

UNED

Química Forense

M.^a del Pilar Cornago Ramírez
Soledad Esteban Santos



Química Forense

**M.^a del Pilar Cornago Ramírez
Soledad Esteban Santos**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

QUÍMICA FORENSE

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamos públicos.

© Universidad Nacional de Educación a Distancia
Madrid 2016

www.uned.es/publicaciones

© M.^a del Pilar Cornago Ramírez
Soledad Esteban Santos

*Ilustración de cubierta: Fco. Javier Barahona Álvarez
y Teresa Alonso Pérez*

*Todas nuestras publicaciones han sido sometidas
a un sistema de evaluación antes de ser editadas.*

ISBN electrónico: 978-84-362-7097-6

Edición digital: enero de 2016

ÍNDICE

Presentación

TEMA 1. LA QUÍMICA EN EL CONTEXTO DE LA CIENCIA FORENSE

Soledad Esteban Santos

- 1.1. Introducción
- 1.2. La ciencia forense
 - 1.2.1. Aspectos etimológicos
- 1.3. Origen y evolución de la ciencia forense
- 1.4. El laboratorio forense
 - 1.4.1. Centros e instalaciones de la ciencia forense en España
- 1.5. Escena del crimen
 - 1.5.1. Protección de la escena del crimen
- 1.6. Evidencias e indicios
 - 1.6.1. Clasificación de las evidencias
 - 1.6.2. Búsqueda sistemática de las evidencias
 - 1.6.3. Selección de las evidencias
- 1.7. Estudio de las evidencias: aspectos generales
- 1.8. La química forense
- 1.9. Aspectos legales en el trabajo forense
 - 1.9.1. Cadena de custodia
 - 1.9.2. Informe pericial

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «El caso de Colin Pitchfork y la evolución de la ciencia forense»

TEMA 2. FUNDAMENTO DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS EN QUÍMICA FORENSE

Soledad Esteban Santos

- 2.1. Introducción

■ LAS EVIDENCIAS EN LA ESCENA DEL CRIMEN

2.2. Obtención y envío de evidencias desde la escena del crimen

2.2.1. Localización de evidencias

2.2.2. Recogidas de evidencias

2.2.3. Embalaje de evidencias

2.2.4. Expediente de envío

■ LAS EVIDENCIAS EN EL LABORATORIO

2.3. Recepción de evidencias

2.4. Estudio preliminar

2.5. Procesos de separación

2.5.1. Técnicas químicas clásicas

2.5.2. Técnicas cromatográficas

2.5.3. Técnicas cromatográficas en el análisis forense

2.5.4. Electroforesis

2.6. Análisis forense: técnicas instrumentales

2.7. Microscopía

2.7.1. Tipos de microscopios

2.8. Espectroscopía

2.8.1. Espectroscopía UV y visible

2.8.2. Espectroscopía IR

2.8.3. Espectroscopía Raman

2.8.4. Espectroscopía de emisión rayos X

2.8.5. Otros métodos espectroscópicos

2.8.6. Espectrometría de masas

2.9. Otras técnicas instrumentales

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Rayos láser»

TEMA 3. INVESTIGACIÓN FORENSE DE PINTURAS Y DOCUMENTOS

Soledad Esteban Santos

3.1. Introducción

■ LA QUÍMICA Y EL COLOR

3.2. Colorante, tinte, pigmento

3.3. ¿Por qué las sustancias tienen color?

- 3.4. El color en los tintes
 - 3.4.1. Grupos cromóforos y auxocronos
 - 3.4.2. La causa del color en los tintes
 - 3.4.3. Clasificación de los tintes
 - 3.5. El color en los pigmentos
 - 3.6. La investigación forense y el color
 - INVESTIGACIÓN FORENSE DE PINTURAS
 - 3.7. Pinturas como evidencia
 - 3.7.1. Forma de localizar, recoger y transportar las evidencias de pinturas
 - 3.8. Análisis forense de pinturas
 - 3.8.1. Composición de las pinturas
 - 3.8.2. Problemas forenses a resolver
 - 3.8.3. Técnicas analíticas para pinturas
 - INVESTIGACIÓN FORENSE DE DOCUMENTOS
 - 3.9. Documentos cuestionados
 - 3.9.1. Forma de recoger y transportar los documentos cuestionados
 - 3.10. Análisis forense de tintas
 - 3.10.1. Composición de las tintas
 - 3.10.2. Técnicas analíticas para tintas
 - 3.11. Tintas invisibles, documentos secretos
 - 3.12. Análisis forense del papel
 - 3.12.1. Composición química del papel
 - 3.12.2. Técnicas analíticas del papel
 - 3.13. Alteraciones en los documentos
 - 3.13.1. Borrar el texto
 - 3.13.2. Cambiar el texto
 - 3.13.3. Tachar el texto
 - 3.13.4. Marcas de presión o escritura latente
 - 3.13.5. Otros tipos de alteraciones
 - 3.14. Documentos impresos
 - 3.15. Datación de documentos
- EJERCICIOS Y SOLUCIONES
- LECTURA: «Falsificación de papel moneda: un delito más frecuente de lo que pudiera pensarse»

TEMA 4. LA QUÍMICA EN LA INVESTIGACIÓN FORENSE DE FIBRAS TEXTILES

M.^a del Pilar Cornago Ramírez

- 4.1. Introducción
- 4.2. Qué son las fibras
 - 4.2.1. Clasificación de las fibras
 - 4.2.2. Características de las fibras
- 4.3. Fibras naturales: tipos y propiedades
 - 4.3.1. Fibras de origen animal
 - 4.3.2. Fibras de origen vegetal
 - 4.3.3. Fibras de origen mineral
- 4.4. Fibras manufacturadas: tipos y propiedades
 - 4.4.1. Fibras artificiales
 - 4.4.2. Fibras sintéticas
 - 4.4.3. Otras fibras
- 4.5. Investigación forense de fibras
 - 4.5.1. Búsqueda de pruebas
 - 4.5.2. Recogida de pruebas
 - 4.5.3. Cómo minimizar el impacto de las contaminaciones
- 4.6. Identificación y comparación de fibras
 - 4.6.1. Técnicas de microscopía
 - 4.6.2. Técnicas espectroscópicas
 - 4.6.3. Técnicas cromatográficas
 - 4.6.4. Otras técnicas
- 4.7. Importancia de las fibras como evidencia

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Pashmina y shahtoosh, dos tipos de lana muy apreciadas»

TEMA 5. PRUEBAS QUÍMICAS APLICADAS A LA DETECCIÓN DE RESTOS DE ACELERADORES Y EXPLOSIVOS

M.^a del Pilar Cornago Ramírez

- 5.1. Introducción
- 5.2. Reacciones de combustión
 - 5.2.1. Termoquímica de la combustión
 - 5.2.2. Cinética de la combustión

- 5.3. Química del fuego
 - 5.3.1. Parámetros característicos de las sustancias combustibles
- 5.4. Búsqueda de evidencias en la investigación forense de incendios
 - 5.4.1. Evidencias observadas durante el desarrollo del incendio
 - 5.4.2. Evidencias de utilidad una vez extinguido el fuego
- 5.5. Identificación en el laboratorio forense
 - 5.5.1. Preparación de las muestras
 - 5.5.2. Técnicas de análisis
 - 5.5.3. Interpretación de resultados
- 5.6. En la escena de una explosión
 - 5.6.1. Explosión y explosivo
 - 5.6.2. Química de una explosión
 - 5.6.3. Tipos de explosión
 - 5.6.4. Tipos de explosivo
- 5.7. Detección de explosivos
- 5.8. Investigación forense de una explosión
 - 5.8.1. Dónde y cómo se originó la explosión
 - 5.8.2. Trabajo en el laboratorio forense
 - 5.8.3. Accidente o intencionalidad
 - 5.8.4. Quién causó la explosión

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Desarrollando una pista»

TEMA 6. BALÍSTICA FORENSE. DETECCIÓN DE RESIDUOS DE DISPARO

M.^a del Pilar Cornago Ramírez

- 6.1. Introducción
- 6.2. Balística forense
- 6.3. Balística instrumental
 - 6.3.1. Características de las armas de fuego
 - 6.3.2. Características de la munición
- 6.4. Balística interior
 - 6.4.1. La deflagración
 - 6.4.2. Velocidad de salida de los proyectiles
 - 6.4.3. Mezclas deflagrantes

- 6.5. Balística exterior
- 6.6. Balística de efectos o balística terminal
- 6.7. Trabajo de investigación forense
 - 6.7.1. Trabajo en la escena del suceso
 - 6.7.2. Trabajo en el laboratorio
 - 6.7.3. Determinación de restos de disparo
 - 6.7.4. Importancia de la determinación de restos de disparo
 - 6.7.5. Bases de datos como ayuda en la investigación forense
- 6.8. Investigadores forenses en los tribunales de justicia

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Números de serie; su importancia y recuperación»

TEMA 7. ESTUDIO FORENSE DE HUELLAS DACTILARES

M.^a del Pilar Cornago Ramírez

- 7.1. Introducción
- 7.2. Perspectiva histórica
- 7.3. Piel de fricción, morfología de las crestas papilares
 - 7.3.1. Características de las crestas papilares
- 7.4. Lofoscopia y dactiloscopia .
 - 7.4.1. Topografía de los dactilogramas
 - 7.4.2. Tipos de dactilogramas y simbología
 - 7.4.3. Proceso de identificación
 - 7.4.4. Fórmula dactiloscópica
 - 7.4.5. Dictamen
- 7.5. Tipos de huellas dactilares
 - 7.5.1. Composición y características de las huellas latentes
- 7.6. Búsqueda de huellas dactilares latentes
 - 7.6.1. Identificación de huellas dactilares en cadáveres
- 7.7. Técnicas de revelado de huellas dactilares latentes
 - 7.7.1. Reactivos físicos
 - 7.7.2. Reactivos químicos
 - 7.7.3. Técnicas que no emplean reactivos
- 7.8. Otras huellas como elementos de identificación
- 7.9. Importancia de esta técnica

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Huellas dactilares; sus comienzos en los tribunales de justicia»

TEMA 8. PRUEBAS QUÍMICAS Y ANÁLISIS DE ADN EN EVIDENCIAS BIOLÓGICAS

Soledad Esteban Santos

- 8.1. Introducción
- 8.2. Forma de localizar, recoger y transportar las evidencias biológicas
 - 8.2.1. Localización
 - 8.2.2. Recogida y transporte
- PRUEBAS QUÍMICAS
- 8.3. La sangre en criminología: serología forense
- 8.4. Composición de la sangre
 - 8.4.1. Células de la sangre
 - 8.4.2. Antígenos y anticuerpos
 - 8.4.3. Grupos sanguíneos
- 8.5. Análisis forense de la sangre
 - 8.5.1. ¿Es la evidencia realmente sangre?
 - 8.5.2. ¿Es sangre humana o sangre animal?
 - 8.5.3. ¿A quién pertenece la sangre?
- 8.6. El semen en criminología
 - 8.6.1. Composición del semen
 - 8.6.2. Análisis forense del semen
- 8.7. Otros fluidos corporales
 - 8.7.1. Pruebas químicas para la saliva
- ANÁLISIS DE ADN
- 8.8. El ADN y las ciencias forenses
- 8.9. El ADN desde el punto de vista bioquímico
 - 8.9.1. Estructura del polinucleótido
 - 8.9.2. Estructura del ADN: la doble hélice
- 8.10. El ADN desde el punto de vista biológico
 - 8.10.1. Síntesis de proteínas
- 8.11. Perfil de ADN: técnicas de análisis de ADN
 - 8.11.1. Procedimiento experimental
 - 8.11.2. Estudio estadístico
- 8.12. El ADN mitocondrial en la investigación forense
 - 8.12.1. Aplicaciones del análisis del ADN mitocondrial

8.13. Otras aplicaciones del análisis de ADN

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «El zar Nicolás II y el ADN mitocondrial»

TEMA 9. DROGAS DE ABUSO

M.^a del Pilar Cornago Ramírez

9.1. Introducción

9.2. Qué se entiende por drogas de abuso

9.3. Tipos de drogas de abuso

9.3.1. Clasificación

9.3.2. Descripción de algunas drogas de abuso

9.4. Identificación de drogas de abuso

9.5. Análisis de evidencias físicas

9.5.1. Pruebas de barrido o «screening»

9.5.2. Pruebas de discriminación o confirmación

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURA: «Breve historia de la cocaína»

ANEXO

TEMA 10. VENENOS EN LA TOXICOLOGÍA FORENSE

Soledad Esteban Santos

10.1. Introducción

■ VENENOS: ASPECTOS GENERALES

10.2. Dosis tóxica y dosis letal

10.3. Toxicología forense

10.3.1. Procesos analíticos en toxicología forense

10.4. Características de los venenos

10.5. Tipos de venenos

10.6. Los venenos y la química

10.7. Desintoxicación: antídotos y antagonistas

10.7.1. Antídotos

10.7.2. Antagonistas

10.7.3. Antídoto universal

■ VENENOS ASPECTOS ESPECÍFICOS

10.8. Venenos de origen mineral

10.8.1. Arsénico

10.8.2. Talio

10.8.3. Monóxido de carbono

10.9. Venenos de origen vegetal

10.9.1. Cianuro de hidrógeno: plantas cianogénicas

10.9.2. Otras plantas venenosas

10.10. Venenos de origen animal

10.11. Venenos de origen artificial

10.12. Polonio, un veneno de última generación

10.13. Venenos: nuevas perspectivas

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

LECTURAS: «El caso Lafarge y la difusión del test de Marsh» y «Alan Turing y la manzana envenenada con cianuro»

Bibliografía

Abreviaturas y siglas

PRESENTACIÓN

La ciencia forense tiene un marcado carácter multidisciplinar y dentro del ámbito de los muchos saberes que abarca, la química juega un papel fundamental para llevar a cabo la investigación criminal. De ahí el hecho de que la Química Forense resulte ser una disciplina que, aunque joven, está alcanzando en los últimos tiempos un elevado nivel de desarrollo. Tanto es así, que comienza a formar parte de la mayoría de los planes de estudio de grados en Química, másteres o estudios afines. Además, se trata de una disciplina que muestra de forma evidente y clara la conexión no sólo con gran número de contenidos de química, tanto teóricos como prácticos, sino también con la vida cotidiana; no hay más que pensar en la amplia audición de series televisivas sobre el CSI.

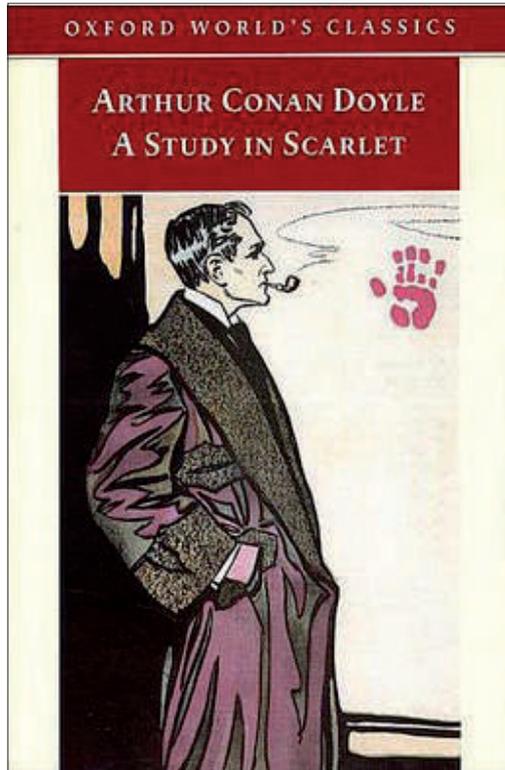
Todas esas conexiones representan, por su parte, una doble ventaja de cara al estudio de la química forense. En primer lugar, porque ésta proporciona unos conocimientos que se pueden aplicar en el mundo del trabajo. En segundo lugar, porque permite adquirir conciencia de la importancia social de la química en particular, y de las ciencias en general. Pese a todo ello, en el mercado bibliográfico no existen muchas obras relativas a esta disciplina y, además, la mayoría de ellas aparecen en lengua inglesa. Todo esto constituye la razón fundamental que nos movió a elaborar este texto, dirigido expresamente a la asignatura del mismo nombre, Química Forense, perteneciente al cuarto curso del Grado en Química de la UNED.

