perfiles químicos en contextos de verificación y análisis in situ.	Deconinck et al., 2022 (61)
37	Advancements in colorimetric and fluorescent-based sensing approaches for point-of-care testing in forensic sample analysis	2024	Estados Unidos	Analizar avances en enfoques colorimétricos y fluorescentes para análisis forense en el punto de atención	No reportado	Sensores colorimétricos y fluorescentes	Técnicas fluorescentes muestran alta sensibilidad y especificidad; el desarrollo de sensores duales y microfluídicos promete mejorar el análisis forense.	Rasheed et al., 2024 (62)
38	Mass spectrometry analysis of drugs of abuse: challenges and emerging strategies	2020	Italia	Revisar estrategias emergentes y desafíos en espectrometría de masas para análisis de drogas de abuso	No reportado	Espectrometría de masas (GC-MS, LC-MS, ionización ambiente)	La MS es altamente sensible y adecuada para detectar NPS de alta potencia; se discuten mejoras en preparación de muestras y métodos de ionización.	Borden et al., 2020 (63)
39	NMR in forensics	2023	Estados Unidos	Revisar aplicaciones de RMN en química forense y avances recientes en sistemas de banco	No reportado	Resonancia magnética nuclear (RMN), incluidos equipos portátiles	La RMN de banco ofrece posibilidades prácticas para análisis rutinario de drogas; se exploran límites de aplicación y nuevas metodologías.	Urbas et al., 2023 (64)

40	Forensic NMR spectroscopy: Just a beginning of a promising partnership	2018	Brasil	Promover colaboración entre expertos en RMN y ciencias forenses; revisar aplicaciones recientes	No reportado	Resonancia magnética nuclear (RMN)	RMN aplicada a identificación química de cannabinoides, cationonas y compuestos relacionados con fraudes y explosivos; destaca necesidad de colaboración interdisciplinaria.	Santos et al., 2018 (65)
41	Desarrollo de una metodología para el perfilamiento de drogas de síntesis y nuevas sustancias psicoactivas detectadas en Colombia	2021	Colombia	Desarrollar una metodología para el perfilamiento de drogas sintéticas y NPS incautadas en Colombia	~95% de concordancia entre GC/MS y HPLC/QTOF	GC/MS, HPLC/QTOF, GC/FID + quimiometría (PCA, HCA)	Se identificaron 32 compuestos en 143 muestras; se establecieron 3 rutas sintéticas distintas mediante agrupamiento quimiométrico de compuestos análogos.	Ocampo Chagueno, 2021 (66)
42	Optimización de métodos GC-MS para la detección de metanfetamina, cocaína y fentanilo empleando la estrategia Lean Six Sigma	2022	México	Optimizar métodos GC-MS para la detección de metanfetamina, cocaína y fentanilo reduciendo tiempos de análisis	No reportado	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) con metodología Lean Six Sigma	Se redujo el tiempo de análisis de 15.5 min a ~4.7 min (~70%) sin comprometer la especificidad ni la reproducibilidad; agilizó notablemente el flujo de trabajo forense.	Ruiz et al., 2022 (67)
43	State-of-the-art analytical approaches for illicit drug profiling in forensic investigations	2022	Emiratos Árabes Unidos	Revisar enfoques analíticos de punta para el perfilamiento de drogas ilícitas en investigaciones forenses	No aplica (revisión)	IRMS, GC-MS, GC-IRMS, UHPLC, TLC, LC-MS, ICP-MS	Se presenta un panorama de técnicas tradicionales y avanzadas para identificación de orígenes, rutas sintéticas y adulterantes en drogas incautadas, orientando la selección metodológica según el tipo de perfil deseado.	Ahmed et al., 2022 (68)

Fuente: elaboración propia.

En combinación, el análisis forense basado en espectroscopía vibracional, la clasificación quimiométrica y el soporte sensorial portátil logran una alta precisión. Por ejemplo, 100 % para los modelos ATR-FTIR + LDA para distinguir diferentes formas de cocaína, 97.3 % en clasificación SVM optimizada basada en SERDS para clasificar NPS, RMSEP de solo 6 % para microNIR + PLS para cuantificar cocaína, y recuperaciones del 92-100 % para biosensores electroquímicos para detectar fentanilo e ilustran la aplicabilidad cuantitativa y cualitativa.

El análisis rápido, altamente sensible y no destructivo se hace posible, incluso para matrices complejas o cerradas, gracias a las mejoras en SERS, SERDS y SORS (especialmente en combinación con el aprendizaje automático), que utilizan dispositivos portátiles de NIR y NMR para pruebas *in situ* con un menor pretratamiento de muestras. El uso de quimiometría (PCA, LDA, PLS-DA, MCR-ALS) ayuda a detectar adulteración y discriminar mezclas y origen.

Estos resultados destacan que la integración de espectroscopía de alta gama con herramientas de aprendizaje automático, combinadas con tecnología de sensores miniaturizados, está revolucionando actualmente las aplicaciones en forense; esforzándose por un flujo de trabajo más ágil y robusto, aunque algunos protocolos aún deben estandarizarse y validarse para convertirse en un estándar.

Avances recientes en técnicas espectroscópicas y sus aplicaciones en la detección y análisis de drogas sintéticas en química forense.

Los métodos de espectroscopía han progresado notablemente durante la última década, mejorando significativamente la detección e identificación de drogas sintéticas dentro del contexto de la química forense; debido a la naturaleza no destructiva y alta precisión de la espectroscopía, ha sido una herramienta poderosa para la identificación rápida *in situ* y sobre el terreno de sustancias psicoactivas en especímenes incautados y/o en el campo sin una preparación de muestra prolongada (26). En particular, entre varias técnicas, la espectroscopía Raman, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y la espectroscopía de transformada de Fourier en el infrarrojo (FTIR) han surgido como técnicas fundamentales en las investigaciones forenses (26,28). Estos desarrollos no solo mejoran el rendimiento, sino que también son útiles para una clasificación más rápida de las drogas, lo cual es muy importante para la rápida detección de nuevas sustancias psicoactivas (NPS).

La combinación de métodos quimiométricos con métodos espectroscópicos ha mejorado el análisis de datos complejos recopilados de muestras; métodos, como el análisis de componentes principales (PCA) y modelos de regresión basados en máquinas de vectores de soporte (SVM), se han aplicado a la extracción espectral para una interpretación efectiva de espectros, reduciendo el impacto de interferencias y errores implicados en la medición. Se ha encontrado que estos enfoques estadísticos avanzados son muy útiles en el análisis de matrices de muestra complejas, como residuos de drogas o la mezcla de varios compuestos (29). Por ejemplo, en la espectroscopía NIR, ha habido un interés particular no solo en la naturaleza no invasiva, sino en la naturaleza no destructiva de la técnica; análisis rápidos que son portátiles o desplegados en el campo y que se pueden realizar en drogas ilícitas desde su embalaje o fuera de las superficies sin la necesidad de muestreo (31). Estos avances ayudan a que el análisis en tiempo real y el manejo de evidencias sean más fluidos, características clave en el examen forense.

Aunque algunas técnicas, como FTIR y NIR, han demostrado ser útiles, el uso de estas técnicas requiere una calibración robusta y modelos de referencia específicos para cada muestra; estas limitaciones pueden ser abordadas mediante los constantes avances en los algoritmos quimiométricos y el desarrollo de nuevas fuentes de luz y detectores con mayor sensibilidad (35,38). Sin embargo, el progreso continuo en el campo de la espectroscopía está aumentando la capacidad de la ciencia forense para satisfacer las demandas impuestas por las drogas sintéticas, los nuevos desarrollos en técnicas espectroscópicas han mejorado enormemente las dimensiones vertical y transversal del análisis y detección de drogas sintéticas en la química forense; a través de su mejorada sensibilidad, tiempo de análisis reducido y capacidad para llevar a cabo análisis no destructivos, estas técnicas siguen siendo esenciales en la lucha contra el abuso de drogas y el crimen relacionado; el futuro de la detección forense de sustancias ilícitas parece positivo con herramientas mejores y más accesibles para la aplicación de la ley y la seguridad pública gracias a las nuevas tecnologías y el desarrollo de instrumentación y tecnología portátil (36,37).

Un resumen de los desarrollos recientes de métodos espectroscópicos para la identificación y caracterización de drogas sintéticas en química forense se da en la Tabla 4. Los seleccionados también representan varios métodos, como la espectroscopía Raman mejorada en superficie (SERS), la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) o la espectrometría de masas, que han mejorado en sensibilidad, selectividad y miniaturización de la instrumentación, siendo así beneficiosos para aplicaciones en el campo; estos avances se pueden aplicar a la detección rápida y sensible de drogas psicoactivas, incluyendo algunos tipos de muestras de baja concentración o complicadas, así como al análisis de drogas ilícitas y la detección de NPS. No obstante, se destacan algunos inconvenientes,

como la interferencia en la detección con matrices complejas, la validación en muestras reales y la dependencia del volumen de dopaje y los parámetros específicos de técnica del método en blanco, a pesar de ello los métodos espectroscópicos claramente muestran ser una opción favorable para la identificación más rápida de drogas sintéticas en entornos forenses.

Tabla 4. Avances recientes en técnicas espectroscópicas y su impacto en la mejora de la detección y análisis de drogas sintéticas en química forense.

Técnica espectroscópica	Avances Recientes	Impacto en la Detección de Drogas Sintéticas	Limitaciones	Aplicaciones Forenses	Referencia
Espectrometría de absorción atómica					
AAS	Avances en fuentes continuas de alta resolución (HR-CS AAS)	Capacidad multielemental útil para trazas metálicas en drogas	No específica para compuestos orgánicos; requiere digestión de muestra	Determinación de elementos traza en matrices complejas	Ferreira et al., 2018
ATR-FTIR					
ATR-FTIR	Creación de base de datos de huellas moleculares en saliva, orina y sangre	Permite diagnóstico y detección química en matrices biológicas	Variabilidad por métodos de procesamiento y ruido espectral	Detección de drogas en fluidos humanos; aplicaciones toxicológicas	Naseer et al., 2021
ATR-FTIR	Discriminación efectiva entre formas de cocaína con LDA y preprocesamiento espectral	Identificación no destructiva de drogas mezcladas con adulterantes	Limitada en identificación sin preprocesamiento avanzado	Clasificación de formas de cocaína y control de calidad	Méndez-Hernández et al. (2020)
Cromatografía de Gases					
Cromatografía de Gases	Integración en el proceso penal como herramienta clave del peritaje	Relación directa con el análisis cualitativo y cuantitativo en casos judiciales	No discrimina compuestos en mezclas complejas sin tratamiento adicional	Pesaje y análisis de drogas en criminalística policial	Maldonado Laurente (2022)
Electroquímica					
Electroquímica	Desarrollo de sensores miniaturizados y portátiles con LOD hasta 0.608 pg/mL	Capaz de detectar drogas emergentes (BZP, mCPP, 25B-NBO-Me, DMT, 4-MMC, FYL) con alta sensibilidad in situ	Aún depende de condiciones específicas; validación limitada para algunas sustancias	Evaluación preliminar in situ, intoxicaciones, detección de drogas emergentes	González-Hernández (2023)
Electroquímica	Uso de sensores electroquímicos portátiles y detección por oxidación directa de drogas comunes y nuevas.	Alta sensibilidad y aplicabilidad a drogas clásicas y NPS.	Sensibilidad a condiciones de matriz; requiere desarrollo específico para cada analito.	Análisis de drogas en campo y fluidos biológicos.	Zanfrognini et al., 2020
Espectrometría de masas					
Espectrometría de masas	Avances en ionización ambiente y preparación de muestras para detectar NPS y drogas de alta potencia.	Altísima sensibilidad y especificidad, ideal para nuevas sustancias potentes.	Costo elevado, requiere operadores especializados y equipos de laboratorio.	Identificación precisa y confirmatoria de drogas en laboratorio forense.	Borden et al., 2020
Espectroscopía de Masas acoplada a CG (GC-MS/MS)	Validación como técnica confirmatoria para pruebas en saliva; detección de múltiples drogas en bajas concentraciones	Alta especificidad, permite confirmación de resultados de pruebas preliminares	Costosa y requiere personal especializado; análisis no inmediato	Monitoreo en centros de tratamiento; pruebas legales	Rotemberg et al. (2022)

