


# Nanobots letales

## Retos penales y criminalísticos a la nanoescala

---


**Jesús Gerardo Peña Rolando<sup>1</sup>**

Universidad Católica Andrés Bello  
jpenarolando@gmail.com

 ORCID 0009-0003-7816-6828


**Narda D. Sanabria Bernatte<sup>2</sup>**

Universidad Católica del Táchira  
nardasb58@gmail.com

 ORCID 0009-0000-9498-9726


**Rolnar A. Sanabria Bernatte<sup>3</sup>**

Universidad Católica del Táchira  
rolnarsanabria@gmail.com

 ORCID 0009-0004-0320-4735

**Pegy Gruver Pérez<sup>4</sup>**

Universidad Santa María  
hidrobo.liseth@gmail.com

 ORCID 0009-0007-1040-6732

---

<sup>1</sup> Jesús Gerardo Peña Rolando (Venezuela), abogado (UCAB); juez de Sustanciación de la Sala Político-Administrativa del TSJ. Doctorando en Derecho (UCAB, tesis por defender) y doctor en Ciencias de la Educación; formación de posgrado en derecho penal y criminalística.

<sup>2</sup> Narda Diannette Sanabria Bernatte (Venezuela), abogada (UCAT); jueza superior de la Corte de Apelaciones del Área Metropolitana de Caracas (desde 2017), ex fiscal nacional y del AMC. Doctora en Ciencias Jurídicas y en Ciencias de la Educación; magíster en Ciencias Penales y Criminológicas.

<sup>3</sup> Rolnar Armando Sanabria Bernatte (Venezuela/EE. UU.), abogado (UCAT); doctor en Derecho Internacional Público (mención DD. HH.) y magíster en Derecho Procesal Penal y Criminología. Ex fiscal del Ministerio Público en Táchira y Sucre; docente universitario.

<sup>4</sup> Pegy Gruver Pérez (Venezuela), abogada (USM); magíster en Derecho Penal (UNE) y en Derecho Penal Militar (UNE), doctora en Control Contencioso Administrativo (UNE). Experta municipalista; ex secretaria agregada del Consulado de Venezuela en Nueva York.



# Nanobots letales

## Retos penales y criminalísticos a la nanoescala

### Resumen

Los nanobots representan una tecnología revolucionaria de aplicaciones médicas con el potencial de alcanzar precisión molecular. En contraste con estas aplicaciones positivas también plantean riesgos criminales, por su uso potencial en homicidios. Este estudio examina los desafíos legales y criminalísticos asociados al uso de nanobots como instrumentos letales, identificando vacíos normativos en el derecho penal contemporáneo y limitaciones metodológicas en la investigación criminal tradicional. Nuestra investigación evidencia que el sistema de justicia actual es inadecuado para procesar delitos caracterizados por selección del objetivo a escala molecular, indetectabilidad nanométrica y capacidad de activación diferida en el tiempo. La detección de evidencia a escala nanométrica presenta brechas que requieren técnicas forenses como microscopia de fuerza atómica y espectrometría de masas de alta resolución. Nuestro análisis propone marcos normativos que incorporen tipos penales específicos para delitos nanotecnológicos, protocolos especializados de investigación forense, programas de formación para operadores jurídicos y mecanismos de cooperación internacional.

**Palabras clave:** *nanobots letales; derecho penal nanotecnológico; criminalística molecular; investigación forense avanzada; marcos normativos emergentes*

## **Lethal Nanobots: Criminal and Forensic Challenges at the Nanoscale**

### **Abstract**

Nanobots represent a revolutionary technology for medical applications with the potential to achieve molecular precision. In contrast to these positive applications, they also pose criminal risks due to their potential use in homicides. This study examines the legal and forensic challenges associated with the use of nanobots as lethal instruments, identifying regulatory gaps in contemporary criminal law and methodological limitations in traditional criminal investigations. Our research shows that the current justice system is inadequate for prosecuting crimes characterized by molecular-scale targeting, nanometric undetectability, and the ability to trigger time-delayed attacks. The detection of evidence at the nanometric scale presents gaps that require forensic techniques such as atomic force microscopy and high-resolution mass spectrometry. Our analysis proposes regulatory frameworks that incorporate specific criminal offenses for nanotechnology crimes, specialized forensic investigation protocols, training programs for legal practitioners, and international cooperation mechanisms.

**Keywords:** *lethal nanobots; nanotechnology criminal law; molecular forensics; advanced forensic investigation; emerging regulatory frameworks*

## Introducción

La convergencia entre nanotecnología y robótica ha generado el desarrollo de nanobots o dispositivos nanorrobóticos, los cuales operan en la nanoescala y tienen el potencial de actuar a escala molecular con capacidades de precisión sin precedentes. Estas nanomáquinas representan una revolución tecnológica que está transformando el ámbito médico con capacidades terapéuticas extraordinarias en tratamientos de precisión molecular. Sin embargo, el desarrollo acelerado de esta tecnología plantea riesgos inéditos, incluyendo su posible uso en delitos graves, especialmente el homicidio (Farook et al., 2025a).

En el contexto latinoamericano, y particularmente en Venezuela, existen severas dificultades en el sistema jurídico regional y las limitaciones tecnológicas en la administración de justicia. El sistema penal venezolano, ha experimentado adaptaciones hacia la incorporación de nuevas tecnologías de información y comunicación (TIC) en sus procesos judiciales, y ahora enfrenta delitos caracterizados por selección del objetivo a escala molecular, indetectabilidad y activación diferida (Singh y Samal, 2021). La legislación venezolana en materia de delitos tecnológicos, principalmente contenida en la Ley Especial contra los Delitos Informáticos (Asamblea Nacional, 2001) no contempla las implicaciones específicas de tecnologías emergentes como los nanobots, y se limita a los ciberdelitos. Esta situación no difiere del panorama latinoamericano, donde países como Brasil, Argentina y Chile avanzan hacia marcos regulatorios de inteligencia artificial inspirados en el modelo europeo, pero mantienen vacíos normativos respecto a delitos nanotecnológicos. El sistema de justicia venezolano, en consecuencia, requiere adaptaciones profundas para procesar evidencias a escala nanométrica.

La literatura científica confirma brechas críticas en la detección de evidencia nanométrica, que requieren el desarrollo de técnicas forenses avanzadas como, por ejemplo, microscopía de fuerza atómica y espectrometría de masas de alta resolución (Singh y Samal, 2021). En el contexto venezolano y latinoamericano, estas limitaciones se intensifican debido a las restricciones presupuestarias y tecnológicas que caracterizan a los sistemas forenses regionales, donde la implementación de tecnologías especializadas enfrenta desafíos adicionales de capacitación técnica, mantenimiento de equipos y actualización metodológica.

En el presente estudio se realiza el análisis documental de literatura especializada en nanotecnología, derecho penal y criminalística (Unión Europea, 2011), y la revisión comparativa de marcos normativos latinoamericanos existentes. La investigación incorpora la perspectiva específica del derecho penal venezolano y las características del sistema judicial regional, con las limitaciones y oportunidades que presenta el contexto latinoamericano para la implementación de marcos regulatorios adaptados a tecnologías emergentes.

Los objetivos comprenden el análisis de las implicaciones penales y criminalísticas derivadas del uso potencial de nanobots como instrumentos letales desde la perspectiva del derecho penal venezolano y latinoamericano; la identificación de vacíos normativos específicos en el ordenamiento jurídico nacional y regional; y la formulación de propuestas contextualizadas para marcos jurídicos adaptados. Estas propuestas incluyen tipos penales compatibles con la tradición jurídica latinoamericana, protocolos de investigación forense adaptados a las tecnologías regionales, programas de formación para operadores jurídicos venezolanos y mecanismos de cooperación internacional atentos a las asimetrías tecnológicas, dada la naturaleza transnacional de estos delitos emergentes (Bradley, 2013a; Udaynadh et al., 2024).

La relevancia de este estudio se fundamenta en la necesidad de anticipar desafíos jurídicos derivados del uso de tecnologías disruptivas, dentro del contexto latinoamericano y venezolano. La investigación busca contribuir al desarrollo de un marco conceptual que permita a los sistemas de justicia regionales adaptarse proactivamente a las realidades criminológicas emergentes, evitando la obsolescencia y promoviendo respuestas a favor del contexto regional, para abordar, eficazmente, esta nueva dimensión de la criminalidad nanotecnológica.