El objetivo primordial de esta obra es, pues, proporcionar una serie de conocimientos básicos que hagan posible continuar estudios posteriores en esta área. No obstante, ante la imposibilidad de abordar todos los aspectos que conciernen a esta disciplina, se han recogido a lo largo de diez temas una serie de contenidos que se han considerado fundamentales para alcanzar el objetivo propuesto. En este sentido, los dos primeros temas son de carácter introductorio. Se ha comenzado ofreciendo, en el tema 1, una panorámica del origen y evolución de la ciencia forense y una revisión general de sus términos y conceptos fundamentales de las tareas

a realizar por el científico forense, resaltando los aspectos químicos más significativos. A continuación (tema 2), se han recogido los métodos analíticos y técnicas instrumentales de mayor relevancia en el ámbito forense, justificando su adecuación a los distintos tipos de evidencias. Los restantes temas se han dedicado al estudio ya particularizado de aquéllas, seleccionando las evidencias que con mayor frecuencia aparecen en delitos y otros sucesos que puedan ser objeto de investigación forense. Así, en el tema 3 se incluyen indicios relacionados con el color, como son pinturas y tintas, implicados en robos o accidentes de vehículos, y en falsificación de documentos, respectivamente. El estudio de fibras textiles, una de las evidencias más comunes en todo tipo de delitos, y también relacionadas con el color, se expone en el tema 4. A continuación, en el tema 5, se analizan otros sucesos que requieren asimismo la actuación del investigador forense para determinar su origen y posible intencionalidad, los fuegos y explosiones (en muchos casos resultado de ataques terroristas). La balística se trata en el tema 6, ya que balas y restos de disparos son indicios presentes en la escena del crimen de la mayor parte de homicidios y otros delitos graves. A las huellas dactilares, un capítulo clásico en ciencia forense, se dedica el tema 7. Seguidamente, en el tema 8, se expone el estudio de restos biológicos mediante ensayos químicos y análisis de ADN, pues si bien este último es llevado a cabo por biólogos o médicos, el fundamento de sus técnicas debe ser conocido por todo químico que se dedique a la investigación forense. El tema 9 se ha dedicado a las drogas de abuso, centrado en pruebas para determinar si en un material sospechoso existen drogas y, en su caso, identificar cuáles son. Se finaliza con el estudio de venenos (tema 10), que aunque no siempre aparezca en obras de este tipo, se ha incluido aquí por representar un interesante campo de estudio forense que, además, ofrece un gran número de conexiones con la química.

En cuanto a la estructura de cada tema, al final de cada uno se ha introducido un apartado con ejercicios de auto comprobación y la resolución de los mismos, y otro con lecturas sobre casos forenses reales relacionados con los contenidos tratados, que no sólo sirven para incentivar su estudio, sino también para afianzar lo aprendido.

LA QUÍMICA EN EL CONTEXTO DE LA CIENCIA FORENSE



Sherlock Holmes, personaje ficticio
precursor de la ciencia forense

Soledad Esteban Santos

OBJETIVOS

General

Analizar el papel de la química dentro de la ciencia forense y, con ello, el trabajo del químico forense, tanto desde la perspectiva de los imperativos científicos como de los legales.

Específicos

1. Enunciar los objetivos perseguidos por la ciencia forense
2. Reconocer el carácter multidisciplinar de la ciencia forense
3. Justificar el protagonismo de la química dentro de la ciencia forense
4. Describir las etapas más significativas en la evolución de la ciencia forense
5. Definir los conceptos de escena del crimen e indicio
6. Diferenciar los distintos tipos de indicios
7. Valorar la necesidad de mantener la cadena de custodia
8. Justificar la importancia del informe pericial en los procesos judiciales
9. Describir el esquema del informe pericial

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Dado el carácter general de este tema, para comprender sus contenidos no son necesarios conocimientos específicos de química.

Tema 1. La Química en el contexto de la Ciencia Forense

- 1.1. Introducción
 - 1.2. La ciencia forense
 - 1.3. Origen y evolución de la ciencia forense
 - 1.4. El laboratorio forense
 - 1.5. Escena del crimen
 - 1.6. Evidencias e indicios
 - 1.7. Estudio de las evidencias: aspectos generales
 - 1.8. La química forense
 - 1.9. Aspectos legales del trabajo forense: cadena de custodia e informe pericial
- Ejercicios y Soluciones
- Lectura: «El caso de Colin Pitchfork y la evolución de la ciencia forense»

1.1. INTRODUCCIÓN

Este texto está dedicado a la química forense, disciplina de tipo eminentemente práctico que forma parte integrante de lo que en conjunto se denomina ciencia forense. Por ello, en este tema, de carácter introductorio, se tratarán una serie de aspectos generales no específicos de la química, sino que son comunes en gran medida al conjunto de disciplinas que constituyen la ciencia forense. Así, es importante conocer qué se entiende como tal, cuáles son sus orígenes, objetivos y conceptos fundamentales y cómo ha evolucionado a lo largo de la historia. Y es en esta evolución donde mejor se puede apreciar el gran protagonismo de la química, ya que los avances en sus teorías y, sobre todo, en sus técnicas, han contribuido en gran manera al progreso de la ciencia forense.

Por otra parte, también se tratarán en este tema algunos aspectos ya más particulares y específicos, correspondientes de forma concreta a la química forense.

1.2. LA CIENCIA FORENSE

La ciencia forense se puede definir, de una forma bastante simple, como aquella disciplina que aplica tanto los conocimientos como las técnicas y métodos científicos a cuestiones relacionadas con aspectos legales. En definitiva, la ciencia forense *es una ciencia al servicio de la ley*. Y los aspectos legales en los que está implicada, bajo ese punto de vista, son muy amplios, desde la resolución de delitos de muy diversa índole al estudio del cumplimiento o incumplimiento de determinadas normas relacionadas con el medio ambiente, con el consumo de alimentos y bebidas o con la salud y seguridad en el trabajo. Ejemplos de estos últimos casos serían los análisis de pesticidas empleados en agricultura, la determinación de la pureza de un agua para beber, la regulación de medicinas, etc. No obstante, y sobre todo en los últimos tiempos, desde el descubrimiento del análisis de ADN, su acción puede extenderse a prestar su contribución en la investigación en otras ramas del saber, como son la historia o la antropología, de lo que serían ejemplos la identificación de restos humanos o el estudio de migraciones de poblaciones humanas.

Sin embargo, la acepción más extendida es la relacionada con los tribunales de justicia, es decir, con el esclarecimiento de delitos (o posibles delitos). Y será a este aspecto al que nos referiremos en este texto.

La ciencia forense más que una disciplina es, en realidad, una ciencia multidisciplinar, ya que buen número de distintas ramas de la ciencia y de la tecnología participan en el trabajo que lleva a cabo. Tales son química, geología, física, biología, patología, antropología, entomología, odontología, psicología, ingeniería o informática, entre otras. Por otra parte, muchas veces existe una confusión entre el trabajo correspondiente a la *ciencia forense* y el de la *medicina forense* (o medicina legal, como a veces se conoce). Pero hay una importante diferencia, ya que el campo de acción del científico forense se extiende a todo tipo de delitos y problemas legales que puedan requerir su aplicación, mientras que la actividad del médico forense queda restringida sólo a aquellos delitos en los que un cuerpo humano, de una manera u otra, está implicado. Así, cuando se trata de un delito grave, como es una violación o un asesinato, puede necesitarse la presencia de médicos patólogos y de cirujanos.

De cualquier modo, la colaboración entre ambos tipos de especialistas, es decir, del médico y del científico forense, es necesaria en muchas ocasiones. Tales son los casos de envenenamiento, en los que el médico patólogo deberá analizar las vísceras del envenenado, así como los síntomas que

presenta su cuerpo, mientras que a su lado deberá trabajar un científico toxicólogo, para analizar los posibles rastros de veneno presentes en el cuerpo de la víctima.

1.2.1. Aspectos etimológicos

En general, al oír la palabra forense podemos pensar en médicos forenses, en algo asociado a muerte y depósito de cadáveres. Pero veremos cómo guarda una relación muy estrecha con aspectos legales, aunque a simple vista no lo parezca. Para entenderlo mejor es interesante acudir a los aspectos etimológicos. La palabra forense viene del término latino *forensis*, adjetivo que significa «perteneciente o relativo al foro». El foro era el lugar donde en la Antigua Roma se discutía, se debatía públicamente y se celebraban los juicios y, tras la presentación de las pruebas y la argumentación, se dictaba el veredicto del caso. Con todo ello, se entiende ya la relación de este término con los aspectos legales.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la ciencia forense se conoce también frecuentemente como *Criminología* o *Criminalística* (aunque para algunos especialistas no sea exactamente lo mismo). Ciencia forense, según definen muchos tratadistas, sería el conjunto de conocimientos especiales que sirven de instrumento eficaz para la investigación del delito y del delincuente. *¿Por qué se llama así?* Porque esa ciencia se aplica a la investigación criminal. Es decir, a la investigación de crímenes. Pero aquí hay que matizar este término y conocer el significado de «crimen». En el lenguaje común se suele entender como un delito en el que parece que debe haber implicada una muerte. No obstante, tiene un sentido más amplio, el de delito grave y, desde el punto de vista legal, es toda conducta, acción u omisión tipificada por la ley que resulta antijurídica y punible.

De ahí el término de criminalística. Y así también se habla de escena del crimen, brigada criminal, investigación criminal, etc.

1.3. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA CIENCIA FORENSE

Aunque, como ya se ha comentado, el campo de acción de la ciencia forense es más amplio, su origen está muy conectado a la medicina forense. Refiriéndose a esta última, tal vez el ejemplo más antiguo nos lo proporcio-

na la historia de Roma, con el asesinato de Julio César (44 a. C.), cuando su médico dictaminó, tras el estudio de la dirección en su cuerpo de las 23 puñaladas que le infringieron, que sólo una de ellas (la segunda que recibió en el tórax), fue la que le produjo la muerte. Pero no será hasta mucho después, a mediados del siglo XVII, cuando la medicina forense se desarrolla como disciplina, consolidándose como tal en el XVIII, cuando los médicos comienzan a tomar parte en los procedimientos judiciales.

Centrándonos ya en la ciencia forense propiamente dicha, su precursora más directa es la disciplina que actualmente se conoce como *dactiloscopia*, ciencia que estudia las huellas dactilares. En Babilonia y en la antigua Persia ya se conocía el carácter único de las huellas dactilares y se hacían registros de las impresiones de los dedos en arcilla como medio de autenticación de una persona. Por otro lado, se sabe que en China, a partir del siglo VI, era costumbre el empleo de las impresiones dactilares como medio de acreditarse en sus negocios, contratos y documentos legales. No obstante, en lo que a la química y a las otras disciplinas científicas forenses se refiere, no será hasta mucho después, en el siglo XIX, cuando comiencen a desarrollarse en ese sentido.

Es curioso el hecho de que mucho de este desarrollo es debido en gran parte a la imaginación de un escritor, el británico **Sir Arthur Conan Doyle** (1859-1930). Fue el creador, a finales del siglo XIX, del famosísimo personaje *Sherlock Holmes*, quien protagoniza sus numerosas novelas policíacas (un total de 68), junto a su inseparable amigo el doctor John Watson. El detective Holmes, minucioso observador y de sólida formación científica, aplica en la resolución de los casos que investiga distintos procedimientos científicos, en los que tenía una sólida formación (huellas dactilares, serología, examen de documentos, estudio de armas de fuego...), y lo hace mucho antes de que la policía los empleara. Así, en su primera novela, *A Study in Scarlet*, publicada en 1887, aplica los métodos de serología (es decir, estudio de la sangre) para descubrir al criminal (imagen de la portada).

Puede afirmarse, pues, que en la ciencia forense la ficción se adelantó a la realidad, como por otra parte ha ocurrido en otros ámbitos de nuestro mundo. Su historia es una larga cadena de distintos personajes que contribuyeron a su evolución y progreso, mejorando los métodos existentes y creando otros nuevos. Aunque muchas figuras quedaron en el anonimato, otras son bien conocidas. Resaltaremos a continuación las más significativas:

- Hay que citar primeramente al médico **Mateu Orfila** (Mateu Josep Bonaventura Orfila i Rotger, 1787- 1853), español de origen, nacido en Menorca, concretamente en Mahón, pero nacionalizado francés. Fue médico forense e iniciador del análisis toxicológico, por lo que se le considera como «padre» de la toxicología (ver en tema 10). Es autor de muchas publicaciones sobre esta materia, encontrándose entre las más significativas los textos *Traité des Poisons ou Toxicologie General* (1813) y *Eléments de Chimie Medicale* (1817). En su vida alcanzó una popularidad enorme no sólo en Francia, sino en toda Europa y no sólo como médico forense, sino que también, digamos a modo de anécdota, por sus grandes dotes como cantante lírico tenía gran éxito en los salones de París (figura 1.1).

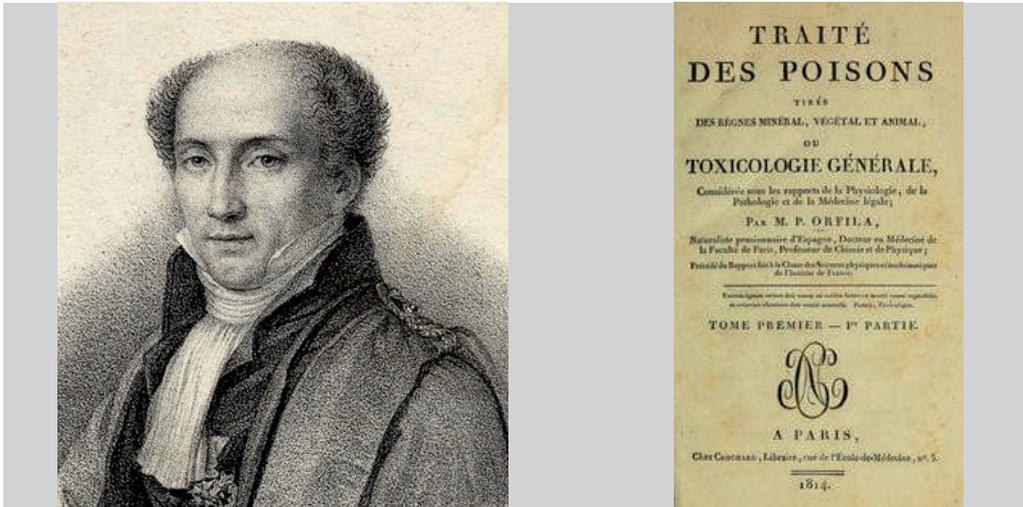


FIGURA 1.1. Mateu Orfila y su texto de toxicología *Traité de Poisons*.