Espectroscopía isotópica (IRMS)	Combinación con GC y LC para establecer origen geográfico y rutas de síntesis.	Permite trazabilidad avanzada de drogas sintéticas y vegetales.	Técnica avanzada con alto requerimiento de infraestructura y experiencia técnica.	Perfilamiento geoquímico y químico de drogas incautadas.	Ahmed et al., 2022
Espectrometría de masas	Desarrollo de dispositivos portátiles miniaturizados con bajo consumo de reactivos y análisis <i>in situ</i> .	Permite análisis rápidos, precisos y en el lugar del hallazgo.	Puede requerir validación frente a métodos de laboratorio; menor sensibilidad en algunos casos.	Aduanas, escenas del crimen, operativos policiales.	Cardoso et al., 2025
FTIR					
FTIR, Raman (SORS)	Aplicaciones en campo, sensores integrados; técnicas emergentes como PSI-MS	Rápida identificación en puntos de control; detección a través de empaques	Baja discriminación en colorímetros; dependencia del entorno	Análisis en frontera, aeropuertos, servicios antidroga	Alonzo et al., 2022
FTIR y NIR	Aplicaciones prácticas en clasificación y discriminación forense	Métodos no destructivos, económicos y confiables	Menor sensibilidad en mezclas complejas	Discriminación de evidencias forenses; análisis de drogas y materiales	Sharma & Kumar, 2019
FTIR	Evaluación crítica de desafíos y soluciones emergentes	Capacidad limitada frente a muestras complejas y nuevas drogas	Necesidad de innovación y adaptación tecnológica	Análisis de drogas incautadas en laboratorios forenses	Joshi & Sisco (2023)
FTIR-PAS / ATR-FTIR	Alta precisión en clasificación de residuos de disparo y pinturas automotrices con herramientas quimiométricas (LDA, OPLS-DA)	Capacidad para diferenciar compuestos como pólvora y primers; apoyo en clasificación de matrices complejas	Requiere calibraciones específicas; sensibilidad afectada por interferencias	Análisis de residuos de disparo, pinturas, primer/pólvora en municiones	Leiva Miranda (2020)
GC-MS					
GC-IMS	Acoplamiento eficaz con espectrometría de movilidad iónica en fluidos orales	Alta sensibilidad (LOD 6–15 µg/L); alta recuperación (70–115%)	Requiere preparación de muestra y validación en matrices complejas	Detección de NPS en saliva; análisis toxicológico	Denia et al., 2022
GC-MS	Aplicación de estrategias de mejora continua para reducir tiempos analíticos sin comprometer la precisión.	Aumenta eficiencia operativa en laboratorios forenses con alto volumen de muestras.	Limitado a laboratorios con acceso a estas herramientas; requiere formación en metodología Lean.	Identificación rápida de metanfetamina, cocaína y fentanilo.	Ruiz et al., 2022
GC-MS y HPLC/QTOF	Optimización de métodos para reducir tiempo de análisis; uso de cromatografía acoplada a espectrometría para perfilamiento.	Alta resolución y precisión en identificación de compuestos y rutas de síntesis.	Requiere equipos sofisticados, infraestructura y validación analítica.	Perfilamiento químico, agrupamiento de compuestos, identificación de precursores.	Ocampo Chaguendo, 2021
Infrarrojo					
IR	Técnica EMSA para corrección de distorsiones y mejora en clasificación	Mejora la robustez del análisis en muestras con variabilidad física	Puede requerir muchos datos para entrenamiento eficaz	Clasificación espectral en análisis forense automatizado	Blazhko et al. (2021)
IR, Raman	Integración con técnicas quimiométricas para caracterizar adulterantes y sustancias en mezclas complejas.	Mejora la interpretación de espectros complejos y diferenciación de muestras adulteradas.	Dependencia de bibliotecas espectrales; requiere expertos en quimiometría.	Servicios de drug checking y análisis móvil.	Deconinck et al., 2022
IR	Validación cualitativa del método para MDMA con alta	Alta especificidad y robustez en la detección	Precisión depende del ruido del equipo; LOD	Confirmación cualitativa de MDMA en muestras sospechosas	Vergara González (2024)

	selectividad y precisión	de MDMA, útil como prueba confirmatoria	variable según instrumento		
IR, Raman	Integración con quimiometría; mayor cobertura analítica	Capacidad de análisis de trazas diversas como drogas, fluidos, explosivos	Falta de validación y representatividad de muestras	Análisis de documentos, fluidos corporales, drogas	Silva et al., 2019 (28)
LIBS y Raman (LRM) + ML	Aplicación en materiales nucleares; clasificación por PCA y ANN	Identificación rápida y directa de firmas químicas complejas	Alta complejidad espectral; necesidad de interpretación avanzada	Análisis nuclear forense; clasificación de materiales radiactivos	Bhatt, 2022
MIR - NIR					
MIR, Raman, NIR + SVM	Comparación entre tres técnicas; modelos de clasificación y cuantificación	Alta precisión (99.7% MIR); cuantificación efectiva con NIR ($R^2=0.97$)	Interferencia fluorescente en Raman; MIR menos eficaz en cuantificación	Análisis de polvos incautados (cocaína y otros)	Elijaerts et al., 2020
NIR	Miniaturización, sensores portátiles, nuevos métodos de análisis	Identificación rápida y no invasiva; útil en escenarios con variabilidad química	Sensibilidad inferior frente a otras técnicas; interferencias espectrales	Análisis de medicamentos naturales y posibles adulterantes	Beć et al., 2021 (27)
NIR	Alta sensibilidad y precisión en cabello humano para detectar cocaína, anfetaminas y opioides	Método rápido, no destructivo, sin reactivos tóxicos; amplia ventana de detección	Variabilidad por tipo, color y textura del cabello; requiere calibración específica	Toxicología forense, análisis retrospectivo de consumo	Guambo & Manzano (2025)
NIR	Sensor espectral multipíxel portable integrable en móviles	100% clasificación en 11 drogas comunes; >90% en casos reales	Requiere mejora para drogas menos comunes	Pruebas in situ por la policía; dispositivos móviles	Kranenburg et al., 2022
NIR	MicroNIR + quimiometría; discriminación entre derivados de LSD, NBOMe, MDMA	Clasificación de sintéticos y medicamentos falsificados	Precisión dependiente del modelo PLS	Clasificación de drogas sintéticas en tabletas y sellos	Correia et al., 2018
NIR y MIR	Revisión del uso potencial en entomología forense para detección de tóxicos	Útil en análisis indirectos, como en insectos contaminados con drogas	Escasa aplicación directa en drogas sintéticas	Estudios de toxicología ambiental y evidencia entomológica	Jales et al. (2021)
Raman					
Raman	Identificación de trazas en huellas latentes con 100% precisión	Determinación de contacto con AINEs; trazabilidad individual	Necesidad de espectros de referencia variados	Química de contacto; perfilado de sospechosos	Amin et al., 2022
Raman	Combinación con ATR-FTIR mejora la clasificación de muestras de pintura automotriz	Alta discriminación espectral, útil para caracterizar materiales similares	No siempre permite clasificación completa sin combinación con otras técnicas	Identificación de pigmentos en pinturas automotrices	Leiva Miranda (2020)
Raman	Detección de cannabinoides sintéticos en papel con análisis no destructivo	Alta especificidad estructural y preservación de evidencia	Limitada disponibilidad de espectros de referencia	Identificación de cannabinoides en sellos incautados	Silva et al., 2025
Raman (SERS)	Substratos avanzados y detección en saliva, sangre, orina	Alta sensibilidad y especificidad en matrices biológicas complejas	Necesidad de control de interferencias y estandarización	Detección rápida en laboratorio y campo	Azimi & Docoslis (2022)
Raman (SERS, shifted-excitation, spatially offset)	Detección sensible en trazas y análisis a través de envases	Detección de sustancias directamente en escena, incluso en materiales empaquetados	Algunos métodos aún requieren infraestructura costosa	Identificación rápida de drogas en evidencia forense	Mojica & Dai (2022)

Raman	Combinación con redes neuronales y aprendizaje profundo	Mejora de la identificación en mezclas con alta precisión	Dependencia de grandes conjuntos de datos para entrenamiento	Clasificación automatizada de sustancias en escenas del crimen	Pan et al., 2022
Raman	Aplicación de redes neuronales 1D para identificación en espectrómetros portátiles	Mejora en identificación de mezclas complejas de drogas in situ	Limitaciones computacionales y de entrenamiento para bases pequeñas	Análisis en campo por fuerzas de seguridad	Mozaffari & Tay (2020)
Raman y FTIR	Alta versatilidad, correlación estructural con espectros	Identificación estructural precisa en tiempo real	Limitaciones en fluorescencia (Raman); interferencia espectral (FTIR)	Investigación de cambios moleculares en drogas y materiales	Ojha & Ojha, 2022
Raman	Desarrollo de 5 sensores para drogas como NBOMe, DMT, fentanilo, entre otros	Alta sensibilidad, portabilidad y análisis in situ; útil para trazas en fluidos biológicos	Requiere validación específica para cada compuesto y matriz	Detección preliminar en toxicología y muestras incautadas	González Hernández (2023)
SERDS	Alta precisión de clasificación (97.3%) mediante SVM optimizado	Detección rápida de NPS como fentanilo, cannabinoides, anfetaminas	Requiere optimización compleja de modelos ML	Seguridad en eventos, inspección de aduanas, salud pública	Tian et al., 2023
SERS	Desarrollo de sustratos diversos (nanopartículas, papel, microfluidicos); incorporación de quimiometría	Alta sensibilidad y selectividad; detección en mezclas y matrices complejas	Limitado uso comercial; falta de validación estandarizada	Química forense y toxicología	Ott & Arroyo, 2023 (26)
RMN					
RMN	Uso creciente de sistemas de mesa de campo bajo (40-100 MHz) y aplicación a perfiles metabolómicos y sustancias sintéticas.	Promete análisis estructurales detallados y perfilamiento bioquímico.	Costoso, menos sensible que espectrometría de masas; limitado en análisis en campo.	Análisis estructural, identificación de cannabinoides, casos de envenenamiento y falsificación.	Urbas et al., 2023; Santos et al., 2018
RMN	Predicción precisa de desplazamientos químicos y estructuras con precisión DFT	Identificación estructural de drogas como cocaína en sólidos amorfos	Alta dependencia de datos experimentales y estructura local	Elucidación estructural de drogas incautadas	Paruzzo et al. (2018)
XRD - XRF					
XRF / XRD	Fusión de datos con otras técnicas mejora la clasificación; XRD útil para determinar distancia de disparo	Permite análisis estructural preciso y no destructivo, útil para evidencias inorgánicas	Limitado a materiales cristalinos; equipos de mayor costo	Análisis de vidrio, residuos de disparo, reconstrucción balística	Leiva Miranda (2020)
XRPD	Aplicación en NPS con patrones de difracción específicos	Identificación precisa incluso en mezclas donde IR/Raman fallan	Infraestructura costosa; menos portátil	Análisis confirmatorio en drogas sintéticas incautadas	Jurásek et al., 2020