## **Fundamentos tecnológicos y jurídicos de los nanobots**

Para abordar jurídicamente el uso de los nanobots como instrumentos criminales, resulta esencial comprender sus características técnicas básicas. Los nanobots pueden conceptualizarse como dispositivos programables de tamaño aproximado entre 1 y 100 nanómetros, que pueden ser diseñados para cumplir tareas específicas a nivel celular (Tadikonda y Aditya, 2024) con tres capacidades críticas desde la perspectiva penal: (a) Capacidad de selección dirigida del blanco en la nanoescala al ser programados para reconocer y atacar objetivos celulares específicos (Samaniego Urrego et al., 2022). Permite la elección de víctimas que supera cualquier arma convencional para generar lesiones o inclusive la muerte, con base en características biológicas únicas, detectables en la escala celular (Farook et al., 2025a). (b) Indetectabilidad temporal prolongada, a las metodologías forenses convencionales (Singh y Samal, 2021). El instrumento del delito puede, literalmente, desaparecer de la escena del crimen, o permanecer oculto a nivel celular hasta que se produzca su activación por medios remotos (Singh y Samal, 2021). (c) Pueden programarse para permanecer inactivos hasta recibir estímulos específicos (electromagnéticos, térmicos, químicos activados en una

escala temporal específica), permitiendo una separación significativa entre el acto preparatorio y el resultado letal (Tadikonda y Aditya, 2024). Esta característica complica dramáticamente la determinación de la causalidad jurídica y los elementos temporales tradicionales del delito (Bradley, 2013a).

De igual manera, los nanobots pueden generar efectos lesivos mediante mecanismos biológicos altamente sofisticados que resultan jurídicamente relevantes para la configuración del injusto penal. Entre los más documentados se encuentran el estrés oxidativo inducido (que provoca daño celular masivo), la disrupción mitocondrial (genera fallas orgánicas) y la interferencia con procesos de reparación celular a escala epigenética (favorece procesos de apoptosis y necrosis programada), todos ellos con capacidad de provocar daños orgánicos irreversibles e incluso la muerte (Farook et al., 2025a; Samaniego Urrego et al., 2022; Tadikonda y Aditya, 2024). Estos mecanismos, aunque invisibles, tienen consecuencias equiparables a métodos tradicionales como el envenenamiento, químico o radioactivo, y la asfixia.

Desde la perspectiva penal, la relevancia jurídica de estos mecanismos radica en su capacidad para configurar distintos grados de afectación a la vida y la integridad física, lo que exige una subsunción típica diferenciada. Por ejemplo, la muerte por estrés oxidativo podría asimilarse al homicidio por envenenamiento y la disrupción mitocondrial a formas de privación funcional vital. Esta diversidad de mecanismos obliga a una descripción legal precisa, que reconozca la especificidad molecular del daño y su relación causal con la conducta delictiva.

Además, la activación diferida y la indetectabilidad prolongada de los nanobots complican la reconstrucción del nexo causal, especialmente cuando el resultado lesivo se manifiesta días o semanas después de la introducción del dispositivo en el organismo de la víctima. En estos casos, la imputación pe-

nal debe considerar no solo el acto material de administración, sino también la programación, el diseño funcional y la intención subyacente del operador. Esta complejidad exige una dogmática penal tecnológicamente informada, capaz de integrar conocimientos biomédicos en la valoración jurídica del daño.

En definitiva, los mecanismos de daño provocados por nanobots no solo son relevantes desde el punto de vista médico, sino que constituyen elementos centrales para la configuración del tipo penal, la determinación del grado de injusto y la fundamentación de la responsabilidad. Su incorporación al análisis jurídico permite avanzar hacia una tipificación penal adaptada a los desafíos de lo que cabría denominar como “criminalidad molecular” (Valls, 2022).

La incorporación de nanobots para la comisión de delitos plantea desafíos dogmáticos que exceden la ampliación del catálogo de instrumentos delictivos. Su naturaleza dual exige criterios para delimitar la antijuridicidad más allá de la descripción material del dispositivo (Samaniego Urrego et al., 2022). La imputación objetiva se ve tensionada por la separación espacial y temporal entre la administración del nanobot y la manifestación de sus efectos letales, lo que genera cadenas causales complejas que involucran programación, activación remota y procesos biológicos internos (Bradley, 2013a; Singh y Samal, 2021). Esto exige una reconstrucción probatoria multiescala, donde la causalidad jurídica se articule con la molecular, informática y médica. En este contexto, la dogmática penal venezolana y latinoamericana exploran modelos de responsabilidad funcional que permitan imputar conductas en entornos de alta tecnificación. Autores como Urrutia (2018) y Espinoza Pupuche (2024) proponen adaptar los criterios de imputación a escenarios donde el control del hecho se ejerce de forma remota o diferida.

## **Desafíos criminalísticos: investigación y prueba en la era de manipulación a nivel nanométrico**

Las técnicas tradicionales de investigación criminal presentan limitaciones estructurales cuando se confrontan con evidencia nanotecnológica (Singh y Samal, 2021). No son solo deficiencias técnicas, sino que suponen obstáculos metodológicos que requieren una reconfiguración integral de los protocolos forenses (Farook et al., 2025a). Uno de los desafíos más críticos es la brecha de detección en el rango nanométrico. Los instrumentos forenses tradicionales resultan ineficaces para identificar dispositivos de entre 1 y 100 nanómetros, como los nanobots que pueden interactuar con tejidos biológicos sin dejar rastros visibles, lo que genera una “zona ciega” en la investigación penal y plantea riesgos de impunidad técnica.

En Venezuela, esta problemática ha comenzado a ser abordada institucionalmente. El 12 de diciembre de 2022 se formalizó el Compendio de Protocolos de Actuación para Fortalecer la Investigación Penal, suscrito por el Ministerio Público, el Tribunal Supremo de Justicia, la Defensa Pública y el Ministerio del Poder Popular para Relaciones Interiores, Justicia y Paz. Este instrumento establece procedimientos técnicos para la identificación, preservación, extracción, análisis e interpretación de evidencia digital y biológica, incluyendo tecnologías emergentes, y garantiza la cadena de custodia y la integridad de los datos. Además, en 2023, más de 170 jueces del Circuito Judicial Penal participaron en mesas técnicas de formación sobre aplicación de protocolos, lo que evidencia una articulación interinstitucional activa.

En suma, la metodología forense tradicional enfrenta amplias limitaciones frente a la evidencia nanotecnológica, que podría afrontar la degradación enzimática de los nanomateriales en ambientes biológicos, lo que reduce significativamente la posibilidad de recuperación probatoria. Pero el sistema de

justicia venezolano ha demostrado capacidad de adaptación mediante protocolos técnicos, formación especializada y articulación institucional. La clave está en reconocer el fenómeno, invertir en capacidades interdisciplinarias y desarrollar una criminalística que integre la nanotecnología como objeto legítimo de investigación penal.

### **Tecnologías forenses emergentes y sus limitaciones prácticas**

El desarrollo de técnicas forenses especializadas presenta limitaciones en los sistemas de justicia con recursos limitados (Singh Samal, 2021). La microscopía de fuerza atómica (AFM) que permite analizar objetos a escala atómica (Farook et al., 2025a), funciona mediante una diminuta punta que recorre la superficie de la muestra para generar una imagen detallada de su topografía y estudiar sus propiedades mecánicas y químicas. En el contexto forense, ofrece la posibilidad de identificar nanobots residuales y analizar sus características (Singh y Samal, 2021). Sin embargo, se requiere personal capacitado en física, química y biología; demanda días para procesar la muestra, y necesita condiciones ambientales controladas (Farook et al., 2025a).

Con la espectrometría de masas de alta resolución se identifica la composición química de sustancias desconocidas, en cantidades mínimas (Singh y Samal, 2021) y analiza los “patrones de trayectoria de fragmentos moleculares” (Farook et al., 2025a). Por ejemplo, la espectrometría con plasma acoplado inductivamente (MS-ICP) puede detectar pequeñísimas cantidades de elementos de un nanobot, llegando a concentraciones de partes por billón (Singh y Samal, 2021). Los sistemas de tiempo de vuelo (MS-ToF) ayudan a determinar la masa exacta de moléculas, identifican polímeros sintéticos y los agentes químicos en la superficie de los nanobots (Singh y Samal, 2021). Sin embargo, estos métodos producen inmen-

sas cantidades de datos que deben ser analizados por computadoras avanzadas y requieren interpretación por parte de profesionales expertos y no de laboratorios forenses convencionales (Farook et al., 2025a).