- Un objetivo básico de la ciencia forense siempre ha sido la identificación personal. Un importante paso en ese sentido fue dado por el policía francés **Alphonse Bertillon** (1853-1914), que desarrolló la ciencia de la *antropometría*, basada en la medición de varias partes del cuerpo, sobre todo la cabeza y las extremidades, para tratar de distinguir a un individuo de otro (figura 1.2). Fue utilizada para la identificación de delincuentes durante casi dos décadas, hasta que muy a principios del siglo XX fue sustituida por las huellas dactilares, ya que se observó que eran únicas y características para cada individuo. Los éxitos alcanzados con esta técnica no



FIGURA 1.2. Forma de medir el brazo, según el método ideado por Alphonse Bertillon.

fueron muchos, e incluso tuvo un gran fracaso cuando se encontraron dos personas con el mismo conjunto de medidas, lo cual era debido a la dificultad de conseguir medidas exactas. Pese a resultar así un método no muy fiable, se considera a Bertillon como el «padre de la identificación criminal».

- En cuanto a las *huellas dactilares*, hacia finales del siglo XIX se comenzaron a estudiar y a aplicar en alguna investigación criminal. No obstante, es el británico **Francis Galton** (1822-1911), científico, inventor y viajero, familiar y amigo de *Charles Darwin*, quien desarrolla un modelo estadístico para catalogar las huellas dactilares en ficheros, lo que facilitó enormemente la identificación personal en la investigación forense (ver en tema 7). Su método fue adoptado por Scotland Yard y por todos los departamentos de policía del mundo, continuando vigente hoy en día.
- Otro británico, **Edward Henry** (1850-1931), que mantuvo estrecha comunicación con Galton, gracias a su cargo de Inspector General de Policía en Bengala (India), extendió allí el uso de esta técnica en la investigación criminal. En 1901 volvió a Gran Bretaña, donde estableció el *Metropolitan Police Fingerprint Bureau* y diseñó un método para clasificar huellas dactilares y elaborar catálogos de éstas, a fin de emplearlos como bases de datos. Así, las huellas dactilares del sospechoso se podían comparar con las de delincuentes conocidos, recogidas en esas bases de datos. Introdujo otras importantes innovaciones, como el empleo de perros policías o el de las primeras máquinas de escribir para realizar los registros. Se le considera, pues, como uno de los fundadores de la criminología. Por sus méritos, recibió el título de «Sir», lo mismo que Galton.
- Si bien ya se habían dado todos estos pasos, aún no se habían recogido esas técnicas y procedimientos en un texto único que les diera una visión integradora. Esto fue realizado por el fiscal y juez austriaco **Hans Gross** (1847-1915), autor del primer tratado de ciencia forense, escrito en ale-

mán y traducido después al inglés con el título *Criminal Investigation*. En él resaltó la contribución que determinadas disciplinas científicas, como microscopía, mineralogía, física, química, zoología, antropología o dactilografía, podían prestar a la investigación criminal, detallando las ventajas de cada una de ellas.

- Sin embargo, el tratado de Gross era meramente teórico, ya que no se describía en él ningún procedimiento o técnica como medio de llevar a la práctica en un laboratorio todas esas posibles contribuciones de las distintas disciplinas científicas. Esta labor le correspondió al francés **Edmond Locard** (1877-1966), uno de los pioneros de esta ciencia. Estudió derecho y medicina en la Universidad de Lyon, donde comenzó como ayudante del doctor *Alexandre Lacassagne* (1843-1924), profesor de medicina forense y al que se considera el iniciador de esta disciplina. Con escasísimos medios al principio, Locard empezó a trabajar en un laboratorio de la policía, aunque con un entusiasmo tal que consiguió vencer todas las dificultades iniciales, culminando su labor en el Instituto de Criminalística de la Universidad de Lyon, del que fue fundador y también director. Conocido en todo el mundo del ambiente policial, llegó a ser tan famoso que en su tiempo se le llamó el «Sherlock Holmes francés» (figura 1.3).



FIGURA 1.3. Edmond Locard, pionero de la ciencia forense.

Es también el creador de lo que se conoce como **principio de transferencia de Locard**: *cuando dos objetos entran en contacto uno con otro, habrá entre ellos un intercambio de materia*. Esta teoría lógicamente se hace extensiva a los delincuentes, por lo que si un delincuente entra en contacto con cualquier objeto o persona, se produce ese intercambio de materia, y así *«todo contacto deja un rastro»*, una de las famosas frases de Locard que han quedado como modélicas en el lenguaje policial. Esta idea ha sido el origen de que la investigación de un delito deba comenzar en lo que se conoce como escena del crimen, recogiendo y analizando posteriormente los objetos hallados allí. La teoría de Locard fue confirmada por los éxitos que él mismo alcanzó siguiéndola. Uno de los primeros fue debido a que consiguió condenar a tres sospechosos de falsificación de moneda: hizo analizar su ropa y se encontraron partículas metálicas cuyo análisis demostró estar constituidas por los mismos elementos químicos que las monedas falsas. Por otra parte, su teoría resultó de una enorme utilidad para el Servicio Secreto francés durante la Primera Guerra Mundial, pues le facilitó *«conocer, tras examinar las manchas de los uniformes de los prisioneros y de los soldados, los lugares por los que habían pasado»*.

Locard, asimismo, es autor de varios libros, entre los que hay destacar el *Traité de Criminalistique*, obra de siete tomos que constituye una verdadera referencia en cuanto a la metodología a seguir en criminología.

- En esa misma época, aproximadamente, surge otro pionero de la criminología, el químico suizo-alemán **Rudolf Archibald Reiss** (1875-1929). Fue el primero en crear un programa académico de ciencia forense, fundando en 1909 el Instituto de Policía Científica, perteneciente a la Universidad de Lausana, como centro docente para preparar al futuro personal dedicado a la investigación forense. Además de científico forense, fue profesor y autor de varias obras sobre esta especialidad.
- El médico italiano **Leone Lattes** (1887-1954), profesor del Instituto de Medicina Forense de la Universidad de Turín, pensó que el *grupo sanguíneo* podría ser una vía para identificar a los individuos. Con este objetivo, en 1915 logró desarrollar un procedimiento bastante sencillo para su determinación en manchas de sangre seca, a lo que casi inmediatamente se le encontró una interesante aplicación en criminología.
- Otro importante campo de estudio en investigación criminal es el de las *armas de fuego*. En este sentido, **Calvin Goddard** (1891-1955), coronel de las

Fuerzas Armadas de Estados Unidos, ideó un método para conocer si una bala había sido disparada o no por un arma determinada. Ello exigía comparar esa bala con otra bala-testigo que hubiera sido disparada con dicha arma. Para ello examinaba ambas balas en un microscopio de comparación (ver en temas 2 y 6), una herramienta indispensable en este tipo de estudios.

- Otro importante capítulo de la ciencia forense es el examen de documentos. En este sentido, **Albert S. Osborn** (1858-1946) es autor del libro titulado *Questioned Documents* (figura 1.4), texto que contiene los principios fundamentales para llevar a cabo esta tarea y que, aunque fue escrito en 1910, sigue siendo de gran vigencia hoy en día (ver en tema 3). Todo ello hizo posible la validez de documentos como evidencia científica ante los tribunales.

La lista sería mucho más larga, aunque aquí se ha recogido la mayoría de los más importantes protagonistas de los capítulos fundamentales de la investigación forense. Hay que tener en cuenta, por otra parte, los enormes avances que se han conseguido en tecnología en los últimos 60 años. No obstante, no puede obviarse otro avance importantísimo y bastante reciente, en este caso dirigido a identificar a los individuos:

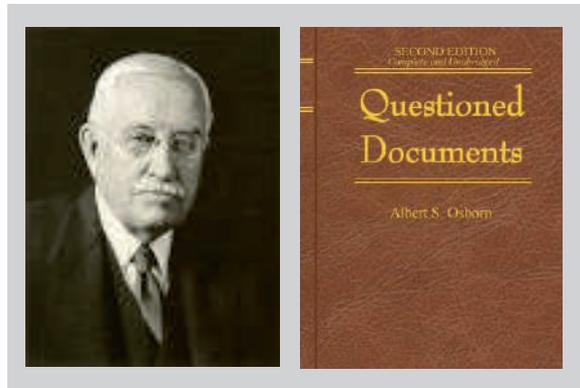


FIGURA 1.4. Albert Osborn y su famoso texto *Questioned Documents*.

- La técnica de análisis de ADN fue desarrollada en 1984 por el genetista británico **Alec Jeffries** (n.1950), mérito por el que le fue otorgado el título de Sir. Muy pronto el análisis de ADN en muestras biológicas tuvo una clara aplicación en investigación criminal para conseguir la *identificación personal*, y además de forma prácticamente inequívoca. Por ello se conoce como *huella genética*. Desde entonces, se han descubierto otras técnicas para analizar el ADN, lo que ha facilitado enormemente la utilización de restos biológicos para este fin (ver en tema 8), suponiendo una verdadera revolución dentro de la ciencia forense.

Los enormes avances en el instrumental y en los métodos para el análisis de muestras, el desarrollo de la tecnología informática y el análisis de huellas dactilares y de ADN, han marcado un viraje y dado un ímpetu radical en la ciencia forense.

1.4. EL LABORATORIO FORENSE

La investigación forense se lleva a cabo en laboratorios especiales, mediante muy diversos métodos y técnicas científicas. Pero, ¿cuándo surgió este tipo de laboratorios, es decir, los laboratorios forenses, y cuál ha sido su evolución? Se considera que el primero de ellos fue el *Laboratorio de Criminalística de Lyon*, ubicado en las dependencias del Palacio de Justicia de esa ciudad y fundado en 1910 por uno de los pioneros de esta ciencia del que ya hemos hablado anteriormente, Edmond Locard. Desde entonces, el instrumental analítico con el que están equipados los laboratorios forenses ha evolucionado enormemente (figura 1.5).

A raíz de esta iniciativa y tras la Primera Guerra Mundial, los laboratorios forenses se extendieron por Europa y Estados Unidos: en Alemania (Dresde, 1915), Austria (Viena, 1923), y en 1925 en Holanda, Finlandia y Suecia. En Estados Unidos el primer laboratorio forense se creó en el Departamento



FIGURA 1.5. Aspecto de un laboratorio forense en la actualidad.

de Policía de Los Ángeles, en 1925, y después fueron apareciendo otros en muchas ciudades. En 1932 la Oficina Federal de Investigación (FBI, *Federal Bureau of Investigation*) ofrecía servicios forenses a todas las agencias jurídicas del país. Actualmente el laboratorio del FBI es el mayor laboratorio forense del mundo, sirviendo de modelo para otros laboratorios estadounidenses a nivel local y para los de muchos países. No obstante, el sistema americano de laboratorios forenses es el de laboratorios independientes (federales, estatales, del condado y de la ciudad), lo que da lugar a que a menudo haya una falta de coordinación.

En cuanto al Reino Unido, el primer laboratorio forense apareció más tarde, en 1935: el de la Policía Metropolitana, en Henden. Sus éxitos pronto llegaron a Scotland Yard, por lo que se promovió la creación de laboratorios regionales para las fuerzas de la policía de todas las áreas de Gales e Inglaterra. En esos momentos estuvieron financiados con fondos del gobierno central y local. Se ha desarrollado así un sistema nacional de laboratorios regionales bajo la dirección de la Home Office gubernamental, por lo que en este caso sí existe una buena coordinación.

A los laboratorios oficiales hay que sumar los servicios de laboratorios forenses independientes, algunos incluidos en departamentos universitarios.

1.4.1. Centros e instalaciones de la Ciencia Forense en España

Actualmente la investigación forense en España depende del *Instituto Nacional de Toxicología y Ciencias Forenses* (INTCF) órgano técnico adscrito al Ministerio de Justicia, al que corresponde su organización y supervisión. Su misión es auxiliar a la Administración de Justicia y contribuir a la unidad de criterio científico y a la calidad de la pericia analítica, así como al desarrollo de las ciencias forenses. Su ámbito de actuación se extiende a todo el territorio nacional. Su sede se encuentra en Madrid y está integrado por tres departamentos, ubicados en Madrid, Barcelona y Sevilla, además de una Delegación del Departamento de Sevilla en Canarias (en Santa Cruz de Tenerife).

Su origen se remonta a 1887, cuando comienzan a funcionar los laboratorios de Medicina Legal en Madrid, Barcelona y Sevilla. En 1911 el laboratorio de Madrid se convierte en *Instituto de Análisis Químico Toxicológico*,

y en 1935 los tres laboratorios iniciales se unen bajo el nombre de *Instituto Nacional de Toxicología*, que en 1967 se reorganiza al crear las secciones de Biología, Histología y Química. En 1971 se pone en marcha el Servicio de Información Toxicológica, adaptándose todas estas instalaciones a la normativa comunitaria en 1987. Las primeras aplicaciones de la tecnología del ADN tienen lugar en 1991 y tres años después, en 1994, se crea la primera *Sección de Drogas de Abuso*. En 1999 el *Instituto Nacional de Toxicología* es admitido como miembro de pleno derecho en el *European Network of Forensic Science Institutes* (ENFSI) y en 2003 se da al Instituto su nombre actual y se incrementan sus funciones.

1.5. ESCENA DEL CRIMEN

A continuación, se hará una revisión de una serie de conceptos y términos propios de la ciencia forense que todo profesional de criminología, sea o no científico, debe conocer en cuanto a su significado y papel en la investigación policial.

Ante todo hay que considerar el *lugar de los hechos*, es decir, el espacio físico donde ha ocurrido un suceso susceptible de ser investigado por la policía. Es lo que generalmente se conoce como **escena del crimen** (o escenario del crimen), escena del delito, del suceso o de los hechos y, a veces, simplemente «escena». Debe tenerse presente que lo que se piensa que es un delito, a veces no lo es. Por ejemplo, el caso de un incendio que resulta haber sido accidental, y no provocado, como en un principio se había pensado. Pero a esta conclusión sólo se habrá podido llegar a través de la investigación policial, en la cual es imprescindible la participación de los científicos forenses (ver en tema 5). O también en un caso de muerte por envenenamiento, por ejemplo, puede ocurrir que éste no haya sido intencionado, sino que haya tenido lugar por accidente. Los resultados de la ciencia y la medicina forense serán fundamentales para determinarlo (ver en tema 10). No obstante, resulte ser o no un delito el caso estudiado, el término de escena del crimen es el más empleado en el lenguaje policial, aunque a veces sería recomendable el de escena del suceso o de los hechos, de acuerdo a la naturaleza de lo investigado.

La investigación forense comienza, pues, en la escena del crimen. Es allí donde se encuentra la mayor parte de los objetos que pueden demostrar,

tras su análisis, que se ha cometido o no un delito y que pueden suministrar una conexión con el autor del mismo, o con el autor y la víctima, si es que la hay. Esos objetos pueden ser portadores de señales fundamentales para saber lo que ha sucedido y cómo ha tenido lugar. En ese caso serán lo que se conoce como evidencias o indicios, de lo que más adelante se tratará con mayor detalle. Por esta razón es fundamental contar con personal especializado en la escena del crimen, que por su entrenamiento y experiencia sea capaz de detectar qué objetos pueden ser considerados como indicios del delito y de recogerlos para su transporte al laboratorio forense, a fin de que allí sean analizados por los científicos forenses.

La detección y recogida de las muestras (posibles indicios) en la escena del crimen se lleva a cabo por equipos de agentes de la policía entrenados para ello y, en general, no es necesaria la presencia del científico forense, cuya labor tiene lugar después, en el laboratorio. Desde el primer momento en que la policía llega al lugar de los hechos, se deben dar una serie de pasos que son imprescindibles para realizar posteriormente una investigación válida:

- *Preservar* la escena, excluyendo de la misma a todas las personas no autorizadas, a fin de proteger toda su área y todos los objetos que contiene, potenciales indicios del delito. Es decir, es necesario aislar y asegurar la escena del suceso.
- Una vez asegurada, se debe *evaluar su área*, determinando sus límites.
- *Destacar* aquellos objetos que puedan llamar la atención como posibles evidencias del delito. Estos objetos deberán ser anotados y fotografiados.
- Se deberá *desarrollar una estrategia* para llevar a cabo de forma sistemática el examen y la documentación de toda la escena del crimen.