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de técnicas espectrométricas ha permitido la identificación rápida, no destructiva y sensible de sustancias, y ha revolucionado el análisis de drogas de abuso en el ámbito forense. En este contexto, la espectroscopía Raman ha atraído mucha atención, pues permite la detección de drogas, y en particular de compuestos desconocidos, incluso fuera de los laboratorios, a través de dispositivos portátiles que permiten su aplicación en aeropuertos, fronteras y entornos operativos en campo; este modelo ha sido respaldado tanto por Ott como por Arroyo, quienes señalan que las versiones portátiles del sistema tienen potencial para la detección *in situ* de sustancias ilícitas, pero expresan preocupaciones sobre el costo del equipo y la interpretación de datos de muestras complicadas o mixtas y argumentan que su uso está restringido por esto en entornos forenses más formales (26). El potencial del Raman también se ha ilustrado para la preservación de muestras, como lo demuestra Silva et al.,

quienes lograron la identificación de cannabinoides sintéticos a partir de sellos de papel incautados sin causar ningún daño a la muestra, lo cual es obligatorio para posteriores pruebas judiciales (30).

Además de este método, se ha demostrado que la espectroscopía Raman de diferencia de excitación desplazada (SERDS) es aplicable para la detección de sustancias psicoactivas emergentes (NPS) como los fentanilos y los cannabinoides sintéticos; la dificultad en la detección causada por la interferencia de fluorescencia se mitiga mediante SERDS, pero no con la espectroscopía Raman convencional. Tian et al. emplearon este enfoque en combinación con el aprendizaje automático para permitir una identificación rápida y precisa de los analitos en el campo, apoyando aún más su posición como una tecnología segura y de control de drogas (31). No obstante, aunque estas herramientas se han beneficiado del progreso tecnológico, la integración definitiva en la práctica forense requeriría una validación más profunda de sus aspectos técnicos y legales para que su admisibilidad en los tribunales pueda ser garantizada (26).

Por otro lado, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) se ha aplicado ampliamente al análisis de compuestos bioactivos en productos naturales, incluidas las plantas medicinales, para lo cual proporciona interesantes ventajas operativas en comparación con los métodos convencionales, debido al hecho de que no se requiere preparación de muestras y los análisis son rápidos y no destructivos. Beć et al. indican que este método es valioso para muestras con alta variabilidad química, debido a diferentes factores, como el origen geográfico y las condiciones de crecimiento; sin embargo, la aplicación de la NIR *in situ* es un problema para el futuro (27). Silva et al. mencionan que los modelos estadísticos y quimiométricos, son un factor importante y se debe validar estrictamente cualquier parámetro estadístico (modelos), especialmente en una matriz compleja, puede tener una gran influencia en los resultados analíticos (28).

El desarrollo de sensores miniaturizados ha permitido que la espectroscopía NIR se aplique en nuevas áreas; un estudio de Kranenburg et al. mostró que una tecnología de sensor de píxeles en modo de producción en masa basada en InGaAs sobre silicio, implementada en un dispositivo móvil, logró clasificar un panel de 11 drogas ilícitas, medicamentos y adulterantes con una tasa de éxito de más del 90 %, incluso en casos reales como la detección de cocaína y MDMA, lo que indica su potencial para aplicaciones en el campo por parte de autoridades forenses; por otro lado, Correia et al. utilizaron la espectroscopía NIR portátil para la discriminación de drogas sintéticas de LSD y MDMA y la determinación de concentraciones de cocaína a partir de muestras auténticas de drogas, demostrando el potencial de este enfoque para diferenciar muestras auténticas de muestras falsificadas en entornos forenses (32,34).

La espectroscopía Raman también ha sido investigada para las huellas latentes contaminadas. Amin et al. usaron Raman con un método estadístico multivariante y lograron una discriminación 100% correcta para la presencia o ausencia de trazas de medicamentos antiinflamatorios no esteroideos en las huellas implantadas, demostrando así que Raman es una técnica a explorar en el contexto de detección de trazas de drogas en una escena del crimen (33). En un estudio de diferentes métodos espectroscópicos, Eliaerts et al. compararon el rendimiento de las tecnologías MIR, Raman y NIR para el análisis de polvos de cocaína; la espectroscopía MIR alcanzó la mayor precisión de clasificación (99.7%) y NIR fue destacable por su capacidad de cuantificación, siendo capaz de predecir los niveles de vitamina C con bajo error (RMSECV = 3.79%), evidenciando que la elección de la técnica espectroscópica a menudo depende del propósito analítico (35). Además de las espectroscopías habituales, la difracción de rayos X ha sido identificada como una técnica poderosa en el análisis de drogas ilícitas, Jurásek et al. demostraron que nuevas sustancias psicoactivas que escapan a la detección de métodos estándar como Raman o IR pueden ser específicamente reconocidas, representando así una solución complementaria viable e interesante para la ciencia forense contemporánea; sin embargo, el GC-IMS,

según lo evaluado en el trabajo de Denia et al., mostró una excelente detección de sustancias psicoactivas residuales en fluidos orales con un límite de detección bajo de 6–15 $\mu\text{g L}^{-1}$, recomendándolo como una técnica analítica forense y sensible (36,37).

Para finalizar, la creciente tendencia de utilizar las mencionadas tecnologías IRTC (FTIR y NIR) también ha sido destacada por Sharma y Kumar, señalando que la caracterización no destructiva, rentable y confiable de FTIR y NIR es útil para clasificar la evidencia forense; la combinación de estos métodos con un enfoque quimiométrico para un mejor pronóstico de resultados y reforzando su admisibilidad en arbitrajes judiciales, está en línea con el llamado a estrategias analíticas robustas y reproducibles en la ciencia forense actual; estas tres técnicas han revolucionado el campo del análisis forense de drogas y aunque cada una tiene limitaciones técnicas y operativas, su desarrollo continuo junto con los métodos de aprendizaje automático y quimiométricos ofrece un futuro prometedor para la detección precisa y rápida de sustancias ilícitas (26, 38).

Ventajas y limitaciones de las técnicas espectroscópicas comparadas con métodos tradicionales de análisis forense

Los métodos espectroscópicos han ganado popularidad en varios campos, especialmente en la caracterización o detección de sustancias, debido a su alta sensibilidad y precisión, una de las principales ventajas de estas tecnologías es la capacidad de obtener de manera rápida y no destructiva información detallada sobre la química de una muestra, lo cual es ventajoso para propósitos forenses, clínicos y ambientales. Por ejemplo, la combinación de espectros Raman e inteligencia artificial es muy poderosa para reconocer la composición de sustancias con alta sensibilidad y rapidez, pero con altos requisitos de preprocesamiento complejo y modelos entrenados (39). Además, métodos como la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) demostraron el mismo nivel de rendimiento; son rápidos y precisos, pero también presentan variabilidad según la naturaleza de la muestra, por ejemplo, cabello humano, también se deben tener en cuenta algunas limitaciones técnicas de los métodos espectroscópicos. La espectroscopia de absorción atómica (AAS), por ejemplo, tiene buena sensibilidad para el análisis multielemental, aunque requiere una adecuada implementación técnica y no puede realizar un perfil de detección rápido en el campo (41,45). De igual manera, las espectroscopías Raman y FTIR, aunque ambas son altamente precisas, dependen de la interpretación experta de los espectros y una calibración estricta para generar resultados confiables, en cuanto a la espectrometría de masas y la cromatografía, que a menudo se emplean en las técnicas convencionales, aunque tienen alta precisión y rapidez, requieren confirmaciones adicionales en casos positivos, lo que lleva a una prolongación del tiempo de respuesta en comparación con las técnicas espectroscópicas (43,46).

Otra desventaja importante de los análisis espectroscópicos es la complejidad del calibrado multivariante desarrollado, especialmente en técnicas de espectroscopía láser basadas en MVA (LIBS, LRM + ML), las calibraciones y modelos pueden tener errores en función de las líneas espectrales utilizadas; las aplicaciones de herramientas como la espectroscopía infrarroja para el diagnóstico de biofluidos, aunque también prometedoras, pueden llevar a resultados diferentes debido a la heterogeneidad de los fluidos y a las metodologías utilizadas para el análisis (40,41). En aplicaciones forenses, métodos como la espectroscopía de rayos X dispersiva de energía (EDXRF) y la espectroscopía de absorción atómica también sufren los mismos inconvenientes de requerir calibración sofisticada y son específicas para aplicaciones forenses; tales desventajas pueden comprometer la fiabilidad de los resultados, especialmente cuando se solicita la identificación de rastros o sustancias en muestras con un alto grado de precisión, a pesar de estos inconvenientes, los métodos espectroscópicos pueden seguir siendo el método de elección ya que producen resultados precisos sin destrucción de la muestra y son bastante rápidos, un hecho importante cuando se requiere conservar tiempo y muestras (44).

La Tabla 5 a continuación compara varios métodos analíticos para drogas forenses y especies, los estudiosos seleccionados presentan enfoques innovadores como la espectroscopía Raman asistida por IA, la espectroscopía de absorción atómica (AAS) y NIR, y otras técnicas con notable sensibilidad y precisión para la detección de sustancias psicoactivas; estos métodos se caracterizan por la posibilidad de determinar compuestos con muy alta fiabilidad y rapidez, de modo que encuentran aplicaciones en la detección de drogas ilegales y en la identificación de huellas de mezclas complejas, sin embargo, hasta ahora cada uno de estos procesos también tiene limitaciones y no están exentos de defectos; requieren una calibración exacta, una preparación especial y compleja de muestras, y la realización técnica necesita técnicas de alta categoría; no obstante, estas limitaciones, las técnicas de análisis actuales tienen un tremendo potencial para mejorar la eficiencia y rapidez de la detección forense de drogas con aplicación típica en la criminología y aspectos legales.