Los quantum dots y los nanosensores forenses facilitan la identificación de nanobots estimulados por radiación electromagnética (Farook et al., 2025a), al emitir luz de colores, permitiendo un marcado visual de evidencias (Singh y Samal, 2021). Para detectar algún nanobot específico es necesario desarrollar protocolos de marcaje diseñados para cada caso, lo que implica un trabajo experimental que puede tomar meses (Singh y Samal, 2021). Este proceso puede asegurar la precisión en la detección y diferenciación de nanomateriales en el contexto forense, aunque representa un reto logístico y técnico importante (Farook et al., 2025a).

Los estudios empíricos desarrollados en los últimos años confirman la identificación de nanopartículas en laboratorios forenses. Malar et al. (2024) evaluaron nanopartículas de óxido de aluminio y sílice en muestras de tejidos textiles expuestos a ambientes simulados de escena de crimen. Utilizando microscopía de fuerza atómica (AFM) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (MS-ICP), identificaron partículas en fibras, con límites de detección por gramo de tejido. Estos resultados validan la aplicabilidad de AFM y MS-ICP en laboratorios con protocolos forenses (Malar et al., 2024).

Podder et al. (2025) desarrollaron un protocolo de marcaje de nanopartículas con sonda de puntos cuánticos (quantum dots) para resaltar residuos nanométricos en huellas dactilares latentes. En colaboración con un laboratorio criminalístico de Pune (India), implementaron AFM y microscopía confocal de fluorescencia para distinguir nanopartículas sintéticas de exosomas naturales. Alcanzaron un índice de detección de partículas/cm<sup>2</sup>, demostrando la viabilidad de protocolos de marcaje fluorescente en análisis rutinarios (Podder et al., 2025).

## **Inteligencia artificial y machine learning como herramientas de optimización en el procesamiento de evidencia nanométrica**

El procesamiento de evidencia forense en nanoescala puede ser mejorado mediante sistemas de inteligencia artificial (IA) y machine learning (ML). Estas tecnologías emergentes representan una solución a las limitaciones en la detección, análisis e interpretación de pruebas nanométricas, reduciendo considerablemente los tiempos de respuesta y mejorando la precisión diagnóstica en investigaciones de delitos nanotecnológicos (Arjamand, et al., 2024; Raffo, 2019)

Un ejemplo acorde es la implementación de algoritmos de machine learning para el procesamiento automatizado de datos espectrométricos, reduciendo los tiempos de análisis de nanobots letales, de semanas a horas. Los sistemas de IA pueden correlacionar instantáneamente patrones espectrométricos con bibliotecas de referencia y generar reportes automatizados que aceleren la toma de decisiones en casos donde la degradación temporal de nanobots puede comprometer la evidencia (Farber, 2025). Igualmente, los algoritmos pueden procesar miles de imágenes microscópicas en minutos, identificando estructuras de interés forense, clasificando morfologías nanobóticas específicas y priorizando áreas de análisis detallado.

Estas capacidades transformadoras no solo optimizan los procesos de recolección y análisis de evidencia, sino que también permiten una integración más ágil con sistemas informáticos forenses, posibilitando la gestión automatizada de información en entornos de alta complejidad. Al consolidar datos provenientes de distintos tipos de análisis —espectroscópico, microscópico y molecular— la IA y el machine learning facilitan la interoperabilidad entre plataformas, y con ello se responde a las investigaciones nanotecnológicas contemporáneas.

La IA puede realizar búsquedas instantáneas en múltiples bases de datos forenses simultáneamente, identificando patrones de similitud entre casos, implementando algoritmos y la identificación de series criminales. A la par, se pueden establecer conexiones entre delitos aparentemente no relacionados y generar hipótesis investigativas basadas en análisis estadístico de grandes volúmenes de datos. Así, se entiende que los algoritmos de machine learning pueden generar predicciones precisas sobre patrones de dispersión y activación de nanobots letales en sistemas biológicos en cuestión de horas, para la reconstrucción temporal de hechos delictivos, la identificación de mecanismos de acción y la estimación de concentraciones letales.

Consecuentemente, los sistemas de IA pueden identificar inconsistencias analíticas, detectar posibles contaminaciones cruzadas y validar la reproducibilidad de resultados en tiempo real. Esta implementación exitosa de sistemas de IA en laboratorios forenses nanométricos requiere una gran inversión que genere eficacia de la optimización temporal sin comprometer la calidad científica de los análisis.

### **Impacto en la eficiencia del sistema de justicia**

La obtención acelerada de resultados forenses permite la toma de decisiones investigativas más ágiles, reduce los períodos de prisión preventiva injustificada y mejora la capacidad de respuesta del sistema judicial penal ante delitos tecnológicos emergentes. Los nanomateriales presentan vulnerabilidades como la dispersión ambiental, la adhesión superficial, la degradación estructural y particularidades en sus propiedades fisicoquímicas (la carga superficial y las interacciones de van der Waals que dificultan su recolección y conservación) que comprometen su integridad probatoria si no se abordan mediante protocolos especializados (Farook et al., 2025a; Singh y Samal, 2021; Tadikonda y Aditya, 2024).

Estas características exigen el uso de contenedores anties-táticos, atmósferas controladas con gases inertes, y técnicas de manipulación sin contacto directo. La documentación multiescala, desde la caracterización nanométrica hasta la correlación macroscópica es indispensable para garantizar la trazabilidad y la validez jurídica de la evidencia. Asimismo, el monitoreo ambiental durante el transporte y acopio es esencial: variaciones de temperatura, presión, humedad o pH pueden alterar la estructura del nanomaterial (Farook et al., 2025a).

En Colombia y México han comenzado a explorar el uso de la nanotecnología, estos avances no se han traducido en protocolos oficiales del sistema judicial, aunque evidencian una apertura metodológica hacia la criminalística molecular. En Venezuela, el Compendio de Protocolos de Actuación para Fortalecer la Investigación Penal (2022) establece principios técnicos para la preservación de evidencia biológica y digital, que valore la importancia de la trazabilidad temporal. El sistema de justicia venezolano cuenta con bases institucionales y técnicas a ser fortalecidas para asumir este reto, mediante la incorporación de protocolos especializados, formación interdisciplinaria y cooperación técnica nacional e internacional.

## **Capacitación, recursos institucionales y adaptación del derecho penal tradicional**

La implementación efectiva de metodologías nanoforenses exige renovación técnica, de formación interdisciplinaria de operadores jurídicos, peritos y técnicos forenses (Farook et al., 2025a; Singh y Samal, 2021). Los programas de formación deben avanzar hacia esquemas híbridos y los juristas deben familiarizarse con los fundamentos técnicos que sustentan la imputación penal en delitos nanotecnológicos, para valorar el daño y reconstruir el nexo causal.

En América Latina, instituciones académicas como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Buenos Aires (UBA) ofrecen diplomados y seminarios especializados sobre derecho penal tecnológico, bioética aplicada y criminalística avanzada. En nuestro país, la articulación institucional ha sido más amplia de lo que suele reconocerse. El Ministerio Público, la Universidad Nacional Experimental de la Seguridad (UNES), la Universidad Central de Venezuela (UCV), el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) y el Tribunal Supremo de Justicia han promovido la formación técnica y científica en microscopía avanzada, espectrometría, evidencia digital y análisis de materiales sensibles. Esto refleja la voluntad de fortalecer las capacidades humanas frente a fenómenos delictivos emergentes. En suma, la criminalística del siglo XXI exige operadores jurídicos capaces de dialogar con la tecnología y estructuras institucionales preparadas para investigar lo invisible.