Hay que tener en cuenta que el tiempo del que dispone la policía para trabajar en la escena del crimen es limitado, ya que ésta no puede mantenerse aislada indefinidamente. Por ello es necesario registrar la escena en su estado original y los objetos que contiene sin alterar su posición. Para ello, además de la *observación directa* por el personal especializado, éste hará fotografías, bocetos y tomará las notas oportunas con la descripción escrita de la escena. En los bocetos se representarán las dimensiones de

ésta, así como la posición de los distintos objetos. Incluso, se puede hacer posteriormente un boceto más perfeccionado, realizado a escala. En las notas se reflejarán también todos esos detalles del estado de la escena (en este caso por escrito) y, además, cuándo, cómo y por quién una evidencia ha sido encontrada y recogida. Toda esta documentación, además de ser fundamental para llevar a cabo la investigación del delito, puede ser requerida como prueba por los tribunales de justicia.

Por otra parte, cada escena del crimen es particular, es decir, que aunque existan unos planteamientos generales, muchas veces se requiere un tratamiento específico, debido a las características peculiares que aquélla pueda tener. No obstante, hay unos aspectos comunes a tener en cuenta, como son la forma de proteger la escena y de realizar minuciosa y sistemáticamente la búsqueda de indicios.

1.5.1. Protección de la escena del crimen

Las recomendaciones generales a tener en cuenta en lo referente a la protección de la escena del crimen son:

- Si el suceso ha ocurrido en un lugar cerrado (habitación, edificio, teatro, etc.), se habrán de vigilar todas las vías de acceso.
- Si el suceso ha ocurrido en un lugar abierto (campo, casa aislada, etc.), se prohibirá el acceso en un área de al menos 50 m de diámetro.

En definitiva, tanto si la escena del crimen es cerrada o abierta, el acceso a la misma debe quedar prohibido a toda clase de personas ajenas a la investigación. Además, hay que considerar si la escena es única o si existen otros lugares asociados que se deban investigar también.

1.6. EVIDENCIAS E INDICIOS

Anteriormente se ha hecho referencia a indicios y evidencias en cuanto a objetos que se hallaban en la escena del suceso y que podían contribuir a esclarecer un delito, es decir, cómo ocurrió y quién fue su autor. Respecto a la terminología, en inglés se emplea el término de *evidences*, es decir,

evidencias, que en lenguaje policial se ha adoptado también en castellano y que se está imponiendo al de indicio, empleado tradicionalmente. Por ello, en este texto los utilizaremos indistintamente

Indicio o evidencia sería cualquier elemento (objeto, rastro, vestigio, huella...) con el que se puede establecer que se ha cometido un delito o que puede suministrar una conexión entre un delito y su víctima o entre un delito y el que lo ha perpetrado.

No obstante, indicio y evidencia no son totalmente sinónimos. Para muchos autores, una vez que se comprueba que un indicio está íntimamente relacionado con el hecho investigado, es cuando se convierte en evidencia.

En consecuencia, el estudio de los indicios puede contribuir a:

- Identificar al autor del delito.
- Reconstruir cómo se produjeron los hechos.
- Exonerar de culpa a un sospechoso, en determinados casos.

Como decía Locard en una de sus famosas frases: *Los indicios son testigos mudos que no mienten.*

La mayoría se encuentran en la escena del crimen, pero también pueden hallarse fuera de ella. Refiriéndonos a esto último, por ejemplo, a veces se encuentran ciertos indicios del sospechoso en su casa o en sus lugares habituales e, incluso, se pueden hallar objetos relacionados con el delito en sitios completamente ajenos y lejanos (así, una pistola arrojada por el presunto homicida en un río, basurero, etc.). O en los casos de explosiones, frecuentemente se localizan restos lanzados a grandes distancias.

1.6.1. Clasificación de las evidencias

Los objetos que pueden ser constitutivos de evidencias, obviamente, son variadísimos, desde trozos de vidrio o de pintura, fibras de tejidos, cabellos, restos de tela, pólvora, sangre, semen o saliva... hasta huellas de diferente tipo (dactilares, de pisadas, de neumáticos, etc.). Además, pueden ser de gran tamaño, si bien frecuentemente son objetos de dimensiones muy pequeñas e, incluso, a veces aparecen sólo en trazas microscópicas.

Los tipos más comunes de evidencias son:

1. Sangre, semen, saliva y otros fluidos corporales: bien líquidos o secos, impregnando telas o sobre objetos, como en cigarrillos y vasos. Se someten a análisis serológico y de ADN para determinar su origen y la posible identidad del individuo del que proceden.
2. Otros restos biológicos: pelo, uñas, restos de piel, etc.
3. Órganos del cuerpo: en casos de veneno y drogas, para ser sometidos a examen toxicológico (incluye también fluidos biológicos).
4. Materias de origen vegetal: fragmentos de madera, serrín, restos de vegetales, polvo... en ropa, zapatos, etc, que pueden relacionar a una persona con un lugar determinado.
5. Pinturas: restos de pinturas, líquidas o secas, que pueden ser transferidos de la superficie de un objeto a otro cuando se comete un delito, bien como fragmentos de pintura o como manchas (por ejemplo, en colisiones de vehículos).
6. Fibras: cualquier tipo de fibra, natural o sintética, puede demostrar una relación entre personas u objetos.
7. Documentos: cualquier tipo de documento, bien escrito a mano, máquina u ordenador, cuya autenticidad u origen puedan ser sometidos a una investigación. Esto incluye análisis del papel, tinta, escritura, etc.
8. Drogas: sustancias cuyo uso, manufactura, venta o distribución viole la ley.
9. Explosivos: aparatos conteniendo una carga explosiva, así como aquellos objetos movidos por la explosión del lugar de ésta y de los que se sospecha puedan llevar contenidos de explosivo.
10. Armas de fuego y municiones: cualquier arma de fuego, así como munición descargada o intacta, de las que se sospecha están implicadas en un delito.
11. Vidrio: fragmentos o partículas de vidrio que puedan haber sido transferidos a personas u objetos implicados en un delito (incluye también cristales con impactos de disparos).
12. Plásticos, gomas y otros polímeros: restos de los mismos, hallados en la escena del crimen.

13. Restos de pólvora: cualquier objeto que pueda llevar restos del disparo de un arma de fuego.
14. Suelos y minerales: restos de los mismos pueden quedar incrustados en ciertos objetos (como calzado, neumáticos, etc.), con lo que se puede relacionar ese objeto a una persona (el dueño del calzado o del coche, por ejemplo) y a un lugar determinado (de donde proceden ese suelo o esos minerales).
15. Bolsas de plástico: así, las empleadas como bolsas de basura pueden ser importantes en casos de homicidio o de drogas.
16. Huellas dactilares: se incluyen tanto las latentes como las visibles.
17. Impresiones: tales como huellas de neumáticos, de zapatos, de mordeduras en la piel o en alimentos, etc.
18. Marcas de herramientas: se incluye cualquier objeto del que se sospecha pueda contener la impresión de otro objeto empleado como herramienta en un delito. Por ejemplo, en una puerta, pared, etc. puede haber marcas dejadas por un destornillador, una lima o una palanca.

Aunque existen más clases de evidencias, sólo se han incluido aquí las más frecuentes, que se agrupan en tres tipos en función de su naturaleza: evidencias de origen biológico, de origen no biológico y huellas y marcas (tabla 1.1). A los dos últimos tipos se les suele denominar también evidencias físicas.

TABLA 1.1. Clasificación de las evidencias en función de su naturaleza

Evidencias biológicas	Evidencias no biológicas	Huellas y marcas
Evidencias 1 a 4	Evidencias 5 a 15	Evidencias 16 a 18

Por otra parte, si se clasifican por su relación con los hechos investigados, resultan dos tipos de evidencias:

- *Evidencias directas*: Cuando la evidencia apoya la verdad de un hecho de forma directa, sin que se necesite una inferencia o deducción del mismo. Así, el testimonio de un testigo que afirma haber presenciado que el acusado disparó a la víctima.

- **Evidencias indirectas o circunstanciales:** Cuando no hay prueba directa respecto a la comisión de un delito y se requiere un análisis posterior de la evidencia, generalmente a través del trabajo del científico forense. Por ejemplo, pensemos en un caso de homicidio en el que no existe ningún testigo que haya presenciado dicho homicidio (es decir, que haya visto al homicida matando a la víctima), pero sí se encontró un arma en casa de un sospechoso. Entonces, es necesario realizar un análisis completo de esa arma y, de la información que proporcione ese análisis, se inferirá la conclusión de ratificar o descartar a tal persona como sospechoso.

Las evidencias forenses son, en general, circunstanciales, ya que es necesario determinar en el laboratorio sus características, estructura o composición. De cualquier forma, nunca se debe subvalorar la información que los indicios circunstanciales pueden aportar a la investigación de un delito.

1.6.2. Búsqueda sistemática de las evidencias

Según las características de la escena del crimen, la búsqueda sistemática para localizar las posibles evidencias se hará:

- En *lugares abiertos*: se comenzará la búsqueda dirigiendo la vista desde la periferia al centro, en forma espiral hasta llegar al centro mismo del lugar de los hechos, o viceversa, y sin dejar inadvertida ninguna zona.
- En *lugares cerrados*: se comenzará la búsqueda dirigiendo la vista en forma paralela de pared a pared, comenzando por la entrada principal, continuando después con las paredes y muebles, y terminando con el techo.

Se harán constar no sólo los indicios que se hayan encontrado en el lugar de los hechos, sino también los que -según el tipo de suceso acaecido- se supone que deberían estar pero no se encontraron (por ejemplo, si hay señales de disparo, pero no está el arma de fuego).

1.6.3. Selección de las evidencias

El investigador policial experto en la escena del crimen, llevado por su formación y experiencia deberá saber reconocer, seleccionar y recoger

aquellos objetos que considere como más probables portadores de indicios. Lo cual no significa que en determinadas ocasiones no tenga que «improvisar», cuando encuentre algo inesperado en el lugar de los hechos. Por otra parte, debe hacer una selección entre todos esos objetos, ya que el trabajo de laboratorio está limitado en cuanto a personal y a recursos, por lo que no debe sobrecargarse sin necesidad.

Una vez seleccionados los objetos de la escena, bien porque pudieran resultar en sí mismos indicios (como un arma, una herramienta, fragmentos de pinturas...), bien porque pudieran ser portadores de éstos (como un vaso, posible portador de huellas dactilares o de restos de saliva), deberán ser recogidos y envasados convenientemente para enviarlos después al laboratorio forense.

De la forma de recogerlos y embalarlos se tratará más en detalle en el tema 2. No obstante, hay que destacar la importancia de estos procesos, ya que en ellos debe impedirse por todos los medios que los indicios se deterioren o contaminen, por lo que hay que manejarlos con sumo cuidado, evitando que se pongan en contacto con otros, que se rompan o que se pierda parte de ellos. Por esta razón también, y siempre que sea posible, al estudiarlos se procurará trabajar con *ensayos no destructivos*, aunque sea inevitable emplear *ensayos destructivos*, que alteran la evidencia total o parcialmente. Por otra parte, hay pruebas o ensayos que son sólo de *carácter orientativo*, es decir, que dan una idea de que lo que el indicio puede ser, pero que no lo demuestran de forma categórica.

1.7. ESTUDIO DE LAS EVIDENCIAS: ASPECTOS GENERALES

Una vez que las evidencias han llegado al laboratorio, el científico forense debe llevar a cabo con ellos dos tareas fundamentales: caracterización y comparación.

Caracterización

La determinación de las características químicas y físicas del indicio es necesaria para establecer su *identidad* con la mayor certeza posible. Esto último dependerá de lo que permitan las técnicas analíticas empleadas. Por ejemplo, si llega un material de aspecto fibroso, podría tratarse en princi-

pio de fibras o de pelo. En este caso es fácil diferenciar ambas posibilidades mediante un sencillo examen con instrumentos ópticos (como sería su observación a través de un microscopio). Supongamos que el indicio ha resultado estar constituido por fibras y que análisis de éstas ha revelado que se trata de fibras sintéticas, y además, que son de nailon. Pero dentro del nailon existen desde el punto de vista químico distintos tipos (nailon 6 o nailon 66), y dentro de cada uno, las fibras pueden tener diferentes características físicas (color, sección de corte, etc.). Tras un posterior análisis, resultan ser fibras de nailon 6, de color rojo y de sección circular, por ejemplo.

Otro caso podría ser una evidencia consistente en un polvo blanco, del que se sospecha sea droga. Su estudio implica llevar a cabo un análisis cualitativo (y a veces también cuantitativo) para determinar si verdaderamente son drogas y, en caso afirmativo, el paso siguiente sería identificar la sustancia o sustancias del alijo mediante distintas técnicas analíticas. O, supongamos, que se encuentra una mancha y se sospecha que es de sangre: habría que determinar, en primer lugar, si es o no cierta la sospecha y, en caso de que lo fuera, analizar si corresponde a sangre humana o a sangre de algún animal. En residuos de incendios, se buscaría la posible presencia de gasolina. O en los de una explosión, se identificaría la naturaleza de los restos de explosivos.

Comparación

Mediante la comparación o *análisis comparativo*, un indicio y un material de referencia se someten a las mismas pruebas y exámenes a fin de determinar si ambos tienen o no un origen común. En primer lugar se deben seleccionar las propiedades más idóneas a estudiar, según el caso. Así, en el ejemplo anterior de las fibras, supongamos que en la casa del sospechoso se ha encontrado un suéter rojo, y al analizarlo sus fibras son del mismo tipo, color y sección de corte que el indicio. Esto por sí solo no significa que tengan un origen común, pero sí que ese suéter se puede incluir como posible origen del indicio.

En investigación forense otros casos frecuentes de comparación son, por ejemplo, entre dos balas, la encontrada en la escena del crimen y la de la pistola del sospechoso. O entre huellas dactilares.

Al comparar un indicio con una muestra de referencia, cuyo origen es conocido, se trata de *individualizar* dicho indicio para comprobar si ambos

tienen o no el mismo origen. Significa, pues, asignar de forma inequívoca ese indicio a un individuo determinado. Esta sería la etapa final y el objetivo idóneo en el estudio de una evidencia, aunque no siempre se pueda conseguir.

Las limitaciones de la ciencia forense hacen que el asignar a una evidencia determinado un origen común con el de la muestra tomada como referencia sea a menudo imposible. En esos casos, lo que se logra es tan sólo situar la evidencia dentro de un grupo o clase, es decir, se la puede *clasificar*. Por ejemplo, se tiene una muestra de sangre humana de la que se piensa pertenece al individuo que haya cometido el delito y, al analizarla, resulta ser del grupo sanguíneo B y Rh negativo: entonces, el culpable estará dentro del grupo de individuos que tienen ese tipo de sangre, con lo que se puede descartar a los sospechosos que no estén en ese grupo.

Es importante tener en cuenta que las propiedades seleccionadas para la comparación y las técnicas analíticas empleadas dependerán de cada indicio en particular. Cuantas más propiedades se analicen, mayor será el grado de certeza en atribuir a un indicio un origen común con la muestra de referencia. Además, se debe ser muy prudente en las conclusiones y considerar siempre la *probabilidad de coincidencia*. Así, en el caso de huellas dactilares se ha calculado estadísticamente que la probabilidad de que dos individuos tengan las huellas iguales es tan pequeña, que la posibilidad de que coincidan queda prácticamente anulada. Por otra parte, esa probabilidad es también muy baja en los perfiles de ADN, lo que permite la individualización fuera de toda duda de los restos biológicos analizados por esta tecnología (ver en temas 6 y 8).