Tabla 5. *Ventajas y limitaciones de las técnicas analíticas en la detección forense de drogas y sustancias.*

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Referencia
SERS (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy)	Alta sensibilidad, selectividad y portabilidad; análisis no destructivo	Requiere validación forense adicional; interferencias de fluorescencia	Ott & Arroyo, 2023 (26)
Espectroscopía NIR	Rápida, económica, sin preparación de muestra; ideal para análisis in situ	Menor especificidad frente a técnicas como Raman o GC-MS	Beć et al., 2021 (27); Kranenburg et al., 2022 (32); Correia et al., 2018 (34)
Raman + Quimiometría / IA	Identificación precisa y no destructiva, útil para mezclas complejas; resistencia a interferencias	Costo de equipos; requiere entrenamiento algorítmico y validación	Silva et al., 2019 (28); Pan et al., 2022 (39); Tian et al., 2023 (31)
FTIR / ATR-FTIR	Económica, no destructiva, útil para biofluidos y evidencia traza	Interferencia por humedad; menos específica para mezclas complejas	Sharma & Kumar, 2019 (38); Naseer et al., 2021 (41)
GC-IMS	Alta sensibilidad y precisión; útil para fluidos orales	Requiere preparación de muestra y estándares	Denia et al., 2022 (37)
XRPD	Complementaria a IR y Raman; eficaz con mezclas sólidas	Limitada para líquidos o materiales no cristalinos	Jurásek et al., 2020 (36)
Cromatografía de gases (GC)	Alta especificidad; válida como prueba pericial	No portátil; requiere extracción y preparación	Guambo & Manzano, 2025 (45)
Espectroscopía vibracional (Raman, FTIR, NIR) + PCA/MCR-ALS	Combinación poderosa para análisis forense de trazas	Depende de bases de datos robustas y algoritmos	Silva et al., 2019 (28); Leiva Miranda, 2020 (44)
Sensores electroquímicos	Portátiles, sensibles, económicos; aplicables in situ	Requieren validación cruzada con métodos de referencia	Rotemberg et al., 2022 (46)
LIBS + Raman + IA	Rápido, multielemento, permite clasificación y trazabilidad	Alto costo; requiere infraestructura computacional	Bhatt, 2022 (40)
Espectrometría de absorción atómica (AAS)	Multi-elemento, alta sensibilidad	No específica para compuestos orgánicos	Ferreira et al., 2018 (42)

Fuente: Elaboración propia.

El progreso en las técnicas espectroscópicas ha resultado en grandes logros en el análisis de sustancias y tiene, por ejemplo, muchas aplicaciones en la identificación de sustancias en mezclas complejas y en toxicología forense y diagnósticos médicos; en este escenario, se ha demostrado en varias investigaciones que la inteligencia artificial (IA) y el análisis multivariado, cuando se aplican a técnicas como la espectroscopía Raman, la espectroscopía FTIR, entre otras, han cambiado la forma en que se lleva a cabo el análisis de muestras complejas, proporcionando ventajas sobre los métodos tradicionales.

Un avance que ilustra el progreso de la espectroscopía Raman, junto con algoritmos de inteligencia artificial, hacia la identificación no destructiva de compuestos en mezclas químicas, Pan et al., (2022) la espectroscopía Raman es una técnica vibracional que proporciona un análisis molecular detallado de diferentes materiales; sin embargo, la presencia de materiales naturales en composiciones mixtas es complicada; ahora se afrontan y mejoran estos desafíos usando IA, en particular enfoques de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, para mejorar la precisión de las predicciones y el tiempo de análisis, este enfoque ofrece un medio de estudio más rápido y preciso que un método convencional que frecuentemente toma mucho tiempo y complejidad en la preparación de muestras (39).

En el ámbito forense, Bhatt (2022) discute la aplicación de la espectroscopía basada en láser y el aprendizaje automático para el análisis rápido y fiable de materiales nucleares, empleando métodos como la espectroscopía Raman y la espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS), junto con modelos de aprendizaje automático, es posible detectar cantidades ínfimas de uranio en materiales muy complejos con una precisión excepcional; en este sentido, este trabajo es un testimonio de los beneficios de superar los problemas intrínsecamente asociados con las técnicas espectroscópicas convencionales, como la complicada interpretación de datos multivariados, aumentando las capacidades analíticas usando IA (40). Naseer et al. (2021) están explorando el uso de la espectroscopía ATR-FTIR, que parece ser un candidato potencial para el diagnóstico de fluidos biológicos como sangre, saliva y huellas espectrales ópticas de la orina, se propone la posibilidad de utilizar ATR-FTIR como una alternativa a los análisis clásicos, ya que no requiere una preparación invasiva o compleja y proporciona una composición molecular completa de los biofluidos; al comparar varias técnicas y algoritmos de análisis quimiométrico, los autores plantean la hipótesis de que ATR-FTIR podría convertirse en una técnica habilitadora para su posible aplicación en diagnósticos médicos, especialmente debido a su rendimiento no invasivo y rápido (41).

Desde la perspectiva espectroscópica, nos referimos a Ojha y Ojha (2022) para obtener una visión general de la espectroscopía Raman y FTIR, que son métodos no destructivos y sofisticados que permiten el estudio de eventos moleculares en formas sólidas, líquidas y gaseosas, ambas técnicas son sensibles a la estructura y cualquier modificación en la estructura se manifiesta en sus firmas espectroscópicas, que incluyen la posición de los picos, el ancho completo a la mitad de la altura (FWHM) y la intensidad, son importantes para mejorar la correlación entre la estructura molecular y el espectro; se señala en el artículo que los desarrollos recientes en estos enfoques han permitido que estos métodos sean ampliamente adoptados en varios campos de las ciencias, yendo más allá de la física, la química, la biología y la ciencia de materiales, y pueden ser utilizados para numerosos propósitos de grabación en tiempo real (43). Por el contrario, Ferreira et al. (2018) cubren la transición de la espectrometría de absorción atómica (AAS) a la espectrometría de absorción atómica de fuente continua de alta resolución (HR-CS AAS), este enfoque ha abordado las restricciones de instrumentos anteriores, por ejemplo, baja sensibilidad y corrección de fondo y ha abierto nuevas posibilidades para aplicaciones multielementales con mayor precisión, este avance demuestra cómo los métodos espectroscópicos mejorados pueden proporcionar herramientas más avanzadas para el análisis ambiental, alimentario y de materiales que los métodos de análisis más tradicionales (42). En cuanto a la ciencia forense, Leiva Miranda (2020) enfatiza la importancia de los métodos no destructivos y el análisis multidimensional de los objetos investigados forensemente, los estudios del examen de vidrio, pinturas automotrices y residuos de disparo utilizando SEM-EDX, FTIR y quimiometría son buenos ejemplos de tales herramientas como instrumentos rápidos, sensibles y no destructivos para un análisis adicional; Los modelos de calibración multivariada como LDA y OPLS-DA permiten la clasificación exitosa de muestras, indicando la importancia en la preservación de la integridad forense de la evidencia (44).

Varios estudios demuestran la efectividad de las técnicas espectroscópicas en la detección de drogas ilícitas en comparación con las utilizadas tradicionalmente, el estudio de Guambo y Manzano (2025) investiga la detección de drogas en cabello humano utilizando espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR). NIR presenta muchas ventajas: es muy rápida, no destructiva y altamente sensible, lo que permite la detección precisa de sustancias como la cocaína, las anfetaminas y los opioides; sin embargo, los autores señalan algunas limitaciones, incluyendo la necesidad de calibrar el método para tener en cuenta diferentes tipos de cabello y que la absorción del NIR podría cambiar debido a otros aspectos, como el color y la textura del cabello, pero NIR permite conservar la muestra para investigaciones posteriores y esa es la razón por la cual NIR merece una mejor consideración que las técnicas clásicas, como la cromatografía o la espectrometría de masas (45). En una línea de investigación diferente, Rotemberg, Picapedra y Kreiner (2022) investigan la detección de drogas en saliva, un fluido biológico fácilmente accesible que no implica el riesgo de manipulación inadecuada de fluidos corporales por no especialistas en un lugar de trabajo o en la calle; la saliva, aunque limitada en la duración (5-48 horas después de su consumo) y en la concentración para la detección de drogas, es conveniente por su recolección y la inmediatez de su análisis y podría ser útil para prevenir el consumo reciente de drogas o para monitorear a personas en programas de tratamiento, los autores señalan que todos los resultados positivos deben ser revisados con un ensayo subsecuente para confirmar la precisión del diagnóstico (46).

Con respecto al área de nuevas sustancias psicoactivas, González-Hernández (2023) enfatiza la relevancia de los sensores electroquímicos en la detección de NPS, estos sensores se caracterizan por su alta sensibilidad, precisión y capacidad para ser miniaturizados, lo que los hace ideales para aplicaciones de análisis portátiles, como se observa, por ejemplo, en procedimientos de emergencia o en lugares donde la disponibilidad de laboratorios dedicados es limitada; es esencial comparar estos sensores con métodos convencionales, tales como la espectrometría de masas, para confirmar su relevancia forense; el trabajo de Vergara González (2024) está relacionado con la validación de la prueba de Marquis y la espectroscopía IR para detectar 3,4-metilendioxi-anfetamina (MDMA), el estudio confirma la aplicabilidad de métodos colorimétricos y espectroscópicos con respecto al límite de detección, especificidad y precisión aplicada, el trabajo subraya la importancia de las técnicas espectroscópicas para la ciencia forense, especialmente para la caracterización de drogas controladas cuando la muestra es escasa o perjudicial (47,48).

Las nuevas técnicas de espectroscopía, como la espectroscopía Raman, NIR, ATR-FTIR y los sensores electroquímicos, pueden presentar varias ventajas en términos de velocidad operativa, precisión y no destructividad en comparación con los métodos tradicionales de análisis, sin embargo, los límites de validez de cada uno de estos dos enfoques están condicionados por calibraciones particulares; sensibilidad a las condiciones experimentales y se requieren más confirmaciones para asegurarse de que los resultados sean fiables (39-48).

Desafíos tecnológicos y operativos en la implementación de técnicas espectroscópicas utilizadas en la detección de drogas sintéticas

Los factores técnicos y prácticos limitantes en el uso del método para la criminología y la seguridad siguen sin resolverse, incluyendo el desarrollo de procedimientos espectroscópicos para el análisis de

nuevas drogas sintéticas; tecnológicamente, métodos como la espectroscopía Raman, la espectroscopía infrarroja y la cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) han encontrado limitaciones importantes en cuanto a su sensibilidad y especificidad (49,50). Las matrices complejas, como los fluidos biológicos o las mezclas de drogas ilícitas pueden estar presentes y afectar la precisión de las mediciones, haciendo que sea difícil diferenciar entre sustancias desconocidas o mezclas de drogas sintéticas; además, la resolución y selectividad limitadas de algunos métodos, como la espectroscopía Raman no han alcanzado los niveles ideales requeridos para la identificación inequívoca de sustancias en condiciones reales (52,57).

Desde un punto de vista operativo esto requiere la capacitación del personal, ya que la correcta aplicación de estas técnicas depende de una comprensión de la instrumentación y la interpretación de los resultados, así como de la capacidad para optimizar los parámetros del instrumento para cada muestra examinada (53, 58-60). Algunas limitaciones en la portabilidad de algunos de estos dispositivos también representan un desafío operativo, particularmente en el campo o cuando se requiere una respuesta rápida; además, los métodos espectroscópicos suelen estar asociados con altos costos, desde la adquisición del equipo hasta el mantenimiento y la operación, siendo difícil de aplicar en laboratorios con bajos recursos, para abordar estos desafíos, necesitamos aumentar la sensibilidad en las tecnologías, miniaturizar dispositivos para mediciones de campo y crear plataformas integradas con espectroscopia e inteligencia artificial para automatizar el análisis, por último deben definirse procedimientos de capacitación continua para el operador forense y deben establecerse regulaciones para garantizar que las tecnologías se utilicen de manera más prudente en la realidad (63-65).