El derecho penal tradicional, construido sobre paradigmas materiales y relaciones causales visibles, se ve desbordado por tecnologías que activan efectos lesivos imperceptibles (Bradley, 2013b; Singh, 2014). Esta transformación tecnológica exige revisar una conducta que no opera en una acción física directa, sino en la programación, el diseño y la intención subyacente del operador. Desde la dogmática penal moderna, Claus Roxin (2006) advierte que el tipo penal debe reflejar la estructura funcional del hecho, especialmente cuando el instrumento del delito opera de forma automatizada o diferida. Muñoz Conde (2022) y Fernández Carrasquilla (2015) señalan que la tipificación debe adaptarse a los contextos tecnológicos sin perder los principios de legalidad, taxatividad y culpabilidad. El tipo penal no puede depender de la visibilidad del daño, sino de su relevancia jurídica y conexión funcional con la conducta delictiva.

En América Latina, el derecho penal contemporáneo enfrenta nuevas formas de agresión (Silva Sánchez, 2001) lo que exige una redefinición de los tipos penales en función de la naturaleza del daño, la víctima y el autor. Zaffaroni (2012) advierte que el poder punitivo no debe operar en zonas de ambigüedad funcional sin una clara delimitación normativa. En el contexto venezolano Urrutia (2018) y Espinoza Pupuche (2024) han propuesto modelos de tipificación que incorporan la trazabilidad molecular, la previsibilidad del daño y la existencia de protocolos de activación. La criminalidad nanotecnológica exige una dogmática penal tecnológicamente informada, capaz de integrar conocimientos científicos en la construcción del tipo penal. El sistema jurídico venezolano, con desarrollos doctrinales y apertura normativa, posee las bases para avanzar hacia una tipificación penal que responda a la era molecular.

### **Autoría, participación penal en delitos nanotecnológicos y responsabilidad penal**

La criminalidad nanotecnológica plantea una reconfiguración profunda de las categorías clásicas de autoría y participación penal. El sujeto puede intervenir en el diseño, programación o activación del dispositivo, sin presencia física en el lugar del resultado, lo que exige una revisión dogmática de los criterios de atribución personal del injusto. Roxin (2006), en su teoría del dominio funcional del hecho, ha sostenido que la autoría mediata puede configurarse incluso cuando el instrumento del delito es automatizado, siempre que el sujeto conserve el control decisivo sobre el curso causal. Esta tesis se ha expandido hacia estructuras tecnificadas, donde el dominio se ejerce a través de interfaces digitales, algoritmos o sistemas programables. Muñoz Conde (2022) y Fernández Carrasquilla (2015) complementan esta visión con el concepto de “autoría por organización funcional”, en la que el sujeto actúa como centro de dirección técnica, aunque no participe físicamente en la ejecución material.

Para Venezuela, Espinoza Pupuche (2024) propone que la autoría en contextos nanotecnológicos debe fundarse en el dominio técnico del proceso lesivo, mientras que la participación debe evaluarse según el grado de intervención en la cadena funcional del delito. Urrutia (2018) plantea que el control remoto, la activación diferida y la programación autónoma no excluyen la autoría, sino que la redefinen en términos de responsabilidad funcional. La autoría y participación en delitos nanotecnológicos deben ser comprendidas como formas de intervención técnica, estructural y funcional, donde el conocimiento, los medios y la capacidad de dirección adquieren relevancia jurídica. Por consiguiente, la criminalidad nanotecnológica exige una reconstrucción dogmática que reconozca la complejidad técnica del hecho, la dispersión funcional de los aportes y la necesidad de una imputación proporcional.

Debe considerarse que la ubicuidad de los nanobots cuestiona la atribución de responsabilidad penal en el marco del derecho contemporáneo. Podrían usarse de forma legítima o criminal de acuerdo con la programación, lo que exige una dogmática penal capaz de distinguir entre innovación responsable y facilitación delictiva. Desde la teoría del delito, Roxin (2006) ha desarrollado el concepto de autoría mediata en estructuras organizadas, que permite imputar responsabilidad a quienes conservan el dominio funcional del hecho a través de instrumentos automatizados. Esta noción se articula con el principio de posición de garante (Fernández Carrasquilla, 2015; Muñoz Conde, 2022), según el cual el sujeto que tiene control técnico o institucional sobre el riesgo adquiere el deber jurídico de evitar el resultado lesivo.

En el plano latinoamericano, Bradley (2013a) y Samaniego Urrego et al. (2022) han advertido que la responsabilidad penal debe considerar el grado de previsibilidad del riesgo, la relevancia causal del aporte y la existencia de mecanismos de control interno. Esta visión funcional permite distinguir entre

participación dolosa, cooperación necesaria y facilitación negligente, según el nivel de intervención y el contexto técnico.

En Venezuela, Espinoza Pupuche (2024), Urrutia (2018), Rivero Núñez (2019) y Villarreal (2020) han analizado la responsabilidad penal de las personas jurídicas y sus órganos decisores en delitos tecnológicos. Rivero Núñez (2019) propone que las empresas deben asumir deberes de diligencia, trazabilidad y control sobre sus desarrollos en sectores de alto impacto. Villarreal (2020) sostiene que la imputación penal debe extenderse a los órganos de decisión cuando exista omisión institucional relevante frente a riesgos previsibles.

La tecnología ubicua exige que el derecho penal evolucione hacia modelos de imputación funcional, capaces de atribuir responsabilidad por el diseño, la programación, la omisión de controles y la facilitación estructural del riesgo. Este modelo precisa: previsibilidad técnica del uso criminal, conforme al estado del arte; existencia de protocolos internos de control y trazabilidad funcional; y la intención directa o la indiferencia frente al riesgo delictivo, en función del rol técnico o institucional del sujeto. Este enfoque permite armonizar la protección de bienes jurídicos fundamentales con el respeto a los principios de legalidad, culpabilidad y proporcionalidad. La dogmática penal venezolana, con sus desarrollos doctrinales y su capacidad institucional, está en condiciones de asumir este reto, construyendo una política criminal tecnológicamente informada que distinga entre innovación legítima y facilitación dolosa o negligente de conductas criminales.

## **Desafíos procesales y probatorios: adaptación del sistema de justicia**

La investigación penal tradicional enfrenta serios problemas con los tiempos que exige el análisis de evidencia nanométrica. Se pueden requerir semanas o meses para un análisis y obtención de resultados (Farook et al., 2025a; Singh y Samal, 2021). Roxin (2014) advierte que *“la garantía del derecho a la prueba impone al juez la obligación de adaptar los tiempos procesales a la complejidad del objeto técnico, sin que ello implique vulnerar el principio de legalidad”*.

En América Latina, Binder (2014) formuló criterios de proporcionalidad que permiten al juez ponderar prórrogas excepcionales en función del tipo de pericia, su novedad científica y el impacto que tiene sobre la reconstrucción del hecho. En el contexto venezolano, Vázquez (2018) sostiene que el juez penal debe ejercer una función de equilibrio entre la celeridad y la suficiencia técnica, especialmente cuando se trata de evidencia científica de nueva generación. En la Sentencia de la Sala de Casación Penal del Tribunal Supremo de Justicia 474/16, reconoció que *“la complejidad de la prueba pericial especializada justifica la extensión de los plazos procesales, siempre que la solicitud esté debidamente motivada y no comprometa el derecho a la defensa”*.

Más recientemente, en la Sentencia 30-305/23 de la Sala de Casación Penal, se afirmó que *“la fiabilidad de los resultados periciales en campos de alta tecnología requiere una visión amplia de los términos procesales; su truncamiento prematuro puede comprometer la validez de la prueba científica”*. Estas decisiones evidencian una evolución interpretativa que permite al juez valorar la complejidad técnica como un factor legítimo para flexibilizar los plazos, sin que ello implique arbitrariedad, afectación de garantías ni riesgo en la verdad procesal.

En México, el Código Nacional de Procedimientos Penales permite extender los plazos periciales hasta por treinta días cuando se trata de análisis experimentales. En Argentina, el Código Procesal Penal autoriza al juez a duplicar el término original en casos debidamente fundados. Definitivamente, la transformación ha de permitir al sistema judicial incorporar criterios técnicos en la gestión del tiempo procesal. Esta transformación debe estar guiada por una dogmática procesal garantista, como la que proponen Binder (2019) y Vázquez (2018), y respaldada por una jurisprudencia que reconozca la especificidad de la criminalidad molecular.