En los casos referidos a personas, cuando ya los indicios se han individualizado, es decir, se han adjudicado a un individuo en concreto, se emplean los términos «identificar» e «identidad» (por ejemplo, «con los datos de ADN se identificó al culpable» o «se conoció la identidad del culpable a través de sus huellas dactilares»).

Los objetivos del trabajo con las evidencias son, pues, tres: *identificar, clasificar e individualizar*.

1.8. LA QUÍMICA FORENSE

Aunque la ciencia forense es multidisciplinar, como ya se ha comentado, hay que destacar que la química es una de sus más importantes bases, ya que la mayoría de las técnicas y métodos aplicados al estudio de la evidencias son de tipo químico y, además, gran parte del personal de los laboratorios forenses son químicos especializados en este campo.

A través de la química forense se debe analizar cada uno de los objetos que pueden ser constitutivos de indicios, a efectos de ser utilizados ante los Tribunales de Justicia como prueba del suceso tratado. Puede afirmarse con una buena aproximación que se trata de una *química analítica aplicada* a un contexto definido, concretamente a un contexto legal. No obstante, aparte de hacer el análisis cualitativo y cuantitativo propio de la química analítica, el químico forense frecuentemente debe realizar con las muestras que recibe un análisis comparativo (sección 1.4.2.4). Así, supongamos en un caso de atropello de automóvil con resultado mortal y en el que el conductor se ha dado a la fuga, que en la escena del suceso se han encontrado unos pequeños restos de pintura, y que a unos 50 km de distancia aparece un coche abandonado del mismo color que esos restos. Tras el análisis de estos últimos, cabe preguntarse: ¿estos restos de pintura pertenecen a ese coche? No bastaría con analizar la composición y características físico-químicas de esos fragmentos de pintura, sino que habría que compararlos con los de la pintura del coche sospechoso.

No obstante, actualmente esta química analítica dedicada a la investigación forense se suele dividir en dos especialidades: toxicología forense y química forense, propiamente dicha. La *toxicología forense* trabaja con evidencias de tipo biológico, estudiando el rastro de venenos o de drogas dentro del organismo del individuo que los ha ingerido. Por este motivo, a menudo el toxicólogo está implicado en la investigación de casos de muerte, junto al médico forense. Con frecuencia el toxicólogo forense es también químico forense, aunque suele necesitar formación adicional en toxicología o en farmacia.

En cuanto a la *química forense*, se centra en métodos analíticos e instrumentales. El químico forense lleva a cabo su labor en laboratorios forenses, en los que trabaja con indicios físicos. Las muestras que recibe son variadísimas y, además, con gran frecuencia son muy pequeñas o se encuentran sólo en trazas, como ya se ha comentado anteriormente. En

consecuencia, su trabajo es altamente minucioso. Asimismo, el químico forense puede trabajar también con ciertas muestras biológicas, como ocurre en el análisis de una droga o en la determinación de la presencia en sangre de drogas, alcohol, medicamentos, etc., en una persona que pueda haberlos consumido.

1.9. ASPECTOS LEGALES EN EL TRABAJO FORENSE

La tarea del científico forense no se reduce al análisis de los indicios, ni termina con él. Debe cumplir a lo largo de su trabajo una serie de requisitos legales, sin los cuales los indicios que ha analizado quedarían invalidados ante los tribunales. Es decir, debe conocer y estar atento a las exigencias y limitaciones impuestas por éstos. En consecuencia, los métodos y técnicas empleados en el estudio de los indicios no sólo deben estar fundados en unos sólidos principios científicos, sino que deben satisfacer los criterios establecidos por el sistema judicial.

Por esta razón, cada vez que el científico forense lleva a cabo en el laboratorio un análisis de la muestra de un posible indicio, debe dar cuenta de su trabajo por escrito, haciendo una descripción de forma fundamentada de la labor realizada y de los resultados consiguientes, así como las conclusiones extraídas de los mismos.

Pero, ante todo, se debe mantener lo que se conoce como cadena de custodia.

1.9.1. Cadena de custodia

Para que los indicios hallados durante la investigación de un delito puedan convertirse en prueba válida, toda la trayectoria que el indicio ha recorrido, empezando en el lugar donde se ha recogido (generalmente la escena del crimen), continuando con las distintas fases de su análisis en el laboratorio y terminando en su último almacenamiento, debe cumplir la cadena de custodia.

La *cadena de custodia* consiste en un control que se refleja en un documento, a modo de expediente, donde se van registrando la identificación y los nombres, con las firmas correspondientes, de todo el personal que de

forma sucesiva interviene en todo ese recorrido del indicio, desde el comienzo hasta el final; es decir, de todas las personas implicadas en su transporte, almacenamiento y análisis. También tiene que constar en ese documento la descripción del indicio, sus características, forma de conservación, lugar donde se ha encontrado, y otros datos relativos a su traslado, recepción, preservación, almacenamiento y tratamiento. La cadena de custodia es, pues, un documento que permanece con las evidencias todo el tiempo. De esta manera, será más difícil la alteración intencional de las muestras, con lo que se incrementa la fiabilidad de los resultados del trabajo del científico forense para su posterior utilización en un proceso judicial. Esta es una norma legal de estricto cumplimiento, pues garantiza que el indicio analizado en el laboratorio y del que se informa en un juicio, es el mismo que el hallado y recogido en la escena del crimen.

Los *responsables* de cumplir este sistema de control, es decir, la cadena de custodia son todas las personas por quienes va «pasando» el indicio, desde el personal de la escena del crimen a forenses, peritos, policías, personal administrativo... hasta llegar a los fiscales.

Si en algún momento la cadena de custodia se rompiera, aunque los análisis forenses hubieran dado el indicio como válido, no podría ser tenido en cuenta ante los tribunales.

1.9.2. Informe pericial

Este aspecto atañe tan sólo al científico forense que haya llevado a cabo los análisis de indicios. Deberá ser capaz, si así se le requiriese, de presentar y defender sus datos y conclusiones ante un tribunal de justicia. Durante un proceso sobre un delito determinado, el juez debe valorar qué, cómo y por qué han ocurrido los hechos y quién es el responsable. Para ello dispone de una serie de datos, que es lo que se conoce como «pruebas». Y entre ellas, y además de gran valor, se encuentran las aportadas por los resultados de los análisis forenses.

En consecuencia, el científico forense habrá de ser capaz de redactar un informe acerca del trabajo realizado con las evidencias y los resultados y conclusiones a los que ha llegado. Es lo que se denomina *informe pericial*. Aunque oficialmente no existen unas normas concretas para su elaboración, es importante tener en cuenta que debe tener una estructura tal que

resulte escrito de forma metódica, clara y ordenada, y que además implique objetividad en el trabajo y en las conclusiones derivadas del mismo. Es conveniente, pues, seguir un *esquema* que contenga los apartados siguientes:

- **Apartado inicial:** Se hará constar la identificación completa de todas las personas que han intervenido en la prueba pericial, quién la ha ordenado y el objetivo de la misma.
- **Material objeto de la investigación:** Se hará una descripción detallada sobre el material analizado, para lo cual hay que especificar los datos sobre las muestras, el tipo de éstas, cuándo se recibieron, sus envases y el estado de éstos, así como cualquier observación que se juzgue pertinente. Además, se debe señalar el número de registro que lleva asignado cada indicio.
- **Esquema del trabajo realizado en el laboratorio:** Aunque de forma concisa, se detallarán los procedimientos analíticos seguidos, las técnicas empleadas y el fundamento científico del método seguido. Se señalarán asimismo las referencias bibliográficas en las que se ha basado el procedimiento seguido.
- **Resultados y discusión:** Primeramente se expondrán los datos que se han obtenido en los análisis, después se interpretarán. Es importante hacer referencia a la calidad de la muestra, en cuanto al grado de fiabilidad de los resultados obtenidos. Asimismo, en relación a los métodos seguidos su grado de especificidad y de sensibilidad.
- **Conclusiones:** Las conclusiones a las que se ha llegado a través de la interpretación de los resultados deberán redactarse de forma que resulten claras y escuetas, para facilitar su lectura y comprensión.

Tras las conclusiones, el forense deberá ratificar que todo lo presentado, tanto resultados como conclusiones, es fruto del trabajo que ha llevado a cabo en el laboratorio.

- **Referencias bibliográficas:** Se hará constar la bibliografía consultada, tanto las referencias que han servido de base para el procedimiento seguido, como las empleadas para la realización de los análisis e interpretación de los resultados.

Si se juzgase necesario, se pueden incluir anexos con información adicional.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. Explique muy brevemente los distintos métodos de identificación personal empleados a lo largo de la evolución de la ciencia forense.
2. En un piso situado en la planta baja de un edificio de viviendas ubicado en un barrio céntrico de una ciudad se ha encontrado el cadáver de una mujer, con varias heridas de arma blanca y señales de haber sido violada. La puerta de acceso a esa vivienda estaba intacta, pero una ventana que daba a un patio tenía los cristales rotos y con restos de sangre. En el suelo también se encontraron manchas de sangre, fragmentos de cristales y marcas de pisadas, así como restos vegetales, de tierra y de cigarrillos. En la ropa y cuerpo de la víctima había restos de un fluido, que muy probablemente podría ser semen. Indique los objetos que se pueden tomar como posibles indicios, justificando muy brevemente por qué y clasifíquelos atendiendo a su naturaleza.
3. Indique las consecuencias de romper la cadena de custodia, justificándolo muy brevemente,
4. Indique si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas, razonando brevemente la respuesta:
 - a) Todos los objetos que se encuentran en la escena del crimen son indicios.
 - b) Todos los análisis que se llevan a cabo en un laboratorio forense corresponden a posibles hechos delictivos.

Resolución

1. *Antropometría*: estudio de las medidas del cuerpo, sobre todo cabeza y extremidades.

Huellas dactilares: basado en el carácter único de las huellas de las yemas de los dedos.

Análisis de ADN (o huella genética): Se basa en la bajísima probabilidad de que dos personas tengan el mismo perfil de ADN.

2. *Indicios*. Fragmentos de cristales, sangre (en la ventana y en el suelo), restos de posible semen, restos de cigarrillos, restos de vegetales, restos de tierra, marcas de pisadas, posibles huellas dactilares.

Justificación. Muy posiblemente el agresor entró por la ventana, rompiendo los cristales, por lo cual los restos de sangre allí encontrados podrían pertenecer a aquél —en los cristales también podría haber huellas dactilares— las manchas de sangre del suelo podrían ser también del agresor y/o de la víctima habría que confirmar si los restos de fluido eran verdaderamente de

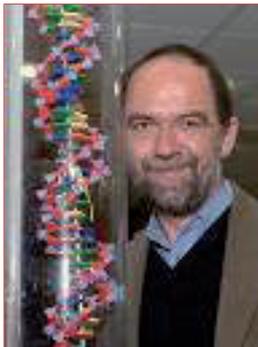
semen —los cigarrillos podrían contener huellas dactilares, así como saliva— los restos vegetales y de tierra no son propios de una ciudad sino del campo, por lo cual pueden dar una pista sobre donde hubiera estado el agresor anteriormente.

Clasificación. Sangre en los cristales y en el suelo, posible semen, posible saliva en los cigarrillos y restos vegetales: indicios biológicos.

Fragmentos de cristales y restos de tierra: indicios no biológicos.

Marcas de pisadas y posibles huellas dactilares en los cigarrillos y en los cristales: huellas y marcas.

3. Si la cadena de custodia se hubiera roto, el indicio quedaría invalidado como prueba en un juicio, aunque los análisis correspondientes hubieran demostrado que verdaderamente se trataba de un indicio.
4. a) *Falso*: no todos serían indicios, ya que muchos de ellos no tienen por qué implicar una conexión con el delito.
b) *Falso*: no siempre, ya que también pueden corresponder a otros temas legales, como los relativos a medioambiente, alimentos, seguridad en el trabajo, o incluso a otros temas ajenos a las leyes, como estudios antropológicos, etc.



LECTURA

«El caso de Colin Pitchfork y la evolución de la ciencia forense»

En el mes de noviembre de 1983 tuvo lugar un delito que conmocionó a la sociedad británica. El cadáver de una muchacha de 15 años fue encontrado en un camino solitario en las afueras de Narborough, pequeña localidad perteneciente al condado de Leicestershire. Los resultados de la autopsia claramente revelaron que la adolescente había sido violada y estrangulada. Como indicio del terrible suceso solamente se consiguió una muestra de semen extraído de la vagina de la víctima, cuyo análisis reveló pertenecer a un individuo de grupo sanguíneo tipo A y factor Rh negativo. En aquellos momentos las técnicas forenses no permitían obtener una mayor información de ese tipo de indicios. Se contaba tan sólo con estos datos, por lo que no se tenían pruebas sólidas para inculpar a ningún sospechoso. En consecuencia, el caso quedó abierto.

Casi tres años después, en julio de 1986, en un bosque próximo a otro pueblo del mismo condado apareció de nuevo una joven muerta, de la misma edad que la anterior y, asimismo, violada y estrangulada. Las muestras de semen dieron resultados análogos a los anteriores, por lo cual casi no habían dudas de que ambos delitos tuvieran el mismo autor. En principio se detuvo a un sospechoso, un joven de 17 años llamado Buckland, que tras los interrogatorios se confesó culpable del segundo asesinato, pero no así del primero.

*Por aquellos días, el genetista **Alec Jeffreys** (en la figura), de la Universidad de Leicester, junto a dos miembros del Forensic Science Service del Reino Unido, había desarrollado una técnica de análisis de ADN, según publicaron en un artículo científico aparecido en 1985. Para continuar la investigación de esos crímenes con esta nueva herramienta, consiguieron muestras de semen de ambos asesinatos y realizaron los correspondientes análisis de ADN para hallar el perfil genético. Los resultados demostraron que las muestras pertenecían al mismo hombre y que, además, no se trataba de Buckland. Se había conseguido así, con esta nueva técnica forense, exculpar a un sospechoso.*

Pero las cosas no se quedaron ahí: la policía, con ayuda del Forensic Science Service, reunió muestras de sangre y semen de más de 5000 hombres de la zona y, tras seis meses de intenso trabajo analizando el ADN en todas esas muestras, se consiguió identificar de forma inequívoca al verdadero culpable. Éste resultó ser Colin Pitchfork, un panadero de una pequeña localidad muy próxima a los lugares de los hechos. Tras admitir su culpabilidad, fue sentenciado a cadena perpetua en enero de 1988.

FUNDAMENTO DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS EN QUÍMICA FORENSE

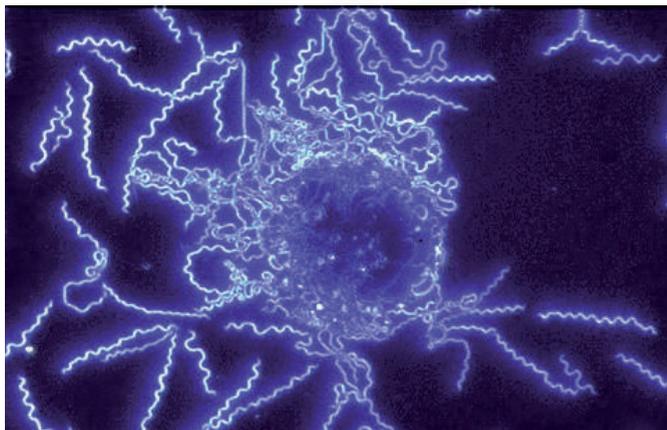


Imagen de restos biológicos obtenida con
un microscopio de campo oscuro

Soledad Esteban Santos

OBJETIVOS

General

Explicar todas las etapas a seguir en el estudio de muestras forenses, desde su localización y recogida en la escena del crimen hasta la finalización de sus análisis en el laboratorio.