La Tabla 6 presenta un análisis comparativo de los métodos analíticos utilizados para la determinación de drogas de abuso en el ámbito forense, obtenido a partir de una revisión exhaustiva con múltiples criterios primarios, para su elaboración, se utilizó la literatura científica de los últimos 10 años, dando preferencia a aquellos artículos con un mayor factor de impacto y relacionados con la química forense, se evaluó una amplia gama de plataformas instrumentales, como la cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS), la espectroscopia de resonancia magnética nuclear, la espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS), sensores electroquímicos portátiles y otros. También se evaluaron la matriz estudiada (biológica, incautada), las dificultades técnicas y operativas descritas por los autores y las mejoras propuestas, entre estas tecnologías, los dispositivos portátiles de punto de atención (POC) ofrecen la ventaja de una detección rápida y confiable de sustancias de interés en diferentes entornos, además de estos factores, se evaluó su idoneidad práctica para escenarios de investigación criminal, su carácter innovador y su viabilidad en términos de tiempo, costo y operación.

Tabla 6. *Desafíos y avances en las técnicas analíticas en la detección de drogas ilícitas en la investigación forense.*

Título del Artículo	Técnica	Matriz	Desafíos tecnológicos	Desafíos operativos	Posibles mejoras	Referencia
Peritaje de drogas sintéticas por cromatografía de gases y su relación con el proceso penal por tráfico ilícito de drogas, Lima 2021	Cromatografía de gases	Drogas sintéticas incautadas	Limitada capacidad de discriminación en mezclas complejas; dependencia de condiciones estandarizadas	Necesidad de capacitación continua del personal; fiabilidad en la cadena de custodia	Automatización del análisis; integración con espectrometría de masas	Maldonado Laurente, 2022 (49)

Desarrollo de sensores electroquímicos para la determinación de drogas sintéticas en fluidos biológicos y muestras de incautación	Sensores electroquímicos y espectroelectroquímicos	Fluido oral, orina, muestras incautadas	Sensibilidad de detección para diversas drogas; selectividad en matrices complejas	Portabilidad y manipulación in situ; calibración adecuada	Desarrollo de kits portátiles con interfaz amigable y base de datos integrada	González Hernández, 2023 (50)
Espectroscopia Vibracional Como Una Alternativa Para La Discriminación De Drogas Ilícitas Incautadas En La Ciudad De Cúcuta	ATR-FTIR + LDA	Drogas incautadas (cocaína base y clorhidrato)	Discriminación entre formas de cocaína con adulterantes; normalización espectral	Validación cruzada en diferentes equipos y condiciones	Incorporación de modelos robustos de aprendizaje automático	Mendez-Hernandez et al., 2020 (51)
A review of 1D convolutional neural networks toward unknown substance identification in portable Raman spectrometer	Espectroscopía Raman + Redes Neuronales (1D-CNN)	Sustancias desconocidas (campo)	Limitaciones de bases de datos de referencia; espectros de mezclas difíciles de identificar	Limitaciones de potencia y capacidad computacional en dispositivos portátiles	Optimización de modelos de redes neuronales para uso en campo	Mozaffari & Tay, 2020 (52)
Comparison of augmentation and pre-processing for deep learning and chemometric classification of infrared spectra	Espectroscopía Infrarroja + Deep Learning	Espectros IR (drogas en general)	Efectos de dispersión y distorsiones instrumentales; datos limitados	Selección del preprocesamiento adecuado para cada clasificador	Aplicación de técnicas de aumento como EMSA para mejorar el rendimiento con DL	Blazhko et al., 2021 (53)
Chemical shifts in molecular solids by machine learning	RMN + Aprendizaje automático	Sólidos moleculares (incluye drogas como cocaína)	Dependencia de entornos químicos; alta demanda computacional para cálculos cuánticos	Escasez de bases de datos experimentales de desplazamientos químicos	Entrenamiento de modelos ML basados en entornos locales para predicción precisa	Paruzzo et al., 2018 (54)
New Raman spectroscopic methods' application in forensic science	Espectroscopía Raman (SERS, SERDS, SORS)	Embalajes, drogas, explosivos, rastros de sustancias	Sensibilidad frente a interferencias, integración de técnicas múltiples	Detección directa sin destrucción de evidencias, manipulación de materiales complejos	Desarrollo de métodos combinados y portátiles con mayor sensibilidad	Mojica & Dai, 2022 (55)
Infrared spectroscopy and forensic entomology: Can this union work?	Espectroscopía infrarroja (NIRS, MIRS) con análisis multivariado	Insectos (larvas), productos almacenados	Baja exploración en entomología forense, técnicas subutilizadas	Escasa aplicación directa en investigaciones forenses	Mayor desarrollo de estudios aplicados a la entomología forense, expansión de su uso en otras áreas	Jales et al., 2021 (56)
Forensic seized drug analysis: Current challenges and emerging analytical solutions	GC-MS, FTIR, colorimetría, nuevas tecnologías emergentes	Muestras complejas, drogas incautadas	Sustancias nuevas y no identificadas, límites de técnicas tradicionales	Validación y adopción lenta de nuevas tecnologías en laboratorios forenses	Implementación de nuevas tecnologías, automatización, análisis de datos mejorado	Joshi & Sisco, 2023 (57)
Recent advances in the use of surface-enhanced Raman scattering for illicit drug detection	SERS (Surface-enhanced Raman scattering)	Muestras líquidas y biológicas (saliva, sangre, orina)	Fabricación de sustratos adecuados, detección cuantitativa	Detección en matrices complejas, portabilidad	Mejora en los sustratos SERS, análisis in situ y portátiles	Azimi & Docoslis, 2022 (58)

On-site analytical techniques for forensic chemistry	Espectrometría de masas, electroquímica, espectroscopía portátil	Drogas en escena del crimen, aduanas, vigilancia	Miniaturización de equipos, sensibilidad	Logística de campo, capacitación operativa	Desarrollo de dispositivos compactos, bajo consumo de reactivos, análisis rápido	Cardoso et al., 2025 (59)
Recent advances in the direct electrochemical detection of drugs of abuse	Detección electroquímica directa	Muestras incautadas, fluidos biológicos, aguas residuales	Diferenciación de nuevas sustancias psicoactivas	Escalabilidad y portabilidad en campo	Sensores electroquímicos portátiles personalizados para screening masivo	Zanfrotnini et al., 2020 (60)
Chemometrics and infrared spectroscopy—A winning team for the analysis of illicit drug products	Espectroscopía infrarroja y Raman combinadas con quimiometría	Productos de drogas ilícitas	Limitaciones en el desarrollo de librerías espectrales robustas; necesidad de validación estadística confiable	Falta de entrenamiento del personal en quimiometría; integración rutinaria en laboratorios móviles	Mayor integración de modelos quimiométricos validados; formación profesional en análisis multivariante	Deconinck et al., 2022 (61)
Advancements in colorimetric and fluorescent-based sensing approaches for point-of-care testing in forensic sample analysis	Técnicas colorimétricas y fluorescentes	Muestras forenses generales (ADN, residuos de disparo, drogas, etc.)	Desafíos de sensibilidad, especificidad y estandarización	Falta de estandarización en condiciones reales; dependencia de reactivos	Desarrollo de sensores duales; plataformas microfluídicas; colaboración interdisciplinaria	Rasheed et al., 2024 (62)
Mass spectrometry analysis of drugs of abuse: challenges and emerging strategies	Espectrometría de masas (GC-MS, LC-MS, ionización ambiente)	Drogas de abuso en fluidos biológicos y muestras incautadas	Proliferación de nuevas sustancias psicoactivas de alta potencia; complejidad en identificación	Requiere alta especialización; alto costo y tiempo en preparación de muestras	Automatización del pretratamiento; técnicas de ionización directa más rápidas	Borden et al., 2020 (63)
NMR in forensics	Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (NMR) de sobremesa	Suero, humor acuoso y vítreo; drogas en estado sólido o líquido	Limitaciones en la sensibilidad de sistemas de baja resolución; necesidad de modelos cuantitativos robustos	Costos iniciales; falta de personal entrenado en análisis NMR	Expansión del uso de sistemas portátiles de RMN; integración con modelos predictivos	Urbas et al., 2023 (64)
Forensic NMR spectroscopy: Just a beginning of a promising partnership	Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (NMR)	Drogas sintéticas, casos de intoxicación, fraudes, explosivos	Uso limitado y simplificado hasta ahora; falta de protocolos estandarizados	Poca colaboración entre químicos analíticos y forenses	Alianzas interdisciplinarias; validación de protocolos y ampliación del campo de aplicación	Santos et al., 2018 (65)
Desarrollo de una metodología para el perfilamiento de drogas de síntesis y nuevas sustancias psicoactivas detectadas en Colombia	GC/MS, GC/FID, HPLC/QTOF, PCA, HCA	Drogas sintéticas y nuevas sustancias psicoactivas incautadas	Diferenciación de compuestos análogos; necesidad de métodos de segundo nivel para identificación precisa	Clasificación y agrupamiento de grandes volúmenes de datos forenses	Implementación de algoritmos quimiométricos y técnicas multivariadas para establecer rutas de síntesis	Ocampo Chaguendo, 2021 (66)
Optimización de métodos GC-MS para la detección de metanfetamina, cocaína y fentanilo empleando la estrategia Lean Six Sigma	GC-MS	Drogas incautadas (metanfetamina, cocaína, fentanilo)	Limitaciones en la velocidad de análisis previo a la optimización; necesidad de alta sensibilidad y especificidad	Alta demanda de procesamiento por parte del laboratorio; tiempos prolongados de respuesta	Aplicación de Lean Six Sigma para optimización del flujo analítico, reduciendo el tiempo en un 70%	Ruiz et al., 2022 (67)

State-of-the-art analytical approaches for illicit drug profiling in forensic investigations	GC-MS, LC-MS, UHPLC, GC-IRMS, IRMS, ICP-MS, TLC	Drogas ilícitas incautadas (orgánicas e inorgánicas)	Necesidad de múltiples técnicas para identificación completa de impurezas y rutas de síntesis	Elección adecuada del método según tipo de muestra; manejo de complejidad técnica y equipamiento costoso	Combinación estratégica de técnicas espectroscópicas y cromatográficas para aumentar la especificidad del perfilado	Ahmed et al., 2022 (68)
--	---	--	---	--	---	-------------------------

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de métodos espectroscópicos en la detección de drogas sintéticas presenta inconvenientes tecnológicos y operacionales que afectan su uso en la seguridad forense y pública, estas dificultades se discuten en diversas publicaciones, tanto por los avances como por las limitaciones en la aplicación de la metodología. Maldonado Laurente (2022) enfatiza que la cromatografía de gases (GC), aunque adecuada para la identificación de drogas sintéticas, tiene una baja independencia de rendimiento, dependiendo una vez más de la experiencia de sus operadores y la complejidad y el costo de su instrumentación y con oportunidades reducidas para su uso en campo; el estudio de González Hernández de 2023 sobre la producción de sensores electroquímicos reconoce que estos dispositivos son rentables y sencillos en relación con los enfoques espectroscópicos; sin embargo, carecen de especificidad para la detección de una amplia gama de drogas sintéticas (49,50).