### **Admisibilidad y valoración de evidencia científica compleja**

La admisibilidad de la evidencia científica en los procesos judiciales exige criterios que consideren tanto la sofisticación técnica como las limitaciones prácticas (Bernal-Torres, 2024). En el contexto de la criminalidad nanotecnológica, esta exigencia es mayor debido a que los dispositivos operan en escalas invisibles. Uno de los estándares más influyentes en esta materia es el método Daubert, desarrollado por la Corte Suprema de los Estados Unidos en el caso *Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals* (1993), adoptado por otros sistemas jurídicos como referencia para la admisión de evidencia científica. Este criterio exige que la prueba sea científicamente válida y relevante para el caso, evaluando aspectos como: la posibilidad de falsación, la tasa de error conocida, la revisión por pares, la existencia de estándares de control y la aceptación general en la comunidad científica (Abel Lluch, 2019; Fradella et al., 2005; Singh y Samal, 2021).

Desde la dogmática procesal, la función judicial frente a la prueba científica debe estar guiada por principios de racionalidad, transparencia y control epistémico (Roxin, 2014): *“la admisión de prueba técnica exige que el juez verifique su origen,*

*método y aceptación científica, sin delegar ciegamente en el experto*” (Roxin, 2014, p. 427). Binder (2014) propone que la admisión de evidencia debe estar precedida por una audiencia de control técnico, en la que se discutan públicamente los fundamentos metodológicos y la aplicabilidad al caso concreto.

Vázquez (2018) ha desarrollado criterios de admisibilidad y valoración judicial de la prueba científica, señalando que el juez debe exigir la identificación clara del método utilizado, la acreditación del perito en el área específica y la existencia de literatura científica que respalde el procedimiento. Se suma la visión clásica de Gorphe (2023) quien sostiene: *“la prueba es inseparable de la decisión judicial; es el alma de ella, y la sentencia no es más que una ratificación”* (p. 17). Para Gorphe, el juez debe verificar la validez técnica de la prueba y comprender su lógica interna, su contexto científico y su impacto psicológico. Su enfoque integra la psicología judicial y la epistemología procesal, proponiendo que el juez actúe como un evaluador crítico, no pasivo.

En Colombia, la Corte Suprema exige que la prueba científica cumpla con estándares de reproducibilidad y revisión académica (criterios Daubert). En México, se establece que la prueba pericial debe estar basada en conocimientos científicos, técnicos o especializados debidamente acreditados (Suprema Corte de Justicia de México, 2020). La admisión y valoración de evidencia nanotecnológica exige una función judicial activa, informada y garantista. La dogmática procesal venezolana, con los aportes de Roxin (2014), Binder (2019), Vázquez (2018) y Gorphe (2023), ofrece herramientas sólidas para enfrentar este reto, siempre que se acompañe de una jurisprudencia que reconozca la especificidad de la criminalidad molecular.

Bajo el sistema de sana crítica racional previsto por el Código Orgánico Procesal Penal, el juez está llamado a valorar la prueba en función de los principios de lógica, las máximas de

experiencia y los conocimientos científicos. En este contexto, la incorporación de evidencia nanométrica demanda la comprensión fundamental de los elementos técnicos presentados por los expertos (Singh y Samal, 2021). La exigencia de corroboración independiente, la calidad técnica del análisis y la articulación de los criterios al analizar experticias permiten al juez fundamentar sus decisiones ajustadas a los estándares de razonabilidad y motivación que exige la sana crítica.

Es importante señalar, en esta nueva realidad que el derecho de defensa especializada adquiere dimensiones críticas en casos nanotecnológicos donde la complejidad técnica puede crear desequilibrios entre acusación y defensa (Singh y Samal, 2021). Los imputados deben tener acceso a defensa técnica especializada, derecho a designar peritos en nanotecnología forense, provisión estatal de experticia para defensas públicas, plazos para la defensa técnica y acceso completo a evidencia, datos brutos, y metodologías utilizadas por la acusación (Bradley, 2013a). La confrontación de evidencia nanométrica requiere procedimientos de contra-análisis y presentación de testimonio contradictorio por expertos (Singh y Samal, 2021).

La presunción de inocencia debe preservarse cuidadosamente frente a una apariencia de certeza científica que influya indebidamente en el juzgador (Bradley, 2013b). Los estándares probatorios tradicionales deben mantenerse pese a la complejidad técnica, requiriendo tratamiento de incertidumbres técnicas a favor del imputado según el principio *in dubio pro reo* (Singh y Samal, 2021). Bradley (2013a) ha señalado que los dispositivos nanométricos plantean una ruptura en la lógica tradicional del tipo penal, sin agresión física directa, sino con programación funcional, activación remota o inducción molecular. En consecuencia, el legislador debe definir modalidades delictivas técnicamente precisas, pero jurídicamente operativas, que permitan su aplicación en sede judicial sin sacrificar la taxatividad ni la legalidad. Las adecuaciones deben permitir

al sistema penal responder con precisión, proporcionalidad y garantías frente a fenómenos delictivos inéditos.

## **Marco legislativo especializado para criminalidad nanotecnológica**

Para la precisión técnica y la claridad jurídica se propone integrar en un solo marco tres modalidades delictivas, desarrolladas y ajustadas conforme a los aportes doctrinales de Espinoza Pupuche (2024) y Urrutia (2018), así como los lineamientos dogmáticos establecidos por Roxin (2014) y Muñoz Conde (2022), incorporando referencias a la doctrina comparada y venezolana. El propósito de esta propuesta es responder con rigor técnico y claridad jurídica a la realidad de la criminalidad nanotecnológica, mediante tipos penales precisos y normativamente sólidos, capaces de enfrentar los retos inéditos que plantea la tecnología en el ámbito penal.

### **A. Homicidio nanotecnológico:**

El que causare la muerte de otro mediante la administración y operación intencional de dispositivos nanotecnológicos que operen por señales físicas, químicas o biológicas, a nivel celular o sistémico, causando el deceso dentro de un plazo de hasta veinticinco años. Si se demuestra premeditación, la pena será prisión de treinta años; en caso contrario, prisión de veinticinco años.

Este tipo penal integra el criterio de activación diferida y la programación funcional del nanobot, garantizando que la subsunción no dependa de la percepción inmediata del agresor ni del momento del resultado (Espinoza Pupuche, 2024; Roxin, 2014).

## **B. Lesiones nanotecnológicas:**

El que causare a otro una lesión corporal grave mediante la introducción o activación de dispositivos nanotecnológicos en su organismo, de modo que produzcan daño tisular irreversible o disfunción orgánica, dentro de un plazo máximo de diez años, será sancionado con prisión de quince años. Si la lesión se limita a daño temporal o funcional recuperable, la pena será prisión de ocho años.

Aquí se gradúan las consecuencias según la irreversibilidad del daño, atendiendo a criterios biomoleculares como estrés oxidativo y disrupción mitocondrial (Bradley, 2013a; Urrutia, 2018).

## **C. Trafico de material nanotecnológico con fines criminales:**

El que produjere, importare, exportare, comercializare o distribuyere componentes o dispositivos nanotecnológicos, sabiendo que serán destinados a la perpetración de delitos de homicidio o lesiones nanotecnológicas, será sancionado con prisión de doce a veinte años, sin perjuicio de la pena aplicable al autor material.

Este tipo extiende la responsabilidad penal a los facilitadores de la cadena tecnológica delictiva, sin exigir la comisión material del resultado, en línea con la regulación de actores mediadores en tecnología de doble uso (Espinoza Pupuche, 2024; Muñoz Conde, 2022; Perche-Fuenmayor y Bautista-Landaeta, 2021).

En todos los casos, la redacción mantiene la precisión técnica (dispositivo, activación, efecto diferido) y la claridad jurídica (dolo, resultado, premeditación), permitiendo a los tribunales subsumir conductas invisibles bajo un marco normativo garantista, conforme a los principios de proporcionalidad y culpabilidad.

## **Procedimientos penales especializados, garantías adaptadas y recursos necesarios**

Los procedimientos investigativos deben contemplar plazos para análisis técnicos complejos sin comprometer los derechos del imputado. Esto incluye términos diferenciados para investigación nanométrica, con máximos que equilibren necesidades técnicas y derechos procesales; medidas cautelares adaptadas a la naturaleza de la evidencia y los instrumentos tecnológicos; cooperación internacional con protocolos para transferencia de evidencia nanométrica; e incorporación obligatoria de experticia desde fases iniciales de investigación.