Específicos

1. Valorar la necesidad de mantener la cadena de custodia durante todo el proceso de recogida, envío y análisis de muestras.
2. Reconocer la necesidad de evitar la contaminación y el deterioro de las muestras forenses a lo largo de todas las etapas de su estudio.
3. Explicar el fundamento de las técnicas instrumentales más empleadas en ciencia forense.
4. Determinar las aplicaciones más significativas en el laboratorio forense de las distintas técnicas instrumentales.
5. Describir los tipos más importantes de separación cromatográfica.
6. Dentro de cada grupo de técnicas instrumentales analíticas, diferenciar los distintos sistemas y la información aportada por cada uno de ellos.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para el estudio de este tema, es importante conocer el fundamento teórico y las características de las principales técnicas instrumentales de análisis.

Tema 2. Fundamento de los métodos de análisis en Química Forense

- 2.1. Introducción
 - 2.2. Obtención y envío de evidencias desde la escena del crimen
 - 2.3. Recepción de evidencias en el laboratorio
 - 2.4. Estudio preliminar
 - 2.5. Procesos de separación: técnicas químicas y técnicas cromatográficas
 - 2.6. Análisis forense: técnicas instrumentales
 - 2.7. Microscopía
 - 2.8. Espectroscopia. Espectrometría de masas
 - 2.9. Otras técnicas instrumentales
- Ejercicios y Soluciones
Lectura: «Rayos láser»

2.1. INTRODUCCIÓN

La investigación forense debe comenzar en el lugar donde ocurrió el delito o aquellos hechos de los que se sospecha que lo son. Es decir, en el lugar de los hechos o escena del crimen. Por esta razón, es de suma importancia la observación visual de dicha escena y hacer fotografías de la misma, a fin de tener en cuenta la posición de los distintos objetos, del cadáver o cadáveres (en caso de existir) y de todos los restos que pueden ser portadores de indicios. Estos últimos, serán enviados al laboratorio y, una vez analizados allí, podrán servir como prueba ante los Tribunales de Justicia.

No obstante, ya en la misma escena del crimen comienza el proceso de estudio de las evidencias.

■ LAS EVIDENCIAS EN LA ESCENA DEL CRIMEN ■

2.2. OBTENCIÓN Y ENVÍO DE EVIDENCIAS DESDE LA ESCENA DEL CRIMEN

Tras una primera observación de la escena del crimen el investigador forense habrá de seguir todo un protocolo de actuación, pasando por unas etapas sucesivas, que pueden resumirse así:

- Localizar todas las evidencias posibles
- Una vez localizadas, recogerlas
- Embalarlas debidamente
- Cumplimentar un expediente y enviar todo al laboratorio

2.2.1. Localización de evidencias

La localización de evidencias en la escena del suceso delictivo es una pieza clave en la investigación criminal. La búsqueda debe ser exhaustiva, de tal manera que no se desprecie ningún objeto o señal que pudieran aportar pruebas de cualquier tipo. Aunque después alguno de esos objetos no aportara indicio alguno, de entrada no se deberán desechar. Además la búsqueda no deberá dañar ni contaminar ninguno de esos posibles indicios ni interferir en los análisis o ensayos posteriores a los que habrán de someterse.

Generalmente, la búsqueda y recogida de muestras en la escena del crimen es llevada a cabo por miembros especializados de la policía, aunque en algún caso pueden intervenir personal del laboratorio forense. ¿Con qué medios se llevará a cabo la búsqueda?

- Se comenzará por el más sencillo de todos, por un *examen visual*. Se emplearán herramientas que nos permitan ver mejor: tales son mirar con el auxilio de una lupa y, sobre todo, de la luz que nos proporcionan linternas especiales. Es lo que se conoce como *luces forenses*, que emiten luz a distintas longitudes de onda, *visible*, *infrarrojo* y *ultravioleta* y, últimamente, también de *rayos láser*. Además de ser un método sencillo, no contamina los restos ni los destruye, sirviendo para encontrar tanto restos biológicos como no biológicos. En muchos casos se apro-



vecha el hecho de que los componentes de algunos indicios tienen *propiedades luminiscentes*, con lo que absorben unas determinadas radiaciones y reemiten otras de menor energía (generalmente absorben en el rango ultravioleta y emiten en el visible). Tal es el caso de muchas pinturas y tintas y de determinados fluidos biológicos, como el semen.

En este sentido, recordemos que:

La **luminiscencia** consiste en una emisión de radiación lumínica, provocada en condiciones de temperatura normal o baja cuando una cierta forma de energía alcanza un átomo. Esta energía (que puede ser de distinto origen) provoca que determinados electrones sean excitados y que recuperen su estado inicial desprendiendo su excedente energético, con lo que emiten fotones, generalmente de longitud de onda dentro del espectro de la luz visible. Hay muchas clases de luminiscencia, según cuál sea el tipo de excitación: fotoluminiscencia, quimioluminiscencia, triboluminiscencia, termoluminiscencia, electroluminiscencia... (radiaciones electromagnéticas, energía de reacciones químicas, energía mecánica, calentamiento por debajo del rojo, corriente eléctrica...).

La **fluorescencia** es la luminiscencia debida concretamente a la acción de rayos ultravioleta. No obstante, a veces este término es más general, empleándose para denominar el fenómeno por el cual una sustancia absorbe una radiación (generalmente rayos UV, X, gamma o láser) y reemite otra radiación de energía menor que la de la fuente original.

La **fosforescencia** es una luminiscencia que perdura una vez que la excitación ha terminado.

No obstante, en el examen visual no basta con ver, sino que hay que «saber ver». Esto obviamente lo da la experiencia, pero se deben seguir siempre unas normas que ayudarán a todo investigador en sus actuaciones en la escena del crimen. Tales son las formas de examinar ésta, según se señaló en el tema 1 (sección 1.5.2).

- Después, localizados aquellos restos que pueden ser portadores de indicios, en algunos casos cabe realizar *pruebas químicas*, consistentes en reacciones sencillas que se llevan a cabo en la misma escena del crimen, para lo cual existen kits que se transportan fácilmente en maletines. Sobre todo son interesantes para restos biológicos. No obstante, son sólo de carácter orientativo.

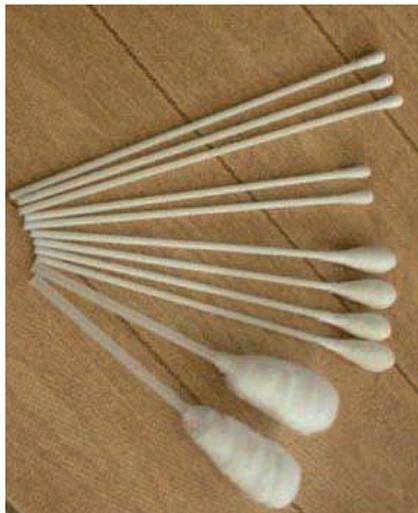


FIGURA 2.1. Hisopos: el hisopo es un instrumento utilizado para recoger muestras y tiene forma de bastoncillo acabado en una punta de algodón.

2.2.2. Recogida de evidencias

Es muy importante saber seleccionar desde la escena del crimen aquellos objetos que puedan resultar útiles para la investigación como posibles portadores de indicios, y no recoger los que no añadan una información muy interesante. De esta manera, se tendrá en cuenta todo aquello que pueda resultar de valor para hacer la futura investigación en el laboratorio, y por otra parte, no se recargará innecesariamente el trabajo del equipo forense del laboratorio con objetos de muy escaso o ningún valor. A veces, incluso, se decide proteger el recinto cerrándolo durante algunos días, por si fuera necesario recoger más objetos en una segunda búsqueda.

Para evitar la contaminación de los posibles indicios se llevarán guantes de goma. Los medios para recogerlos son muy variados, dependiendo de su naturaleza y estado físico. Así, los objetos de mayor volumen (vasos, ropa, etc.) se recogen directamente a mano. Para fragmentos no muy grandes (como trozos de vidrio), se suelen emplear pinzas, o si son ya muy pequeños se pueden recoger sobre cinta adhesiva. Otras veces, para vestigios sumamente pequeños (como pelo, fibras...) se emplean cepillos, peines, hisopos o, incluso, pequeñas aspiradoras, tomándose en este caso lo que se haya depositado en su filtro. Los líquidos se pueden recoger con una pipeta. En otros casos, como por ejemplo, manchas sobre ropa, suele rasparse con un bisturí sobre la mancha, recogiendo lo que se haya desprendido, o se frota ligeramente con un hisopo (figura 2.1) humedecido (caso de las manchas de sangre o semen), o también se corta la parte de superficie que la contenga (como es el orificio de entrada de un disparo). Pero en estos últimos casos, frecuentemente lo mejor es transportar el indicio con el objeto completo que lo contiene. Lo mismo puede decirse para los objetos posibles portadores de huellas latentes. En cuanto a las huellas de mayor tamaño, como pisadas o neumáticos, se toman moldes de las mismas, así como fotografías.



2.2.3. Embalaje de evidencias

Una vez recogidas las distintas muestras, antes de enviarlas al laboratorio se procederá a embalar cada una por separado, a fin de evitar que se contaminen entre sí. El tipo de embalaje dependerá de la clase de muestra, de tal manera que siempre se recoja una cantidad suficiente de ésta y que se evite tanto su contaminación como el que sufra desperfectos físicos (por ejemplo, que se rompa o deteriore). Los envases son muy variados: bolsas de papel o de plástico de distintos tamaños, sobres de papel, recipientes cerrados de vidrio, cajas de cartón, etc. La elección del envase dependerá de la naturaleza y tamaño del indicio y, en su caso, del material que lo soporta.

2.2.4. Expediente de envío

Cada embalaje se sellará y etiquetará. Asimismo, se generará un documento en el que se anotará cada uno de los embalajes etiquetados, expediente que acompañará al envío conjunto de todas esas muestras en su camino al laboratorio.

En los últimos tiempos, se suele contar con *unidades de laboratorios forenses móviles*, que consisten en un vehículo equipado en su interior con todo lo necesario para observar, proteger y fotografiar la escena, y para recoger y empaquetar los indicios, así como con kits de pruebas químicas (figura 2.2).



FIGURA 2.2. Vehículo de laboratorio forense móvil y su interior.

Los distintos indicios requerirán unos procedimientos particulares de detección, recogida y envasado, según la naturaleza de cada uno, que se irán especificando a lo largo de los temas.

■ LAS EVIDENCIAS EN EL LABORATORIO ■

2.3. RECEPCIÓN DE EVIDENCIAS

Al laboratorio forense llegarán las posibles evidencias procedentes de la escena del crimen, y una vez allí, habrán de seguirse de nuevo una serie de pasos sucesivos. Así, antes de proceder a su análisis se requiere llevar a cabo unas operaciones previas de recepción y un estudio preliminar de las muestras.

En primer lugar, se procederá a abrir el envío general y se anotará en un documento cada uno de los embalajes que contiene, añadiendo a los datos de la etiqueta correspondiente un número de referencia y una descripción del embalaje y estado del mismo. Con todo ello, cada tipo de muestra quedará perfectamente registrado. Con todos estos cuidados de carácter burocrático, tanto al embalar las muestras como en su llegada al laboratorio, se conseguirá *no romper la cadena de custodia* (ver en tema 1, sección 1.9.1), requisito imprescindible para que las evidencias aportadas por las muestras, en su caso, puedan ser válidas y tenidas en cuenta como prueba ante un tribunal. Asimismo, durante los sucesivos estudios y análisis se irán anotando los ensayos y pruebas que se lleven a cabo con las muestras, quién se va haciendo cargo de las mismas y los resultados alcanzados, todo lo cual quedará reflejado en un *informe final*. Es fácil comprender, pues, la importancia de seguir debidamente estos requisitos burocráticos.

2.4. ESTUDIO PRELIMINAR

Una vez recibidos y registrados los embalajes, se procederá a su apertura a fin de que posteriormente se analicen las distintas muestras. Pero antes de los análisis hay una serie de pasos intermedios que es necesario llevar a cabo.



En primer lugar, hay que hacer un *estudio preliminar* de los restos recibidos. Se comenzará por el más sencillo: observar de nuevo atentamente cada uno de los restos contenidos en los distintos embalajes, para ir “afinando” en su clasificación y diferenciar así el tipo de análisis a los que se someterá después cada uno. Para esta observación se emplearán de nuevo las luces forenses y, sobre todo, el microscopio. Como éste último tiene aplicación no sólo en el estudio preliminar de los restos que llegan al laboratorio forense, sino posteriormente en la caracterización de los indicios, esta técnica será explicada más adelante.

Con el estudio previo se conseguirá distinguir entre restos parecidos pero no iguales (como fibras y pelo, fragmentos de vidrio y plásticos, restos diferentes de pinturas, tipos de manchas sobre telas, etc.). También, a semejanza de lo que se dijo para la escena del crimen, pueden someterse a algunas pruebas químicas mediante sencillas reacciones que, a modo sólo orientativo, pueden indicar la presencia de determinados vestigios (bastante útil sobre todo para fluidos biológicos y drogas).

En estos momentos ya más o menos se tiene una idea de lo que se va a analizar, pero es necesario preparar antes las muestras para ese análisis. Y esta tarea no es tan sencilla, ya que a pesar de disponer en los laboratorios forenses de herramientas sofisticadas, como son los aparatos de análisis instrumental, hay que recurrir a medios más tradicionales del trabajo cotidiano del químico. Por otra parte, es muy importante tener en cuenta la necesidad de llevar a cabo el estudio de determinados indicios en un medio estéril, a fin de disminuir el riesgo de contaminación de las muestras.

2.5. PROCESOS DE SEPARACIÓN

Hay que considerar que las muestras que llegan al laboratorio son muy variadas: orgánicas o inorgánicas, de origen biológico y no biológico, huellas de distinto tipo, etc. No obstante, las que constituyen objeto de estudio de la química forense son generalmente de tipo orgánico (drogas, muchos venenos y polímeros) y, aunque menos comunes, son también importantes las inorgánicas (tales como metales en ciertos venenos y en restos de disparos y explosiones, vidrio, papel, etc.). Pero en cualquier caso, cuando los indicios a examinar llegan al laboratorio es muy raro que estén puros, y lo más común es que vengan mezclados con otros residuos o incluidos en otro

material o soporte. Pensemos en restos de una bebida o de semen sobre un tejido, manchas de sangre sobre un papel, restos de gases de explosivos o de un incendio sobre materiales porosos.... Así, lo primero que tendrá que hacerse en el laboratorio es preparar la muestra a estudiar: en estos casos, separarla de la mezcla o del soporte correspondiente. Las posibilidades son tantas y la heterogeneidad de los residuos es tal, que no hay una norma general, sino que habrá de aplicarse en cada caso el procedimiento de separación más adecuado.

2.5.1. Técnicas químicas clásicas

En primer lugar, hay que recurrir a técnicas clásicas del laboratorio químico, es decir, a procesos tan básicos como la disolución, la destilación, la extracción o la precipitación.

La **disolución** es necesaria en el caso de indicios soportados, a fin de aislarlos del soporte. Cuando se trata de fragmentos de distintos sólidos (tierra, cristales, pelo...) es convenientes tratarlos con un disolvente para que queden suspendidos y sea más fácil percibirlos. En el caso de líquidos miscibles entre sí, una técnica adecuada en un principio es la **destilación**, si bien en los laboratorios forenses está siendo sustituida por la extracción o la cromatografía. En la primera de ellas, es decir, en la **extracción**, la separación de un componente determinado de la muestra se hace mediante un disolvente que tiene afinidad por dicho componente. Esta técnica se utiliza mucho en **toxicología y análisis de ADN**. En cuanto a la segunda, la cromatografía, algo más adelante le dedicaremos un apartado especial.