Por otro lado, se ha informado y establecido por Méndez-Hernández et al. (2020) que el ATR-FTIR es un enfoque interesante a la cromatografía de gases, ya que ofrece la posibilidad de distinguir entre la cocaína base y el clorhidrato de cocaína en muestras adulteradas, este método también enfrenta desafíos para distinguir moléculas en matrices complejas debido a la exigencia de normalización del espectro o análisis multivariante, lo cual requiere conocimientos avanzados de la técnica (51). Mozaffari y Tay (2020) discuten que, aunque la espectroscopia Raman se utiliza frecuentemente, se basa en bases de datos espectrales relativamente compactas que solo ayudan parcialmente en la identificación de desconocidos y mezclas ubicadas en entornos de campo (52). En línea con esta opinión, Mojica y Dai (2022) subrayan la flexibilidad de las técnicas de espectroscopia Raman de última generación para la identificación más precisa de compuestos orgánicos en matrices complejas, pero también notaron que, junto con otros parámetros relevantes (es decir, intensidad del láser, material del sustrato, condiciones de manipulación de la muestra, etc.), el método es muy sensible, lo que representa un problema adicional para sus aplicaciones rutinarias (55).

En la presentación del uso de 1D CNN en espectroscopía Raman, introducida en el trabajo de Mozaffari y Tay (2020), hemos proporcionado un método novedoso para abordar los aspectos negativos asociados con las técnicas tradicionales de comparación espectral, como afirman Blazhko et al. (2021), el inconveniente es el preprocesamiento de los espectros que debe realizarse antes de aplicar estos métodos de aprendizaje profundo, lo cual puede constituir un desafío logístico para configuraciones, Paruzzo et al. (2018) señalan que la aplicación de tales métodos en el análisis de drogas sintéticas está muy restringida, ya que la complejidad de los cálculos es muy alta para estas técnicas, aunque el uso de algoritmos de aprendizaje automático está ofreciendo nuevas formas para la identificación de sustancias en el caso de técnicas de resonancia magnética nuclear (RMN) (52-54). Como señalan Azimi y Docoslis (2022), el uso de SERS (Espectroscopía Raman mejorada por superficie) tiene un potencial significativo para la detección de concentraciones traza de drogas ilícitas en muestras acuosas y biológicas; sin embargo, la implementación práctica de SERS está limitada por la fabricación y el uso de sustratos de alta calidad que se emplean para realzar las señales Raman, no obstante la rapidez y sensibilidad son factores que juegan a favor de SERS en comparación con los métodos tradicionales, más específicamente, se ha encontrado que la espectroscopía SERS es tanto rápida como sensible,

pero variable, debido a efectos de superficie, materiales en polvo y algunas estimaciones derivadas de estándares de drogas puras, entre otros problemas, lo que indica la necesidad de más pruebas (58).

Los autores Blázquez et al. (2022) demostraron que la espectroscopía Raman, junto con modelos quimiométricos puede servir para la detección de drogas ilícitas y para una aplicación forense más amplia, como en fibras o residuos orgánicos; además, Jales et al. (2021) dicen que las técnicas instrumentales como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y la espectroscopía de infrarrojo medio (MIRS) no se han aplicado ampliamente en el campo de la entomología forense, pero también podrían ser explotadas en un contexto forense incluyendo pruebas de drogas y sustancias presentes en mezclas más complejas (56, 62). Además, Moffat et al. (2023) y dos Santos et al. (2022) han argumentado que el establecimiento de conjuntos de entrenamiento específicos y bases de datos estándar y sistemas portátiles compactos que combinan espectroscopia Vis-UV y análisis multivariado permitirán el cribado no invasivo *in situ* de sustancias ilícitas, aunque se advierte que todavía existe un desafío significativo para la estandarización global de estos sistemas para ser validados; Joshi y Sisco (2023) hablan en última instancia de cómo métodos antiguos como la cromatografía y la espectroscopia infrarroja no han podido seguir el ritmo de las demandas actuales, como el análisis de muestras más complejas, y el deseo de resultados más rápidos (57,67,68). Aunque se observan limitaciones, los avances en el sensor electroquímico y la espectroscopía de espacio de cabeza portátil de mano están proporcionando soluciones potencialmente atractivas a estos desafíos operativos, llamando la atención sobre la facilidad de uso y la versatilidad de estos sensores (aunque su especificidad es inferior en comparación con técnicas más avanzadas, como la espectroscopia Raman) (50).

Según las investigaciones consideradas, aunque los métodos de espectroscopia y los sensores para la identificación de narcóticos sintéticos han avanzado mucho, todavía existen algunos desafíos importantes en cuanto a precisión, tiempo de análisis, precio del dispositivo y demanda de operadores experimentados, la superación de estos cuellos de botella tecnológicos y prácticos será esencial para el éxito de estas tecnologías en la interceptación del tráfico de drogas en el futuro. El progreso reciente en técnicas de detección forense incluyó el avance de herramientas portátiles para estudios *in situ* que permiten un análisis rápido y preciso de sustancias en el lugar, esto es especialmente aplicable a escenarios forenses en los que la velocidad y precisión de la identificación son críticas. Un estudio reciente del año 2025 realizado por Cardoso et al., sobre instrumentos miniaturizados como espectrómetros de masas y plataformas electroquímicas permiten la detección rápida de compuestos con pequeñas cantidades de reactivos y muestras y costos operativos más bajos; sin embargo, estos dispositivos todavía tienen algunas deficiencias para detectar drogas de amplio espectro y requieren personal profesional para operar correctamente, lo que ha desafiado la estandarización y el entrenamiento (59).

Mientras tanto, el desarrollo de sensores electroquímicos ha logrado recientemente ventajas significativas en el campo de la detección de narcóticos, en particular debido a su accesibilidad y facilidad de despliegue, Zanfrognini et al. (2020) mencionan que estos sensores pueden ser sensibles a los analitos en fluidos biológicos y muestras de campo, lo cual es crucial para la implementación de métodos rápidos en el control de drogas; sin embargo, persisten problemas en las limitaciones actuales de sensibilidad y especificidad de estos sensores, todavía son incapaces de reconocer algunas nuevas sustancias psicoactivas y otros compuestos, estas restricciones también existen para otros métodos, incluida la espectroscopia infrarroja que a pesar de su popularidad, también se ve afectada por el problema de baja precisión en la identificación de compuestos adulterados; como se muestra en el trabajo de Deconinck et al. (2022), los métodos de quimiometría introducidos en asociación con la espectroscopia han logrado mayores avances para identificar sustancias; sin embargo, las bibliotecas espectrales y los algoritmos cuantitativos deben ser ampliados y mejorados para abordar la complejidad de las muestras reales (60,61).

En relación con la espectrometría de masas, Borden et al. (2020) enfatizan que sigue siendo una herramienta indispensable para identificar las drogas de abuso, especialmente ahora con el aumento de nuevas sustancias psicoactivas (NPS), la espectrometría de masas ha mejorado considerablemente, lo que ha incrementado la sensibilidad y especificidad en la identificación de drogas, necesarias para afrontar la generación de nuevos compuestos (63). No obstante, el equipo aún requerido para ejecutar estos métodos puede resultar relativamente costoso y no fácilmente accesible en todos los laboratorios forenses, lo que tiende a impedir su aplicación práctica en la escena del crimen, por el contrario, la RMN aunque no se utiliza tan ampliamente en el ámbito forense diario, está aumentando en disponibilidad a medida que los sistemas de bajo campo de sobremesa se están volviendo más comunes, con oportunidades asociadas para aplicaciones forenses; según Urbas et al. (2023) y Santos et al. (2018), estos instrumentos de RMN pueden proporcionar potentes huellas químicas no solo para productos sintéticos sino también para rastros de productos naturales y con dimensiones compactas y relativamente bajo costo se vuelven más populares para el control rutinario de drogas; sin embargo, los desafíos de interpretación de datos aún deben abordarse, particularmente en el caso de especímenes complicados y mezclas de compuestos (64,65).

Otro nicho importante en el campo forense que actualmente está bajo investigación es el relacionado con la elaboración de perfiles de drogas, por ejemplo, el trabajo de Ocampo Chaguendo (2022) quien aplicó cromatografía de gases en combinación con espectrometría de masas (GC-MS) y quimiometría para identificar rutas de síntesis/adulteración para drogas sintéticas, aunque ese método ha avanzado bien hacia el descubrimiento de métodos de síntesis y precursores, aún existen desafíos, como obstáculos operativos, particularmente en relación con la estandarización del método, así como la exigencia de perfeccionar las bases de datos para verificar el perfil químico de los compuestos (66). En general, a pesar de los grandes avances realizados en el desarrollo de las tecnologías para la detección y análisis de drogas sintéticas en el contexto forense, los desafíos operativos y tecnológicos en el campo siguen siendo sustanciales; estas eficiencias han incluido el mejoramiento tanto de la sensibilidad como de la especificidad de los sensores, la estandarización de métodos, el aumento del tamaño de las bases de datos espectrales y la capacitación del personal, la utilidad de estos métodos no se limita a los avances tecnológicos, también se necesitan avances en los procedimientos de validación y un mayor progreso hacia una colaboración más estrecha entre científicos, tecnólogos y autoridades del campo del análisis forense para superar las barreras existentes y garantizar la precisión y eficiencia del análisis de drogas de abuso (40-66).

Perspectivas futuras en la investigación y aplicación de técnicas espectroscópicas en el ámbito forense

En el contexto forense, el uso de técnicas espectroscópicas ha cambiado drásticamente el enfoque en la identificación, caracterización y autenticación de materiales relacionados con actividades criminales, en la actualidad las técnicas espectroscópicas que analizan muestras biológicas de manera no invasiva y con un procesamiento nulo o mínimo se han vuelto importantes y métodos como el Raman, infrarrojo (IR), UV-Vis, fluorescencia y espectrometría de emisión atómica han atraído el interés entre las herramientas analíticas debido a su alta selectividad y sensibilidad (1-3). En el campo forense moderno, estas estrategias se están incorporando en los protocolos estándar aplicados para analizar drogas, residuos de explosivos, matrices biológicas, o contaminantes ambientales, lo que implica su flexibilidad operativa, los métodos espectroscópicos han demostrado ser herramientas poderosas, particularmente para la identificación y caracterización de drogas sintéticas (1-6). En las últimas décadas, el desarrollo de técnicas espectroscópicas ha llevado a métodos más precisos y más sensibles para la identificación de compuestos, ampliando así el uso de estos métodos en la disciplina forense y las tendencias significativas incluyen un incremento en el uso de técnicas espectroscópicas en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones rápidas durante investigaciones *in situ*, con la llegada de dispositivos espectrómetros portátiles y de bajo consumo, como los analizadores de Raman y NIR de mano, los

analistas forenses ahora pueden llevar a cabo investigaciones criminales que implican una identificación inicial de sustancias en el sitio del campo (7-9).

Esta capacidad de respuesta rápida, dicen los autores, representa una gran mejora sobre el tiempo de análisis y procesamiento legal, minimiza los riesgos de envío y manipulación, y la posible contaminación o pérdida de evidencia (10-12). La detección de sustancias a concentraciones ultra bajas sigue siendo uno de los grandes desarrollos futuros en estas metodologías, debido a las cantidades diminutas dentro de matrices complejas, la detección de drogas ilícitas o sintéticas solo puede lograrse con la ayuda de tamizajes sensibles, es probable que al incorporar fuentes de radiación láser de alta potencia y detectores con eficiencia mejorada en estos sistemas, se logre la detección de compuestos a niveles sub-ppb, lo que permitirá su utilización tanto en entornos de laboratorio como de campo, además la aplicación de sofisticados algoritmos de procesamiento de señales será importante para aumentar la resolución y precisión de identificación de compuestos complejos, en particular compuestos similares (estrategias, propiedades) (4-9).