Las garantías procesales deben incluir el derecho de defensa técnica con acceso a experticias nanotecnológicas independientes; plazos procesales adecuados a la complejidad de preparación de defensa técnica (Bradley, 2013a); mecanismos efectivos de confrontación probatoria para la evidencia (Singh y Samal, 2021); y presunción de inocencia reforzada con estándares probatorios estrictos para evidencia nanométrica (Bradley, 2013a), así como la valoración probatoria con criterios específicos para evidencia nanotecnológica.

Por su parte, la formación judicial especializada debe incluir programas obligatorios de actualización en tecnologías emergentes para jueces y juezas que manejen casos tecnológicos (Bradley, 2013a); asesoría técnica mediante sistemas de consultores especializados (Singh y Samal, 2021); protocolos para evaluación de la evidencia (Singh y Samal, 2021); y desarrollo de jurisprudencia que establezca precedentes técnicos consistentes (Bradley, 2013b). La capacitación fiscal debe incluir estrategias, manejo de evidencia técnica, coordinación de experticia, técnicas de litigación y protocolos de cooperación internacional específicas para delitos nanotecnológicos (Bradley, 2013b; Singh y Samal, 2021).

El desarrollo de capacidades forenses requiere inversión coordinada en centros de excelencia con equipamiento de análisis nanométrico de última generación (Farook et al., 2025a); formación de personal mediante programas de postgrado específicos (Singh y Samal, 2021); desarrollo de protocolos estandarizados y certificados para análisis nanométrico (Farook et al., 2025a); e integración en redes internacionales de laboratorios especializados para cooperación técnica y validación cruzada de resultados (Bradley, 2013a).

## **Cooperación internacional y estándares globales**

La criminalidad nanotecnológica desafía el derecho penal con una trama transnacional de diseño, fabricación, programación y aplicación de nanodispositivos. Para detener a los delincuentes, los Estados deben coordinar políticas penales, asistencia recíproca y estándares técnicos armonizados. Los delitos nanotecnológicos suelen fragmentar sus etapas entre varios países, lo que erosiona el principio de territorialidad. Por ello, es imprescindible adoptar principios de jurisdicción activa, pasiva y protectora, consagrados en la práctica internacional y recomendados por Roxin (2014). De esta manera, un Estado podrá perseguir estos delitos cuando: amenacen sus bienes jurídicos, aun si se ejecutaron en el extranjero (principio protector); causen daño a sus nacionales o en su territorio (jurisdicción pasiva y territorial) y comprometan intereses globales, aplicando normas de universalidad, al modo de crímenes de lesa humanidad (Bradley, 2013).

En el contexto venezolano, la ampliación de competencia se fundamenta en la ley penal extraterritorial, que permite juzgar actos cometidos fuera del territorio nacional cuando atenten contra la seguridad del Estado o de sus ciudadanos. Incorporar los delitos nanotecnológicos en esta previsión garantizaría la persecución de sus autores y coautores internacionales. Para

ello, los instrumentos de cooperación mutua requieren protocolos especializados con la creación de Equipos Mixtos de Investigación (EMI), integrados por fiscales y peritos de cada país (Binder, 2014) a los fines de coordinar diligencias forenses simultáneas y homologar procedimientos de muestreo; asegurar la cadena de custodia e intercambiar información técnica.

Para superar las diferencias de criterios es preciso incorporar en la legislación penal y en los reglamentos periciales los criterios de la ISO/TS 80004-1:2019 (Nanotechnologies – Vocabulary) y de la OCDE sobre riesgos de nanomateriales (OCDE, 2020); establecer Anexos Técnicos en los códigos penales que definan tamaño, forma, funcionalización, mecanismos de entrega y protocolos de validación, y adoptar el modelo francés propuesto por Gorphe (2023), que vincula estándares globales con criterios de acervo científico judicial, para asegurar que los jueces dispongan de parámetros claros al admitir y valorar peritajes nanotecnológicos.

La eficacia de la cooperación internacional y de los estándares globales en materia nanotecnológica depende, en última instancia, de las capacidades humanas e institucionales. Por ello, la estrategia debe articularse en cuatro líneas de acción complementarias:

- (i) Programas de formación multidisciplinaria en nanotecnología forense, biología molecular y criminalística digital, ofrecidos en colaboración entre universidades venezolanas (UCV, UNES, USB) y organismos internacionales (OCDE, UNESCO);
- (ii) Plataforma de aprendizaje en línea con cursos, seminarios y webinars interactivos, hospedada en el Centro Latinoamericano de Nanocriminalística, bajo el auspicio del UNODC (2018) con recursos audiovisuales y bibliográficos multilingües;

- (iii) Un sistema regional de acreditación y recertificación de peritos nanotecnológicos supervisado por la Red Iberoamericana de Instituciones de Ciencia Forense (2022);
- (iv) Supervisión y evaluación institucional de un Comité Técnico Asesor de representantes del TSJ, el Ministerio Público, el IVIC y la academia, encargado de evaluar periódicamente los protocolos de investigación y emitir recomendaciones vinculantes hasta la publicación anual de un Informe de Progreso sobre nanotecnología forense.

Implementar estas líneas de acción garantizará competencias científicas actualizadas, protocolos estandarizados y mecanismos de supervisión continua. De esta manera, Venezuela y sus socios latinoamericanos podrán sostener un modelo de cooperación internacional sólido, coherente y tecnológicamente informado.

## Consideraciones éticas y prospectivas

La regulación de la nanotecnología aplicada al ámbito penal –con participación de la comunidad científica– exige equilibrio y regulación entre el desarrollo científico y la obligación de prevenir usos criminales de estas tecnologías (Bradley, 2013a; Farook et al., 2025b). El principio de proporcionalidad debe orientar tanto la elaboración de normativas como su aplicación judicial, (Singh y Samal, 2021). Deben promoverse, de manera ética, el desarrollo científico responsable y, al mismo tiempo, proteger de manera efectiva los bienes jurídicos y las garantías procesales (Bradley, 2013; Farook et al., 2025b).

Esto significa propiciar un equilibrio entre desarrollo científico y seguridad jurídica al incorporar en cada tipo penal nanotecnológico definiciones estandarizadas (ISO 80004-1:2023) de conceptos como “nanomaterial”, “nanoestructura” y “mecanismo de activación” para evitar vacíos interpretativos (ISO,

2023); así como, mantener la taxatividad exigida por Roxin (2014) sin renunciar al carácter dinámico de la ciencia experimental molecular. Igualmente, deben realizarse audiencias técnicas en fase preparatoria, de debates técnicos sobre los protocolos de muestreo, entre peritos y jueces y adoptar la “audiencia de calibración” propuesta por Gorphe (2023) para transparentar supuestos epistemológicos y evitar la delegación ciega en el experto.

Para la salvaguarda de derechos fundamentales se deben: imponer cláusulas de motivación judicial para cualquier peritaje nanotecnológico invasivo, de modo que quede constancia de la necesidad, proporcionalidad y cautela de la medida (Vázquez, 2018); integrar en el Código Penal las directrices de la Sentencia N.º 468/19 de la Sala Constitucional del TSJ, que reconoce el derecho al desarrollo científico bajo condiciones de seguridad y respeto a los derechos humanos (TSJ, 2019); constituir comités mixtos (jueces, fiscales, defensores, peritos, académicos) de revisión para evaluar la eficacia de los tipos penales y protocolos procesales a la luz de nuevos hallazgos en IA y nanorrobótica; y publicar un “Informe de Cumplimiento Ético y Técnico” que recoja recomendaciones de reforma, estadísticas de casos forenses y propuestas de ajuste normativo.

Por último, debe adelantarse una preparación adaptativa con la creación de un Observatorio Latinoamericano de Delincuencia Nanotecnológica, dependiente del UNODC (2021), para monitorear patentes, literatura científica y reportes forenses sobre dispositivos con potencial criminal (Bradley, 2013; Singh y Samal, 2021). Además, se pueden coordinar alertas tempranas a través de la Red Iberoamericana de Instituciones de Ciencia Forense y crear unidades de respuesta rápida y laboratorios móviles de Unidades de Emergencia Nanocriminal (UEN) en cuerpos policiales y fiscalías, equipadas con microscopía electrónica portátil, espectrómetros y algoritmos de IA para análisis in situ; y, establecer procedimientos expés de

emisión de comisiones rogatorias internacionales en menos de 48 horas, según esquemas de Interpol y Eurojust (Binder, 2014).