La **precipitación**, se emplea sobre todo para separar y detectar distintos elementos metálicos, a nivel sólo cualitativo, en una muestra líquida. No hay más que recordar la «marcha analítica de cationes». Con determinados reactivos se irán separando selectivamente distintos cationes en forma de una fase sólida (el correspondiente precipitado). Es sumamente útil en el análisis de los restos metálicos producidos por disparos.

2.5.2. Técnicas cromatográficas

Las técnicas anteriores presentan dos inconvenientes: que sólo pueden utilizarse cuando se dispone de cantidades apreciables de producto



y que muchas veces no se logra una separación completa. Por ello han sido sustituidas por la cromatografía, con la que se consigue superar esos inconvenientes. La cromatografía, que en realidad incluye un conjunto muy amplio de técnicas, debe su nombre a los términos griegos *chroma*, color, y *graphos*, escribir. Fue el botánico ruso **Mikhail Tsweet** (1872-1919) quien empleó esos términos por vez primera para designar una nueva técnica de separación descubierta por él cuando trabajaba en su Tesis Doctoral. Intentaba separar los pigmentos contenidos en las hojas de unas plantas, sin que resultaran dañados. Tras numerosos ensayos lo consiguió haciendo pasar la disolución de la mezcla de esos pigmentos a través de una columna vertical de vidrio rellena de un material poroso (figura 2.3). Dicho material interaccionaba con los componentes de la mezcla, adsorbiéndolos, aunque con fuerza diferente, de tal manera que los pigmentos se separaban en distintas bandas coloreadas situadas a lo largo de la columna. De ahí el nombre de cromatografía que en 1906 dio Tsweet a su utilísimo descubrimiento.



Figura 2.3.
Cromatografía en columna: separación de pigmentos.

Poco tiempo después otros dos científicos rusos idearon otra forma de colocar el material adsorbente (alúmina en este caso): en lugar de disponerlo dentro de una columna, lo depositaron sobre la superficie de un vidrio plano, formando una fina lámina. Por ello a esta técnica se le dio el nombre de *cromatografía en capa fina*. A partir de entonces fueron surgiendo nuevos tipos de sistemas cromatográficos. Y aunque en realidad son muy variados, tienen en común la siguiente característica: que la separación de los componentes de la mezcla se fundamenta en la distribución de dichos componentes entre dos fases, una *fase fija* y una *fase móvil*. La fase fija, o fase estacionaria, está constituida por un material a través del cual fluye la fase móvil. La función de la fase móvil es arrastrar los componentes de la mezcla, que se separan unos de otros en virtud de su diferente afinidad por el material de la fase estacionaria. Los componentes están sujetos, pues, a la influencia de dos efectos contrapuestos.

- *Retención*: efecto producido sobre los componentes de la mezcla por la fase estacionaria, que puede ser un sólido o un líquido anclado a un soporte sólido.
- *Desplazamiento*: efecto producido sobre los componentes de la mezcla por una fase móvil, que puede ser un líquido o un gas.

• Clasificación general

Hay muchos tipos de cromatografía (que se representan abreviadamente por sus siglas en inglés) y distintas formas de clasificar esos tipos, atendiendo a diversos criterios. Revisaremos los más importantes desde el punto de su aplicación en investigación forense:

1. Según la *disposición de la fase estacionaria*:

- *Cromatografía en columna*: la fase estacionaria se coloca dentro de una columna (es el caso del descubrimiento de Tsweet).
- *Cromatografía plana*: la fase estacionaria se dispone sobre una placa plana o sobre un papel, dando lugar, respectivamente, a:
 - *Cromatografía en capa fina*: ya explicada anteriormente. Se conoce abreviadamente por las siglas **TLC** (del inglés **Thin Layer Chromatography**).
 - *Cromatografía en papel*: es similar a la anterior, con la diferencia de que la fase estacionaria consiste simplemente en una tira de papel filtro (muy poroso). No obstante, sólo tiene valor a nivel cualitativo y en ciencia forense está prácticamente en desuso.

2. Dependiendo de la *naturaleza de la fase estacionaria y de la fase móvil* se pueden distinguir distintos tipos de cromatografía:

- *Cromatografía sólido-líquido*: la fase estacionaria es un sólido y la móvil un líquido.
- *Cromatografía líquido-líquido*: la fase estacionaria es un líquido anclado a un soporte sólido y la móvil también un líquido.
- *Cromatografía sólido-gas*: la fase estacionaria es un sólido y la móvil un gas. En análisis forense se emplea **para mezclas de productos nitrogenados, fosforados o halogenados**.



- *Cromatografía líquido-gas*: la fase estacionaria es un líquido y la fase móvil es un gas. Se emplea mucho en los laboratorios forenses y se designa por las letras **GC** (**G**as **C**hromatography).
3. Según el **tipo de interacción** que se establece entre los componentes de la mezcla y la fase móvil y la estacionaria, se tiene como más importantes:
- *Cromatografía de adsorción*: la fase estacionaria es un sólido polar capaz de adsorber los componentes de la mezcla mediante interacciones de tipo polar. El adsorbente más utilizado es gel de sílice aunque también se emplea alúmina activada.
 - *Cromatografía de reparto*: la separación se basa en las diferencias de solubilidad de los componentes de la mezcla en las fases estacionaria y móvil, que son ambas líquidas (fase estacionaria líquida, anclada a un soporte sólido, por lo general es gel de sílice), por lo que se trata de una cromatografía líquido-líquido.
 - *Cromatografía de intercambio iónico*: la fase estacionaria es un sólido que soporta grupos funcionales ionizables cuya carga se puede intercambiar por los iones presentes en la fase móvil. Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen centros activos con carga electrostática (positiva o negativa). De esta forma, la muestra queda retenida sobre el soporte sólido por afinidad electrostática. Es un proceso que permite la separación de iones y moléculas polares, basado en las propiedades de carga de las moléculas. En el laboratorio forense es muy útil para **grandes proteínas, pequeños nucleótidos y aminoácidos**.

2.5.3. Técnicas cromatográficas en el análisis forense

Como vemos las posibilidades de combinación son numerosísimas, con lo que el número de diferentes tipos de sistemas cromatográficos es muy elevado. No obstante, en los laboratorios forenses las *técnicas más útiles* para resolver problemas analíticos y con mayor número de aplicaciones son tres: la cromatografía de capa fina (TLC), la cromatografía de gases (CG) y la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC).

- En la *cromatografía en capa fina*, **TLC**, los soportes más comunes son alúmina y gel de sílice, aunque a veces se emplean también poliamidas o celulosa, que se coloca sobre la superficie de una placa, generalmente de aluminio o vidrio. La mezcla disuelta se dispone cerca de un extremo de la placa, y ésta se sumerge por dicho extremo en una cubeta que contiene la fase móvil líquida, cuidando de que el nivel de ésta quede por debajo de donde se haya colocado la muestra. La fase móvil va ascendiendo por capilaridad y los componentes se van separando a distintas alturas (figura 2.4). Tiene una serie de ventajas, tales como su rapidez, sensibilidad (puede analizar menos de 100 mg de muestra) y bajo coste. Además, no sólo sirve para separar los componentes, sino que también se pueden identificar éstos si se desarrolla cada uno en otra placa junto con otro material conocido como referencia, del que se sospecha sea el mismo: si ambos recorren la placa hasta la misma altura, podrá afirmarse con gran probabilidad que se trata del mismo compuesto (ver tema 4).

En el laboratorio forense permite trabajar con pequeñas cantidades de mezclas complejas, y tiene aplicación frecuente, sobre todo en análisis de **tóxicos, tintas, fibras y cosméticos**.

- La *cromatografía de gases*, **GC**, es una técnica básica en todos los laboratorios de análisis químico, sean o no forenses, debido a su capacidad de separar mezclas muy complejas en un breve periodo de tiempo (tan sólo unos minutos). Se trata de un sistema cromatográfico líquido-gas, en el que la fase estacionaria es un líquido, situado

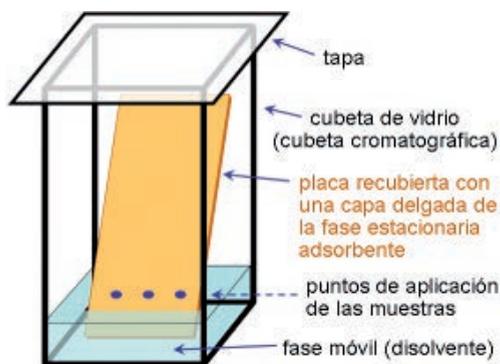


FIGURA 2.4. Cromatografía en capa fina.

en forma de una fina película en una columna de vidrio o de acero, mientras que la fase móvil es un gas (gas portador) que fluye a través de esa columna. La muestra disuelta se inyecta en una cámara de calefacción, donde se vaporiza y en esta forma es impulsada a la columna por el gas portador. La salida de los distintos componentes es recogida en un detector, a través del cual queda registrado en una gráfica, en función del



tiempo, lo que da lugar a un *cromatograma* en el que aparecen una serie de picos correspondientes a cada uno de los componentes. Cada componente emerge de la columna a un tiempo determinado, es decir, a un *tiempo de retención*, característico de cada sustancia, por lo cual éste sería un medio de caracterizar los distintos materiales. Sin embargo, este dato no es un medio absoluto de identificación, por lo que necesita ser ratificado por otras pruebas.

Tiempo de retención (de un constituyente) o t_R : es el tiempo transcurrido desde que se introduce la muestra en el sistema cromatográfico hasta que el momento en que eluye la máxima concentración de dicho constituyente (es decir, momento en que ese constituyente alcance el máximo de señal en el detector).

Como el área de cada pico es proporcional a la cantidad de sustancia, la CG proporciona también resultados cuantitativos, lo que unido a su gran sensibilidad y rapidez, le hace ser un instrumento analítico sumamente eficaz.

- En muchos casos suele acoplarse una *técnica pirolítica*, **PGC** o **Py-GC** (*Pirólisis acoplada a la Cromatografía de Gases*), con el objeto de que pueda aplicarse también al estudio de sólidos que no pueden disolverse. Tal es el caso en los laboratorios forenses de *restos de pinturas, plásticos o fibras*. Se somete la muestra sólida a altas temperaturas, con lo que se descompone en numerosos productos gaseosos, que ya pueden fluir por la columna. A la salida los fragmentos se registran dando lugar a un *pirograma* (es decir, al cromatograma correspondiente), con el cual puede caracterizarse el material pirolizado por comparación con pirogramas de referencia, pertenecientes a otros materiales análogos conocidos. Este procedimiento se emplea muy frecuentemente en el caso de rastros de pinturas.
- La *cromatografía líquida de alta eficacia*, **HPLC** (del inglés **H**igh-**P**erformance **L**iquid **C**hromatography o **H**igh-**P**ressure **L**iquid **C**hromatography) es una variante de la cromatografía líquido-sólido. En este caso la fase estacionaria es un sólido constituido por pequeñas partículas de gran superficie situadas en una columna,

mientras que la fase móvil es un líquido que fluye a través de esa columna con la ayuda de una bomba de alta presión. Esta técnica, que fue introducida en 1964, presenta la ventaja frente a la GC de que puede realizarse a temperatura ambiente, sin necesidad de calentar la muestra. Con ello pueden analizarse productos sensibles a las altas temperaturas. Por ese motivo es muy útil en laboratorios forenses, por ejemplo, para **el análisis de explosivos o de drogas que se descomponen con el calor** (como el LSD). Asimismo hace posible el análisis de muestras que no se volatilizan fácilmente, como son ciertos **azúcares y polímeros**.

- Existe un tipo de cromatografía, la **cromatografía de fluidos supercríticos SFC** (del inglés **Supercritical Fluids Chromatography**), que se aplica a la separación de muestras imposibles de separar por las técnicas de GC y de HPLC. Se emplea cuando los compuestos son térmicamente inestables o no volátiles, por lo que no podrá utilizarse la GC, o resultan imposibles de detectar por HPLC. El instrumental tiene aspectos comunes a los de CG y HPLC, por lo que se considera como una técnica híbrida entre estas dos. La fase móvil más usada en ella es el dióxido de carbono.

Un **fluido supercrítico (SF)** es una sustancia que se encuentra en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico. Por ello, se comportará como un intermedio entre un líquido y un gas; es decir, posee propiedades entre las de un gas y de un líquido. Así, podrá difundir como un gas o disolver sustancias como un líquido. Sus aplicaciones en cromatografía y en extracción (ver en tema 7) van tomando en la actualidad una gran relevancia en investigación forense.

2.5.4. Electroforesis

Es una técnica que a veces se incluye dentro de la cromatografía, ya que separa materiales según sus velocidades de migración sobre una fase sólida estacionaria, situada sobre una placa, como la TLC. En esta electroforesis, **electroforesis en gel (GE)**, se dispone sobre la placa una capa de un gel (normalmente de agar), pero no se emplea una fase móvil, sino que se



aplica una diferencia de potencial eléctrico en el medio estacionario. Esta fuerza es la que impulsará el movimiento de los componentes de la mezcla a separar (figura 2.5). A veces se emplea también, sobre todo en el análisis de ADN, la *electroforesis capilar (CE)*. Estas técnicas están basadas en el principio de que si se introducen dos electrodos en una disolución conductora que contiene partículas cargadas y se comunica una corriente eléctrica, esas partículas cargadas se moverán. La velocidad de su movimiento será proporcional a la carga y la masa de la partícula y a la fuerza del campo eléctrico. Ambos tipos de electroforesis son muy útiles en Bioquímica, por lo que en los laboratorios forenses suelen aplicarse al *análisis de proteínas y de ADN*, como ya se ha mencionado. Ello se debe a que estas biomoléculas poseen cargas eléctricas.



FIGURA 2.5. Cubeta para electroforesis en gel.

2.6. ANÁLISIS FORENSE: TÉCNICAS INSTRUMENTALES

Una vez preparada la muestra se procederá a su análisis. En un laboratorio forense es fundamental la aplicación de técnicas instrumentales (o técnicas físico-químicas) para el análisis de muestras, aunque se empleen también algunas de tipo químico, clásicas en ciencias analíticas (volumetrías, gravimetrías, marchas analíticas, etc.) o ciertas reacciones con carácter orientativo, como ya se ha visto. No obstante, el desarrollo creciente y continuo de las técnicas instrumentales da lugar a equipos cada vez más sofisticados, que proporcionan la obtención relativamente fácil de datos analíticos fiables y exactos, lo que las convierte en herramientas imprescindibles en criminalística. A esto hay que añadir su gran sensibilidad, que permite trabajar con cantidades de muestra muy pequeñas. Son muchas y muy variadas estas técnicas, si bien se pueden considerar como centrales dos clases de instrumentos: los microscopios y los espectrofotómetros en sus distintos tipos, así como determinadas combinaciones de ambos.

Muchas de las técnicas de separación anteriores, las cromatográficas, son también instrumentales y, asimismo, se han mejorado enormemente acoplándolas a otras. De ello es un claro ejemplo el sistema cromatografía de gas-espectrómetro de masas, otra de las herramientas fundamentales en el laboratorio forense.

A continuación, se hará una revisión de los principios básicos y del funcionamiento de las técnicas instrumentales más empleadas en investigación forense, si bien no se profundizará en estos aspectos, ya que ello corresponde a otras asignaturas de contenidos más directamente relacionados con el estudio del análisis instrumental. En consecuencia, se habrá de revisar en la bibliografía correspondiente aquello que el lector estime oportuno, bien porque desee ampliar sus conocimientos o bien porque considere necesario recordar conceptos en parte olvidados. Comenzaremos por la microscopía, a la que ya se aludió en el estudio preliminar de indicios.