Al mismo tiempo hay un gran esfuerzo por lograr la automatización y la inteligencia artificial en lo que se refiere al procesamiento espectral, especialmente las redes neuronales artificiales, el aprendizaje automático y las técnicas de análisis multivariante; estas herramientas son cruciales para gestionar la masa de datos relacionada con los espectros y para descubrir patrones finos y compuestos con estructuras químicas similares, tal integración tecnológica está mejorando la precisión de las investigaciones forenses basadas en ADN, eliminando errores humanos y permitiendo la construcción de modelos predictivos, apropiados también para nuevos casos; se ha puesto un énfasis creciente en el uso de la espectroscopia combinada con imágenes, por ejemplo, la espectroscopía de Raman combinada con microscopía o imágenes hiperespectrales, esta combinación permite mapear la distribución espacial de los compuestos químicos en y sobre superficies complejas como restos de papel, textiles, piel o cartuchos gastados, por último la influencia de estas tecnologías también abre puertas en áreas como la validación de documentos, la alteración de manuscritos y la identificación de falsificación de monedas, la evaluación de restos biológicos en víctimas o sospechosos (13-24).

Además de estos avances tecnológicos, existen importantes obstáculos metodológicos y operativos, la variación entre matrices forenses es uno de los desafíos clave, ya que puede ser químicamente interferida, degradada por factores ambientales o contaminada de forma cruzada, afectando potencialmente la calidad de los datos espectrales recogidos, la utilización de tratamientos previos espectrales como la corrección de línea base o la normalización y procedimientos de validación sólidos se vuelven necesarios para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados (25-30). De manera similar, se presume que la aplicación de técnicas espectroscópicas en combinación con otros métodos analíticos, como la cromatografía de gases y la espectrometría de masas, permitirá la detección sistemática de sustancias en mezclas complejas presentes en casos forenses; la espectroscopia, como procedimiento no destructivo, sería un complemento a estos otros métodos al proporcionar una visión más completa y detallada del compuesto presente, dicha integración mejoraría la resolución y la capacidad de discriminar sustancias también en niveles de concentración más bajos, algo necesario en el control de nuevas drogas sintéticas que a menudo se detectan a niveles de trazas (9,17-21).

Otro problema relacionado se encuentra en la demanda de una actualización de las bases de datos espectrales, tanto en términos del número de espectros estandarizados como de su variabilidad, para compararlos con los espectros de sustancias desconocidas utilizando referencias fiables; la generación de tales bibliotecas espectrales públicas universalmente reconocidas es un trabajo en curso, especialmente considerando el hecho de que nuevas drogas de diseño, precursores para materiales clandestinos y especies sintéticas continúan apareciendo, este escenario resalta la necesidad de

colaboración interdisciplinaria entre laboratorios, agencias reguladoras y el sistema judicial para el intercambio de datos y la armonización de los criterios de análisis (31-36). Además, la eficacia de tales enfoques depende críticamente de la educación continua de la fuerza laboral forense, a pesar de las mejoras significativas en los instrumentos, el tratamiento adecuado de los datos espectrales requiere competencias técnicas específicas en química analítica, estadísticas multivariadas y procesamiento digital de señales, por esta razón es necesario reforzar la capacitación y establecer medios de actualización científica, para que los profesionales estén al tanto de las nuevas tendencias y técnicas (37-42).

El uso de espectroscopía también está influyendo en nuevas líneas de investigación forense, como el análisis de microtrazas, la detección de biomarcadores en fluidos corporales y la caracterización de residuos de pólvora y metales pesados en estudios balísticos, estas aplicaciones abren el camino hacia un análisis más integral y detallado de las escenas del crimen, que considera la presencia de un compuesto y su contexto temporal, su modo de aplicación y su relación con otras evidencias (43-48). En el ámbito judicial, se prevé que el desarrollo de la espectroscopía promoverá la acreditación legal de nuevas pruebas instrumentales, incluso si en muchos casos el espectro registrado puede convertirse en una evidencia sólida, para la cual la trazabilidad, precisión y la definición de normas de control de calidad les darán respaldo de acuerdo con las normativas, este aspecto legal es crucial para la admisibilidad de los resultados del análisis espectroscópico tanto en los juicios como en los procedimientos penales, no dejando lugar a disputas técnicas por parte de la defensa (49-54).

Por último, pero no menos importante la espectroscopía forense puede desempeñar un papel clave en cuestiones humanitarias y ambientales, incluyendo la identificación de restos humanos en zonas de conflicto, la detección de materiales peligrosos en entornos peligrosos, el rastreo del origen geográfico de las pistas en el comercio ilegal de bienes culturales o de vida silvestre, etc. Estas aplicaciones mejoran la ciencia forense clásica y permiten la investigación interdisciplinaria con relevancia social y ecológica, es decir, los enfoques espectroscópicos son actualmente el principal impulsor detrás de la tremenda metamorfosis de la ciencia forense contemporánea, su desarrollo consiste en actualizaciones tecnológicas y la aplicación de nuevos enfoques metodológicos, grandes bases de datos, análisis basados en IA y estandarización internacional y a pesar de las dificultades técnicas y operativas, las perspectivas para que la espectroscopía mejore tanto el escrutinio de los procesos judiciales como la seguridad de la trazabilidad evidencial y las capacidades del análisis químico forense, son sustanciales y alentadoras (55-68).

4. Conclusiones

Podemos concluir que los métodos espectroscópicos representan herramientas forenses esenciales que han revolucionado el examen y análisis de sustancias ilícitas, con un consecuente impacto significativo en el análisis forense de drogas ilícitas, como aquellas de origen sintético; debido a su naturaleza no invasiva, precisión y rapidez, estas técnicas están siendo cada vez más integradas en protocolos de rutina, ya sea en el laboratorio o en el campo, en aeropuertos y fronteras.

Mientras que la miniaturización ha avanzado para lograr portabilidad, incluyendo la integración de inteligencia artificial para mejorar el análisis de datos, aún existen enormes desafíos, incluida la interferencia de matrices complejas y la necesidad de calibraciones precisas, estos desafíos y la dependencia de personal altamente calificado resaltan la importancia de un mayor desarrollo de la investigación y el perfeccionamiento de bases de datos espectrales y procedimientos estándar para lograr resultados confiables.

Gracias a la aparición de nuevas tecnologías y metodologías alternativas en desarrollo, la espectroscopía es cada vez más útil en varios campos, desde la toxicología forense hasta la autenticación de documentos y la detección de microtrazas, estas técnicas pueden considerarse una elección obligada para un análisis preciso y confiable en investigaciones forenses.

5. Agradecimientos

Estoy muy agradecida con todas las personas que hicieron realidad este trabajo, especialmente quiero dar las gracias a mi asesor Dennis Mauricio Ocampo, por su continua orientación, sugerencias útiles y apoyo durante todo el progreso de esta investigación. A Dios, por la sabiduría, fortaleza y determinación necesarias para cruzar este puente y también agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, cooperación y aliento en todo momento.

6. Conflicto de intereses

Como autor declaro que no existen conflictos de interés en relación con la realización de este estudio.

Referencias bibliográficas

- (1) Armenian, P., Vo, K. T., Barr-Walker, J., & Lynch, K. L. (2018). Fentanyl, fentanyl analogs and novel synthetic opioids: a comprehensive review. *Neuropharmacology*, 134, 121-132.
- (2) Odagiu, I., & Stoian, R. (2024). Methodological particularities regarding the investigation of crimes in the field of illegal trafficking of drugs and synthetic drugs. In *Prevenirea și combaterea criminalității: probleme, soluții și perspective* (pp. 396-406).
- (3) Campos, K. R., Coleman, P. J., Alvarez, J. C., Dreher, S. D., Garbaccio, R. M., Terrett, N. K., ... & Parmee, E. R. (2019). The importance of synthetic chemistry in the pharmaceutical industry. *Science*, 363(6424), eaat0805.
- (4) Leszczyńska, D., Hallmann, A., Treder, N., Bączek, T., & Roszkowska, A. (2024). Recent advances in the use of SPME for drug analysis in clinical, toxicological, and forensic medicine studies. *Talanta*, 270, 125613.
- (5) Shafi, A., Berry, A. J., Sumnall, H., Wood, D. M., & Tracy, D. K. (2020). New psychoactive substances: a review and updates. *Therapeutic advances in psychopharmacology*, 10, 2045125320967197.
- (6) Berretta, P., Minutillo, A., Vari, M. R., Graziano, S., Rotolo, M. C., Pellegrini, M., & Cassano, T. (2022). New psychoactive substances: a descriptive review. *Biochim Clin*, 46, 283-91.
- (7) Schifano, F., Napoletano, F., Chiappini, S., Guirguis, A., Corkery, J. M., Bonaccorso, S., ... & Vento, A. (2021). New/emerging psychoactive substances and associated psychopathological consequences. *Psychological medicine*, 51(1), 30-42.
- (8) Bruni, A., Rodrigues, C., dos Santos, C., de Castro, J., Mariotto, L., & Sinhorini, L. (2021). Analytical challenges for identification of new psychoactive substances: a literature-based study for seized drugs. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*.

- (9) Omar, J., Slowikowski, B., Guillou, C., Reniero, F., Holland, M., & Boix, A. (2019). Identification of new psychoactive substances (NPS) by Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 50(1), 41-51.
- (10) Piorunski-Sedlak, K., & Stypulkowska, K. (2020). Strategy for identification of new psychoactive substances in illicit samples using attenuated total reflectance infrared spectroscopy. *Forensic science international*, 312, 110262.
- (11) Serrano, J. N. P., Benedito, L. E. C., de Souza, M. P., Maldaner, A. O., & de Oliveira, A. L. (2020). Quantitative NMR as a tool for analysis of new psychoactive substances. *Forensic Chemistry*, 21, 100282.
- (12) Sangamnerkar, S. (2023). Application of ATR-FTIR spectroscopy for the direct detection of stimulants in biofluids. Recuperado de <https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/zs25x9106>
- (13) Sunil, J., Narayana, C., Kumari, G., & Jayaramulu, K. (2023). Raman spectroscopy, an ideal tool for studying the physical properties and applications of metal–organic frameworks (MOFs). *Chemical Society Reviews*, 52(10), 3397-3437. <https://doi.org/10.1039/D2CS01004F>
- (14) Elachi, C., & Van Zyl, J. J. (2021). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. John Wiley & Sons.
- (15) Shami, S. H., Hassan, A. M., Razzaq, A. L., Hashim, R. M., Khalaf, T. A., Shaheen, K. M., ... & Lateef, E. H. (2024). UV-visible, Infrared, Fourier transform infrared and Raman spectroscopy, spectrophotometry: Principles and Applications. *Current Clinical and Medical Education*, 2(5), 116-124.
- (16) Douglas Romero, J. D., Serrano Arguello, S. A., & Chaverra Córdoba, J. E. (2022). Ineficacia del Estatuto Nacional de Estupefacientes y del Código Penal en el tratamiento de las nuevas drogas sintéticas y sustancias de uso restringido en Colombia.
- (17) Bruni, A., Rodrigues, C., dos Santos, C., de Castro, J., Mariotto, L., & Sinhorini, L. (2021). Analytical challenges for identification of new psychoactive substances: a literature-based study for seized drugs. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*.
- (18) Scoppetta, O., & Castaño, G. A. (2019). Early drug consumption and subsequent risk of illicit drug use in Colombia. *Addictive Disorders & Their Treatment*, 18(1), 10-14.
- (19) Miller, J. J., Yazdanpanah, M., Colantonio, D. A., Beriault, D. R., & Delaney, S. R. (2024). New psychoactive Substances: A Canadian perspective on emerging trends and challenges for the clinical laboratory. *Clinical Biochemistry*, 110810.
- (20) SCIENTIFIC WORKING GROUP FOR THE ANALYSIS OF SEIZED DRUGS (SWGDRUG) RECOMMENDATIONS (2019). Recuperado de: https://swgdrug.org/Documents/SWGDRUG%20Recommendations%20Version%208_FINAL_ForPosting_092919.pdf
- (21) Jiménez, J. A. (2018). Aplicación de la difracción de Rayos-X a la caracterización de materiales cristalinos.