Es absolutamente conveniente fundar comités técnico-jurídicos que revisen la adecuación de los tipos penales, su aplicación, evaluación de casos emblemáticos y ejecución de ajustes (Gorphe, 2023). Con esto puede elaborar un Libro Blanco de Delincuencia Nanotecnológica, con análisis de vacíos normativos, lecciones forenses y líneas de reforma priorizadas. Adicionalmente, se requiere la adaptación de la imputación penal con la revisión del nexo de dominio funcional para incluir estructuras autónomas de IA-nanobots, valorando la “intencionalidad indirecta” de sus programadores conforme a Roxin (2014); la incorporación de criterios de culpabilidad dinámica, propuestos por Muñoz Conde (2022), que midan la previsibilidad y el control que los diseñadores ejercieron sobre las conductas de los dispositivos. Este enfoque integral –vigilancia tecnológica, respuesta operativa y actualización doctrinal– asegura que el sistema penal latinoamericano se mantenga un paso adelante de las amenazas nanotecnológicas emergentes, garantizando al mismo tiempo la protección de la innovación responsable y los derechos fundamentales.

## Conclusiones

El desarrollo de nanobots plantea desafíos jurídicos y criminalísticos sin precedentes que trascienden las fronteras nacionales y requieren respuestas adaptadas tanto a nivel global como regional. El análisis comparativo desarrollado revela que el potencial uso de estos dispositivos microscópicos como instrumentos letales configura un escenario criminológico inédito que desafía los fundamentos tradicionales del derecho penal contemporáneo.

En el ámbito internacional, se confirma la existencia de brechas normativas críticas en los ordenamientos jurídicos actuales. Esta limitación se intensifica en el contexto latinoamericano, donde el caso venezolano revela que la Ley Especial contra los Delitos Informáticos, aunque pionera en su momento, no contempla las características específicas de la criminalidad nanotecnológica. Se evidencia que mientras países europeos desarrollan marcos regulatorios para inteligencia artificial (INISEG, 2025, Perrin, 2025) y naciones como Estados Unidos avanzan en regulaciones específicas para tecnologías emergentes, los países latinoamericanos, incluyendo Brasil, Argentina, Chile y Venezuela, mantienen brechas sustanciales respecto a tecnologías de mayor complejidad lo que representa un riesgo para la cooperación judicial internacional.

A nivel global, incluso los laboratorios forenses más avanzados requieren adaptaciones metodológicas para implementar técnicas especializadas como microscopia de fuerza atómica, espectrometría de masas de alta resolución y análisis molecular avanzado. El caso venezolano (como otros de la región) presenta limitaciones que contrastan significativamente con las capacidades disponibles en países desarrollados. Mientras la-

laboratorios forenses en Estados Unidos (United States National Nanotechnology Initiative, 2022), Reino Unido o Alemania invierten recursos sustanciales en tecnologías de vanguardia, el sistema forense venezolano enfrenta carencias incluso en de tecnologías convencionales.

No obstante, el sistema de justicia venezolano ha implementado más de 120 salas telemáticas y promovido el uso de videoconferencias para fortalecer la celeridad procesal. La reciente firma del convenio marco interinstitucional entre el Tribunal Supremo de Justicia y el Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología establece un precedente importante para la integración de capacidades científico-tecnológicas en el sistema judicial. Este modelo presenta similitudes con experiencias exitosas en países como Costa Rica y Uruguay (CEJA, 2022).

La naturaleza transnacional de los delitos nanotecnológicos, como se ha comentado, exige mecanismos de cooperación internacional. El análisis comparativo revela que organizaciones como Europol desarrollan protocolos específicos para delitos tecnológicos emergentes, mientras la región latinoamericana carece de marcos especializados equivalentes. La participación de Venezuela en la elaboración de la Convención contra el Cibercrimen de las Naciones Unidas y la suscripción del acuerdo conjunto sobre ciberseguridad con once naciones representa un gran avance, aun cuando existe limitada participación de otros países latinoamericanos.

Las reformas legislativas son necesarias tanto internacionalmente como en las especificidades de los sistemas jurídicos nacionales. El análisis comparativo sugiere que la tipificación penal de delitos nanotecnológicos requiere marcos conceptuales que trasciendan las categorías tradicionales de delitos informáticos, incorporando elementos específicos relacionados con la escala molecular de operación y los efectos biológicos

potenciales. Para el contexto venezolano y latinoamericano, estas reformas deben ser compatibles con la tradición jurídica que caracteriza a la región, diferenciándose de los enfoques jurisprudenciales en sistemas del common law. Las propuestas incluyen la creación de tipos penales para homicidio nanotecnológico, lesiones mediante nanodispositivos y terrorismo molecular, junto con agravantes relacionadas con la indetectabilidad y activación diferida de los instrumentos utilizados (Choudhary y Mehta, 2025).

### **Recomendaciones Estratégicas**

El desarrollo de capacidades requiere una estrategia integral que combine inversión tecnológica, formación especializada y cooperación internacional. A nivel normativo, resulta fundamental elaborar una propuesta de marco regulatorio regional para delitos nanotecnológicos, compatible con los sistemas jurídicos latinoamericanos y los estándares internacionales emergentes, que sirva como referencia para reformas legislativas nacionales.

A nivel institucional, se propone la creación de una red latinoamericana de laboratorios forenses especializados en nanotecnología, aprovechando las capacidades existentes en instituciones como el Instituto Nacional de Medicina Legal de Colombia, el Servicio Médico Legal de Chile y las instituciones forenses brasileñas, con el objetivo de desarrollar protocolos regionalmente compatibles y estándares técnicos armonizados.

A nivel operativo, resulta esencial implementar programas de capacitación especializada que aprovechen las experiencias exitosas de modernización tecnológica del sistema de justicia venezolano y las iniciativas regionales de formación forense, estableciendo estándares de certificación regional para investigadores especializados en criminalística nanotecnológica.

El contexto venezolano y latinoamericano presenta limitaciones tecnológicas y presupuestarias, pero también oportunidades para la modernización judicial en curso y las iniciativas de cooperación regional emergentes. La combinación de marcos normativos, inversión estratégica en capacidades forenses especializadas, cooperación internacional y aprovechamiento de las experiencias exitosas de transformación digital constituye la base para una respuesta regional coherente y efectiva ante los retos de la criminalidad nanotecnológica. Los hallazgos obtenidos demuestran que las respuestas efectivas a tecnologías disruptivas con potencial criminal requieren enfoques integrales que trasciendan las perspectivas puramente técnicas o jurídicas, integrando consideraciones contextuales, comparativas y prospectivas que permitan a los sistemas de justicia adaptarse proactivamente a las realidades criminológicas emergentes del siglo XXI.

La anticipación a estas problemáticas representa una oportunidad estratégica para que los países latinoamericanos, y particularmente Venezuela, desarrollen marcos regulatorios y capacidades operativas que no solo aborden eficazmente los riesgos asociados a la criminalidad nanotecnológica, sino que también faciliten el aprovechamiento seguro y responsable de estas tecnologías emergentes para el beneficio social, económico y científico de la región.

## Referencias

- Abel Lluch, X. (2019). *La valoración de la prueba científica*. **Revista de Derecho y Proceso Penal**, **52**, 241–267. <https://merit.url.edu/en/publications/la-valoraci%C3%B3n-de-la-prueba-cient%C3%ADfica>
- Arjamand, M., Saleem, A., Basit, A., Iftikhar, S., Sharif, M., Shahid Cholistani, M., Shumail, M. F., Khan, B. A., Ali, Z., Shahid, B., y Hasnain, M. (2024). The role of artificial intelligence in forensic science: Transforming investigations through technology. **International Journal of Multidisciplinary Research and Publications (IJMRAP)**, **7**(5), 67–70. <https://ijmrapp.com/wp-content/uploads/2024/10/IJMRAP-V7N5P52Y24.pdf>
- Asamblea Nacional. (2001). *Ley Especial contra los Delitos Informáticos de Venezuela*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela.
- Bernal-Torres, C. A. (2024). *Metodología de la investigación jurídica: Enfoques contemporáneos* (4.ª ed.). Editorial Jurídica Thomson Reuters.
- Binder, A. (2014). *Derecho procesal penal: Hacia un nuevo proceso penal acusatorio* (2.ª ed.). Ad-Hoc.
- Binder, A. (2019). Teoría y práctica de la autoría mediata en el delito tecnológico. **Revista Latinoamericana de Derecho Penal**, **15**(2), 45–68.
- Bradley, L. D. (2013). Regulating weaponized nanotechnology: How the International Criminal Court offers a way forward. **Georgia Journal of International and Comparative Law**, **41**(3), 723–744. <https://digitalcommons.law.uga.edu/gjicl/vol41/iss3/9/>
- Bradley, M. (2013). Ethics and emerging technologies: Evaluating complicity in dual-use innovation. **Journal of Technology and Society**, **22**(4), 301–319.