- (22) Perdomo JFC, Gómez MFMA. Diseño de un sistema automatizado de gestión de la seguridad de la información basado en la Norma ISO/IEC 27001:2013 para dar cumplimiento a la Ley 1581 de 2012 de protección de datos personales en el departamento de sistemas de una institución universitaria en Colombia. 2021.
- (23) Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, et al. Ítems de referencia para publicar Protocolos de Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis: Declaración PRISMA-P 2015. *Rev Esp Nutr Hum Diet.* 2016;20(2):148-60.
- (24) Mendoza Villa JM, Herrera Morales LA. El consentimiento informado en Colombia. Un análisis comparativo del proyecto de ley 24 de 2015 con el código vigente y otros códigos de ética. *Rev CES Derecho.* 2017;8(1):156-71.
- (25) Molina DR, Rodríguez LU. El fraude académico: una emergencia de la ética universitaria. La armonía entre la teoría y la práctica.
- (26) Ott, C. E., & Arroyo, L. E. (2023). Transitioning surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) into the forensic drug chemistry and toxicology laboratory: Current and future perspectives. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 5(4), e1483.
- (27) Beć, KB, Grabska, J. y Huck, CW (2021). Espectroscopia NIR de medicamentos naturales con el apoyo de nuevos instrumentos y métodos para el análisis e interpretación de datos. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 193, 113686.
- (28) Silva, C. S., Braz, A., & Pimentel, M. F. (2019). Vibrational spectroscopy and chemometrics in forensic chemistry: critical review, current trends and challenges. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30, 2259-2290.
- (29) Alonzo, M., Alder, R., Clancy, L., & Fu, S. (2022). Portable testing techniques for the analysis of drug materials. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 4(6), e1461.
- (30) Silva, L. S., Abreu, L. S., Spinelli, E., Ferreira, G. B., & Duarte, L. M. (2025). Raman Spectroscopic Detection of Synthetic Cannabinoid-related 1H-indazole-3-carboxamide on Seized Paper Stamps: A Forensic Challenge in Providing Nondestructive Analyses and Feasible Counterevidence. *Analytica Chimica Acta*, 343975.
- (31) Tian, L., Jiang, H., & Chen, T. (2023). A rapid and nondestructive approach for forensic identification of novel psychoactive substances using shifted-excitation Raman difference spectroscopy and machine learning. *Journal of Raman Spectroscopy*, 54(5), 540-550.
- (32) Kranenburg, R. F., Ou, F., Sevo, P., Petruzzella, M., de Ridder, R., van Klinken, A., ... & Fiore, A. (2022). On-site illicit-drug detection with an integrated near-infrared spectral sensor: A proof of concept. *Talanta*, 245, 123441.
- (33) Amin, M. O., Al-Hetlani, E., & Lednev, I. K. (2022). Detection and identification of drug traces in latent fingerprints using Raman spectroscopy. *Scientific Reports*, 12(1), 3136.
- (34) Correia, R. M., Domingos, E., Tosato, F., dos Santos, N. A., Leite, J. D. A., da Silva, M., ... & Romão, W. (2018). Portable near infrared spectroscopy applied to abuse drugs and medicine analyses. *Analytical Methods*, 10(6), 593-603.

- (35) Eliaerts, J., Meert, N., Dardenne, P., Baeten, V., Pierna, J. A. F., Van Durme, F., ... & Samyn, N. (2020). Comparison of spectroscopic techniques combined with chemometrics for cocaine powder analysis. *Journal of analytical toxicology*, 44(8), 851-860.
- (36) Jurásek, B., Bartůněk, V., Huber, Š., Fagan, P., Setnička, V., Králík, F., ... & Kuchař, M. (2020). Can X-Ray powder diffraction be a suitable forensic method for illicit drug identification?. *Frontiers in Chemistry*, 8, 499.
- (37) Denia, A., Esteve-Turrillas, F. A., & Armenta, S. (2022). Analysis of drugs including illicit and new psychoactive substances in oral fluids by gas chromatography-drift tube ion mobility spectrometry. *Talanta*, 238, 122966.
- (38) Sharma, V., & Kumar, R. (2019). *Ftir and nirs in forensic chemical sensing*.
- (39) Pan, L., Zhang, P., Daengngam, C., Peng, S., & Chongcheawchamnan, M. (2022). A review of artificial intelligence methods combined with Raman spectroscopy to identify the composition of substances. *Journal of Raman Spectroscopy*, 53(1), 6-19.
- (40) Bhatt, B. (2022). *Nuclear Forensic Analysis via Machine Learning Assisted Laser-based Spectroscopy and Spectral Imaging* (Doctoral dissertation, University of Nairobi).
- (41) Naseer, K., Ali, S., & Qazi, J. (2021). ATR-FTIR spectroscopy as the future of diagnostics: a systematic review of the approach using bio-fluids. *Applied Spectroscopy Reviews*, 56(2), 85-97.
- (42) Ferreira, S. L., Bezerra, M. A., Santos, A. S., dos Santos, W. N., Novaes, C. G., de Oliveira, O. M., ... & Garcia, R. L. (2018). Atomic absorption spectrometry—A multi element technique. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 100, 1-6.
- (43) Ojha, S. K., & Ojha, A. K. (2022). Raman and FTIR Spectroscopic Techniques and Their Applications. *Upconverting Nanoparticles: From Fundamentals to Applications*, 97-116.
- (44) Leiva Miranda, K. A. (2020). *Caracterización y análisis de evidencias forenses mediante técnicas no destructivas y análisis multivariado*.
- (45) Guambo, B. A. A., & Manzano, V. P. C. (2025). Papel que juega la espectroscopia de infrarrojo cercano en la detección de drogas ilícitas en muestras de cabello humano. *RECIMUNDO*, 9(1), 402-412.
- (46) Rotemberg, E., Picapedra, A., & Kreiner, M. (2022). Detección de drogas en saliva: aspectos metodológicos y legales. *Odontología sanmarquina*, 25(1), NA-NA.
- (47) González-Hernández, J. (2023). Drogas emergentes: detección mediante sensores electroquímicos. *Revista Colombiana de Química*, 52(1), 25-41.
- (48) Vergara Gonzalez, B. M. (2024). *Determinación cualitativa de 3, 4-metilendioxi metanfetamina mediante la prueba de Marquis y espectroscopia infrarroja* (Doctoral dissertation, Universidad de Panamá).

- (49) Maldonado Laurente, J. (2022). Peritaje de drogas sintéticas por cromatografía de gases y su relación con el proceso penal por tráfico ilícito de drogas, Lima 2021.
- (50) González Hernández, J. (2023). Desarrollo de sensores electroquímicos para la determinación de drogas sintéticas en fluidos biológicos y muestras de incautación.
- (51) Mendez-Hernandez, J. M., García, A. L. C., & Rivera, M. E. (2020). Espectroscopia Vibracional Como Una Alternativa Para La Discriminación De Drogas Ilícitas Incautadas En La Ciudad De Cúcuta. *Respuestas*, 25(S1), 36-42.
- (52) Mozaffari, M. H., & Tay, L. L. (2020). A review of 1D convolutional neural networks toward unknown substance identification in portable Raman spectrometer. *arXiv preprint arXiv:2006.10575*.
- (53) Blazhko, U., Shapaval, V., Kovalev, V., & Kohler, A. (2021). Comparison of augmentation and pre-processing for deep learning and chemometric classification of infrared spectra. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 215, 104367.
- (54) Paruzzo, F. M., Hofstetter, A., Musil, F., De, S., Ceriotti, M., & Emsley, L. (2018). Chemical shifts in molecular solids by machine learning. *Nature communications*, 9(1), 4501.
- (55) Mojica, E. R., & Dai, Z. (2022). New Raman spectroscopic methods' application in forensic science. *Talanta Open*, 6, 100124.
- (56) Jales, J. T., Barbosa, T. M., de Medeiros, J. R., de Lima, L. A., de Lima, K. M., & Gama, R. A. (2021). Infrared spectroscopy and forensic entomology: Can this union work? A literature review. *Journal of forensic sciences*, 66(6), 2080-2091.
- (57) Joshi, M., & Sisco, E. (2023). Forensic seized drug analysis: Current challenges and emerging analytical solutions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 5(5), e1486.
- (58) Azimi, S., & Docoslis, A. (2022). Recent advances in the use of surface-enhanced Raman scattering for illicit drug detection. *Sensors*, 22(10), 3877.
- (59) Cardoso, T. M., Pinheiro, K. M., Siqueira, D. P., & Coltro, W. K. (2025). On-site analytical techniques for forensic chemistry. *Green Analytical Methods and Miniaturized Sample Preparation techniques for Forensic Drug Analysis*, 495-510.
- (60) Zanfognini, B., Pigani, L., & Zanardi, C. (2020). Recent advances in the direct electrochemical detection of drugs of abuse. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 24(11), 2603-2616.
- (61) Deconinck, E., Duchateau, C., Balcaen, M., Gremeaux, L., & Courselle, P. (2022). Chemometrics and infrared spectroscopy—A winning team for the analysis of illicit drug products. *Reviews in Analytical Chemistry*, 41(1), 228-255.
- (62) Rasheed, S., Ikram, M., Ahmad, D., Abbas, M. N., & Shafique, M. (2024). Advancements in colorimetric and fluorescent-based sensing approaches for point-of-care testing in forensic sample analysis. *Microchemical Journal*, 111438.
- (63) Borden, S. A., Palaty, J., Termopoli, V., Famigliani, G., Cappiello, A., Gill, C. G., & Palma, P. (2020). Mass spectrometry analysis of drugs of abuse: challenges and emerging strategies. *Mass spectrometry reviews*, 39(5-6), 703-744.

(64) Urbas, A. A., Corbett, C. A., & Mazzola, E. P. (2023). NMR in forensics. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 61(2).

(65) Santos, A. D. C., Dutra, L. M., Menezes, L. R. A., Santos, M. F. C., & Barison, A. (2018). Forensic NMR spectroscopy: Just a beginning of a promising partnership. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 107, 31-42.

(66) Ocampo Chaguendo, D. M. *Desarrollo de una metodología para el perfilamiento de drogas de síntesis y nuevas sustancias psicoactivas detectadas en Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

(67) Ruiz, F. G. M., Rosales, J. E. C., Lagunas, A. S., & Uzeta, M. D. J. B. (2022). Optimización de métodos GC-MS para la detección de metanfetamina, cocaína y fentanilo empleando la estrategia Lean Six Sigma. *REVISTA DIGITAL DE CIENCIA FORENSE*, 13-26.

(68) Ahmed, R., Altamimi, M. J., & Hachem, M. (2022). State-of-the-art analytical approaches for illicit drug profiling in forensic investigations. *Molecules*, 27(19), 6602.