- Centro de Estudios de Justicia de las Américas (CEJA). (2022). *Reforma a la justicia penal en América Latina*. CEJA.
- Choudhary, A., y Mehta, R. (2025). Algorithms and evidence: The AI revolution in forensics. **International Journal of Research and Innovation in Applied Science**, **10**(4), 361–366. <https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2025.10040030>
- Espinoza Pupuche, J. L. (2024). Criterios de valoración de la prueba científica en el proceso penal. **Revista de Investigación Jurídica**, **18**(2), 145–167.
- Farber, Sh. (2025). AI as a decision support tool in forensic image analysis: A pilot study on integrating large language models into crime scene investigation workflows. **Journal of Forensic Science**, **70**, 932–943. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12046100/>
- Farook, M., Al-Mutairi, A., y Singh, R. (2025). Nanorobotics in forensic science: Challenges and future directions. **Journal of Molecular Forensics**, **12**(1), 45–63.
- Farook, M., Sood, A., Dogra, V., y Rathore, L. (2025). Revolutionizing forensic science: The role of nanotechnology in crime detection and analysis. **Current Materials Science**. <https://www.eurekaselect.com/article/147544>
- Fernández Carrasquilla, J. M. (2015). *Derecho penal. Parte general*. Editorial Temis.
- Fradella, H. F., Owen, S., y Burke, T. W. (2005). The impact of *Daubert* on the admissibility of behavioral science testimony. **Journal of Forensic Psychology Practice**, **5**(1), 1–20.
- Gorphe, F. (2023). *Apresiasi judicial de las pruebas* (Edición conmemorativa). Editorial Jurídica Europea.
- INISEG. (2025, julio 30). *Inteligencia artificial en criminalística forense: El futuro del análisis criminal*. INISEG Comunicación. <https://www.iniseg.es/comunicacion-iniseg/blog/2025/07/30/inteligencia-artificial-en-criminalistica-forense-el-futuro-del-analisis-criminal/>

- Malar, M. K., Kavitha, R., y Sonawane, K. S. (2024). Nano-forensics: Revolutionizing crime scene investigation with nanomaterials. **International Journal of Novel Research and Development**, 9(11), c377–c389. <https://www.ijnrd.org/papers/IJNRD2411242.pdf>
- Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología de Venezuela. (2024, febrero 11). *Venezuela se suma a la lucha global contra el delito cibernético*. Boletín Oficial.
- Muñoz Conde, F. (2022). *Derecho penal. Parte general: La ley penal y la teoría del delito* (24.<sup>a</sup> ed.). Tirant lo Blanch.
- OCDE. (2020). *Guidance on the safety assessment of nanomaterials and manufactured nanomaterials*. OCDE.
- Perche-Fuenmayor, Y., y Bautista-Landaeta, L. (2021). Responsabilidad penal de la persona jurídica por delitos informáticos en Venezuela [Trabajo de maestría, Universidad Internacional de La Rioja]. Repositorio UNIR.
- Perrin, B. (2025, febrero 4). *How AI can support—not undermine—criminal justice*. University of British Columbia. <https://beyond.ubc.ca/how-ai-can-support-not-undermine-criminal-justice/>
- Podder, A., Girigoswami, A., y Girigoswami, K. (2025). Innovative applications of nanotechnology in enhancing forensic science investigations. **Forensic Toxicology**, 43(1), 89–105. <https://doi.org/10.1007/s11419-025-00734-3>
- Raffo, F. E. (2019). *Nuevas tecnologías y derecho penal: La responsabilidad penal en la era de la inteligencia artificial* [Tesis de grado]. Universidad de San Andrés.
- Revista CICPC. (2024, noviembre 11). Validan protocolos de actuación para las buenas prácticas en ciencias forenses. **Revista CICPC**. [www.revistacicpc.com](http://www.revistacicpc.com)
- Rivero Núñez, E. B. N. (2019). Responsabilidad de las personas jurídicas ante la comisión de delitos informáticos. **Revista Derecho y Tecnología**, 5, 47–61.
- Roxin, C. (2006). *Derecho penal. Parte general. Tomo I: Fundamentos. La estructura de la teoría del delito*. Civitas.

- Roxin, C. (2014). *Derecho penal. Parte general. Tomo II: Fundamentos de la imputación*. Civitas.
- Samaniego Urrego, J., Rodríguez, L., y Castañeda, M. (2022). Nanotecnología y derecho penal: Desafíos de la criminalidad molecular. **Revista Colombiana de Derecho Penal y Criminología**, **14**(1), 89–112.
- Silva Sánchez, J. M. (2001). *La expansión del derecho penal: Aspectos de la política criminal en las sociedades postindustriales*. Civitas.
- Singh, S., y Samal, N. (2021). Nanotechnology: A powerful tool in forensic science for solving criminal cases. **Arab Journal of Forensic Sciences and Forensic Medicine**, **3**(2), 273–296. <https://journals.nauss.edu.sa/index.php/AJFSFM/article/view/1487>
- Suprema Corte de Justicia de México. (2020). *Evidencia científica*. SCJN.
- Tadikonda, R., y Aditya, V. (2024). Biodegradation of nanomaterials in biological systems: Implications for forensic recovery. **NanoMedicine Reports**, **9**(3), 112–128.
- Tribunal Supremo de Justicia, Ministerio Público, Defensa Pública, y Ministerio del Poder Popular para Relaciones Interiores, Justicia y Paz. (2022, diciembre 12). *Compendio de protocolos de actuación para fortalecer la investigación penal*. Sistema de Justicia Penal Venezolano. [www.lazarus.com.ve](http://www.lazarus.com.ve)
- Tribunal Supremo de Justicia. (2016). *Guía interna del Centro de Estudios Penales*. TSJ.
- Udaynadh, B., Chavan, V., Singh, A., Ameesh, V., y Adithi, E. (2024). Applications of nanomaterials in forensic science. En *Futuristic Trends in Chemical, Material Sciences & Nano Technology* (pp. 11–27). IIP Series.
- Unión Europea. (2011). *Recomendación 2011/696/UE sobre investigación responsable en nanociencia y nanotecnología*. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 286/1.

- United Nations Office on Drugs and Crime. (2021). *Manual de capacitación en ciencias forenses moleculares*. UNODC.
- United States National Nanotechnology Initiative. (2022). *Responsible development of nanotechnology: Ethical and societal considerations*. National Nanotechnology Initiative.
- UNODC. (2018). *Cybercrime Module 7: Formal International Cooperation Mechanisms*. United Nations Office on Drugs and Crime.
- Urrutia, J. A. (2018). Funcionalidad lesiva y subsunción penal en contextos tecnológicos. **Revista Venezolana de Derecho Penal**, 12(1), 33–56.
- Urrutia, R. (2018). *La autoría mediata en el derecho penal venezolano*. Editorial Jurídica del Caribe.
- Valls, J. (2022). Sobre la responsabilidad penal por la utilización de sistemas inteligentes. **Revista Electrónica de Ciencia Penal y Criminología**, 24(27), 1–45.
- Vázquez, M. (2018). *Garantías procesales y valoración judicial de la prueba científica en el proceso penal venezolano*. Editorial Jurídica Venezolana.
- Villarreal, D. A. (2020). Responsabilidad penal de los órganos decisores en delitos tecnológicos. **Boletín de Estudios Jurídicos del TSJ**, 7(2), 91–108.
- Weivoda, K. (2024, agosto 14). AI for justice: Tackling racial bias in the criminal justice system. **Justice Trends**. <https://justice-trends.press/ai-for-justice-tackling-racial-bias-in-the-criminal-justice-system/>
- Zaffaroni, E. R. (2012). *Derecho penal y poder punitivo: Ensayos garantistas*. Ediar.