2.7. MICROSCOPIA

La utilidad de la microscopía en criminalística va más allá del mero estudio preliminar de las muestras, por lo que se ha incluido aquí la explicación de sus características. Aunque ha ido entrando en competencia con otros métodos instrumentales, durante mucho tiempo fue la «reina» en el laboratorio forense. No hay más que recordar la frase de Locard de que *«los restos microscópicos que cubren nuestra ropa y nuestros cuerpos son testigos mudos, seguros y fieles, de nuestros movimientos y de nuestros encuentros»*, de donde se deduce fácilmente la importancia que daba al uso del microscopio.

Es la técnica que emplea como instrumento el microscopio en sus distintos tipos. La palabra microscopio proviene de los términos griegos *micro*, pequeño, y *scopio*, observar, de lo que se deduce que se trata de un aparato que permite observar objetos muy pequeños, tanto que a simple vista no podrían ser vistos por el ojo humano. Una lente de aumento o lupa ya constituiría un microscopio. El tipo más sencillo fue el *microscopio simple*, que incluía una única lente convexa. No se conoce muy bien el origen de este microscopio, si bien sí que se atribuye a **Zacharias Janssen** (1588-1638), nacido en los Países Bajos en una familia de fabricantes de lentes,



la fabricación de un microscopio con dos lentes, el *microscopio compuesto*. Otro holandés, **Anton van Leeuwenhoek** (1632-1723), introdujo notables mejoras al fabricar microscopios que constaban de lentes convexas, de muy buena calidad y pequeño tamaño, montadas sobre una plancha, con un mecanismo para sujetar el material que se iba a examinar (la muestra o espécimen), lo que ya recuerda algo más al microscopio actual. Hacia 1700 se construyeron microscopios de mayor precisión y que permitían conseguir un gran aumento del objeto observado, colocando una lente inferior, próxima al objeto, que es el *objetivo*, y otra lente superior, muy cercana al ojo del observador, que es el *ocular*. Este tipo de aparatos supuso un gran avance en esta técnica y constituye el fundamento de la mayoría de los microscopios utilizados desde entonces, por lo que se le considera como el modelo del *microscopio óptico común*. Consta básicamente de estos tres sistemas:

- Un sistema óptico, que comprende las partes del microscopio que permiten un aumento de los objetos que se pretenden observar.
- Un sistema de iluminación, que comprende un conjunto de instrumentos dispuestos de tal manera que producen ranuras de luz.
- Un sistema mecánico, constituido por una palanca que sirve para sostener y elevar la muestra a observar.

Otros autores fueron perfeccionando los microscopios y fabricaron variaciones de los mismos que impulsaron su desarrollo y empleo, hasta llegar a los sistemas tan sofisticados como los de hoy en día.

2.7.1. Tipos de microscopios

En la actualidad son muchos los tipos de microscopios, si bien los que más interesan en ciencias forenses son los siguientes: a) Microscopio compuesto; b) Microscopio de comparación; c) Estéreo microscopio; d) Microscopio de luz polarizada; e) Microespectrofotómetro y f) Microscopio electrónico de barrido.

Los cuatro primeros trabajan con luz (microscopios de luz), mientras que el quinto (microscopio electrónico de barrido) lo hace con un haz de electrones.

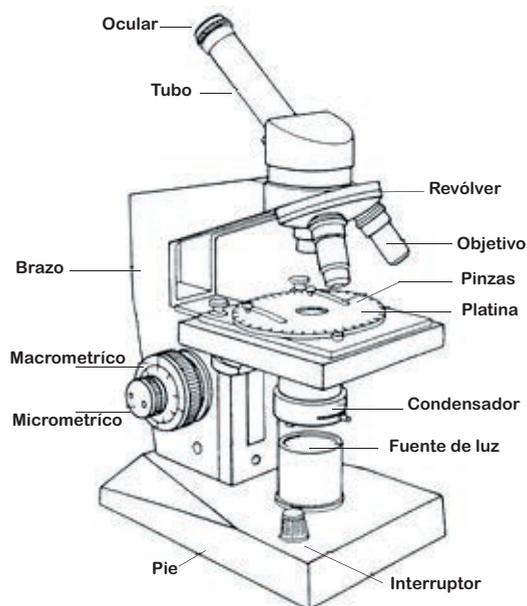


FIGURA 2.6. Esquema de un microscopio compuesto monocular.

• Microscopio compuesto

En la actualidad los microscopios compuestos se construyen con más de dos lentes. De esta forma se logran grandes aumentos. En ciencia forense suelen emplearse aumentos de 40X, 100X, 200X y 450X. Por otra parte, pueden tener un solo objetivo (monocular, figura 2.6) o dos, uno para cada ojo (binocular).

El sistema de iluminación es también muy importante. Cuando el objeto es opaco, la fuente de luz debe estar colocada por encima de él (iluminación vertical). Entonces se dice que es un *microscopio de campo claro*. La imagen que

se ve aparece sobre un fondo brillante. En criminalística se emplea para observar **indicios coloreados**, así como **fibras y cabellos**.

Sin embargo, en el caso de objetos transparentes o translúcidos, la luz se sitúa en la base del microscopio y se dirige hacia arriba, concentrándose sobre el objeto mediante un condensador. La luz traspasa así el objeto transparente, y al observarlo, aparece brillante sobre un fondo oscuro. Por ello se llama *microscopio de campo oscuro*. En el laboratorio forense es muy útil para estudiar fragmentos de **vidrio, plásticos transparentes y células** sin necesidad de teñirlas.

• Microscopio de comparación

Se trata de dos microscopios compuestos combinados en una unidad, conectados mediante una especie de puente con una serie de lentes y espejos y, en su centro, un sistema binocular (figura 2.7).



Son de gran interés en ciencia forense, ya que frecuentemente es necesario comparar simultáneamente la muestra problema con otra de referencia, como es el caso de **estudios balísticos** para saber si dos balas han sido disparadas con la misma arma de fuego.

- **Estereomicroscopio**

Aunque el poder de aumento de este microscopio no es muy alto, tiene la ventaja de que permite visualizar una imagen tridimensional del objeto. En realidad está constituido por dos microscopios compuestos monoculares, dispuestos de tal manera que ofrecen esa imagen en 3D. Es tal vez el tipo de microscopio más empleado en los laboratorios forenses, muy útil para estudiar **pinturas, restos de pólvora, suelos y muchas drogas**. Además, por sus características de amplio campo de visión y gran profundidad permite localizar **trazas de indicios que pueden estar presentes en herramientas, armas, ropas, etc.**, y se puede también aplicar a objetos voluminosos.



FIGURA 2.7. Microscopio de comparación.

- **Microscopio de luz polarizada**

Cuando una luz pasa a través de ciertos tipos de sustancias cristalinas y emerge vibrando en un solo plano, se dice que esa luz está polarizada en un plano. El aparato empleado para producir este fenómeno se llama *polarizador*. Puede construirse así un microscopio de este tipo incluyendo en los anteriores un polarizador entre la fuente de luz y el objeto, de tal manera que la luz que llegue al mismo esté polarizada. Con este tipo de microscopio se estudian materiales que actúan ante la luz polarizada, como son sustancias cristalinas que presentan birrefringencia. Por ello, en el caso del análisis forense

puede estudiarse la **birrefringencia de minerales del suelo**, o la de **muchas fibras sintéticas**, como ayuda para caracterizarlos.

- **Microespectrofotómetro**

EL microespectrofotómetro (**MSP**) no es más que el resultado de acoplar un espectrofotómetro a un microscopio, con lo cual se amplía enormemente las aplicaciones y posibilidades de éste. La absorción de luz por la materia, en lo que se basa la espectroscopía (como se verá más adelante), aporta datos muy valiosos para caracterizar las sustancias. Este microscopio permite obtener los espectros de materiales que están en muy baja proporción. Se podrá así ver el material y al mismo tiempo obtener su espectro de absorción (ya sea visible, IR o UV). Esto es sumamente interesante en criminología, ya que caracterizar evidencias de dimensiones muy pequeñas (*evidencias traza*). Además, se podrán distinguir diferencias de color en materiales que aparentemente son de igual coloración, simplemente haciendo su espectro de absorción en la zona visible. Este hecho tiene una importante aplicación para detectar de una forma rápida y sencilla, por ejemplo, si un billete de dinero es falso, comparando el espectro de su tinta con la de un billete del que se tiene la certeza de que es verdadero.

Otra importante aplicación en investigación forense es en el examen de **pinturas y fibras**. Teniendo en cuenta que cada sustancia tiene un espectro IR propio, haciendo un espectro IR de la muestra en cuestión podrían identificarse las sustancias químicas con las que se ha fabricado, o al menos aproximarse mucho a su composición.

- **Microscopio electrónico de barrido**

Se conoce también como **SEM** (**Scanning Electron Microscope**). En este nuevo tipo de microscopio hay una diferencia fundamental con los anteriores. Todos ellos trabajan con luz, por lo que se llaman también microscopios de luz. Si embargo, en 1931 **Max Knoll** (1897-1969) y **Ernst Ruska** (1906-1988, Premio Nobel de Física en 1986) desarrollan en Alemania un nuevo tipo de microscopio que utiliza un haz de electrones en lugar de luz (es decir, haz de fotones) para enfocar la muestra, consiguiendo aumentos hasta de 100.000X (*microscopio electrónico de transmisión*). Después, en 1942 se desarrolla el *microscopio electrónico de barrido*. En este caso el haz de electrones



de alto voltaje (entre 0,5-30 kV) recorre la superficie del objeto punto por punto, con lo que algunos de esos electrones son rebotados (electrones dispersados) y al mismo tiempo hace que la propia superficie emita electrones (electrones secundarios). Es una técnica capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra, que se visualizan en un monitor, con lo que es muy útil para analizar la **morfología de materiales sólidos de todo tipo (metales, polímeros, restos biológicos, etc.)**. También permite analizar evidencias sumamente pequeñas (evidencias traza), como **esquirlas de pinturas o fragmentos de vidrio**.

Además, cuando el haz de electrones de alto voltaje del aparato choca con una muestra metálica, ésta emite rayos X. Este hecho es muy importante, ya que si estos rayos se analizan y registran con un detector, conducen a la obtención del *espectro de emisión de rayos X* de dicha muestra (ver en sección 2.8.4), lo que permite llegar al análisis elemental de la misma. Por ello, el microscopio electrónico de barrido (SEM) frecuentemente se acopla con un *analizador de energía dispersiva de rayos X* (**EDX, Energy Dispersive X-ray spectrometry**), resultando el sistema acoplado **SEM-EDX**, con el que se pueden detectar los elementos químicos presentes (del carbono al uranio) de manera cualitativa y semicuantitativa (aproximadamente del 0,5% en peso).

Estas características hacen esta técnica muy útil en ciencia forense, especialmente en el estudio de **armas de fuego**, debido a que permite detectar rápidamente los **elementos metálicos plomo, bario y antimonio** que se encuentran presentes en casi todos los detonadores. Cuando se realiza un disparo, suelen quedar restos del mismo en forma de partículas muy pequeñas en la mano o en la ropa del que lo ha efectuado. Así, si los análisis obtenidos con esta técnica señalan la presencia de esos restos en un sospechoso, sería una señal muy importante de su posible culpabilidad.

2.8. ESPECTROSCOPIA

La espectroscopía estudia las interacciones de la materia con las radiaciones electromagnéticas. Cuando la luz incide sobre un objeto, éste es capaz de absorber parte de esa luz. El color del objeto en cuestión se debe

a que ese material ha absorbido unas radiaciones del espectro visible, por lo que refleja otras, precisamente las que corresponden al color que muestra.

Para comprender mejor todo esto, recordemos en primer lugar la naturaleza dual de la luz, como onda (definida cada una por una frecuencia y una longitud de onda determinadas) y como partícula (corriente de fotones).

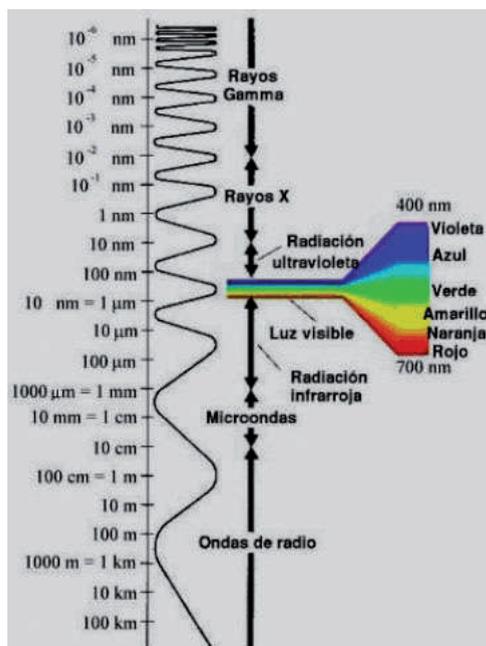


FIGURA 2.8. Espectro de las radiaciones electromagnéticas.

Por otra parte, la luz visible es sólo una parte de las radiaciones electromagnéticas, es decir, del espectro electromagnético (figura 2.8), que abarca desde las ondas de la radio hasta los rayos gamma. Pues bien, lo mismo que la materia absorbe ondas del espectro visible, puede absorber muchas otras radiaciones electromagnéticas y, también, es capaz de emitir las. Este fenómeno de absorción o de emisión de radiaciones electromagnéticas por la materia es el fundamento de la espectroscopía. Fundada a mediados del siglo XIX por los químicos alemanes **Robert W. Bunsen** (1811-1899) y **Gustav R. Kirchoff** (1824-1887), constituye la base de las técnicas más importantes de análisis químico para la identificación de sustancias.

Refiriéndonos concretamente a la absorción, si se mide la cantidad de radiaciones que un material absorbe en función de su longitud de onda o de su frecuencia, se obtendrá un gráfico, el *espectro de absorción* de ese material. Los *espectrofotómetros* son los instrumentos donde se obtienen esos gráficos. En ellos la luz que se dirige sobre la sustancia que se analiza es monocromática.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que cada sustancia absorbe sólo unas frecuencias y no otras. Es decir, absorbe la energía correspondiente a esas radiaciones en función de unos determinados requerimientos energé-



ticos de la sustancia en cuestión. Y la causa de todo ello hay que buscarla, en última instancia, en la estructura íntima de la materia. En consecuencia, los espectros de las regiones ultravioleta (UV), visible e infrarroja (IR) suministrarán datos fundamentales para conseguir la identificación de las sustancias, especialmente de los **compuestos orgánicos**, a nivel cualitativo.

2.8.1. Espectroscopía UV y visible

Los *espectros UV* aportan información sobre la existencia de dobles enlaces y de su conjugación. Sin embargo, como son muy sencillos, no puede deducirse de ellos con certeza la identidad del material que se estudia, por lo que para confirmarla es necesario recurrir a otras pruebas. Tal es el caso, por ejemplo, de la estricnina, que para una estructura tan complicada como tiene (ver tema 10, figura 10.13), su espectro UV resulta muy simple, con tan sólo dos bandas, como puede apreciarse en la figura 2.9. A pesar de ello, en investigación forense a veces resultan ser una herramienta útil, ya que de una forma rápida permiten **descartar o no otros materiales** de los que se sospeche sean el mismo que el analizado. Así, son muy útiles en el análisis de **ciertos venenos y de drogas**. Por ejemplo, si una droga conocida presenta un determinado espectro UV y se tiene un material del que se sospecha que es sólo material de adulteración, puede comprobarse haciendo el espectro UV del mismo: si no coinciden, entonces sabríamos que no se trata de esa droga.

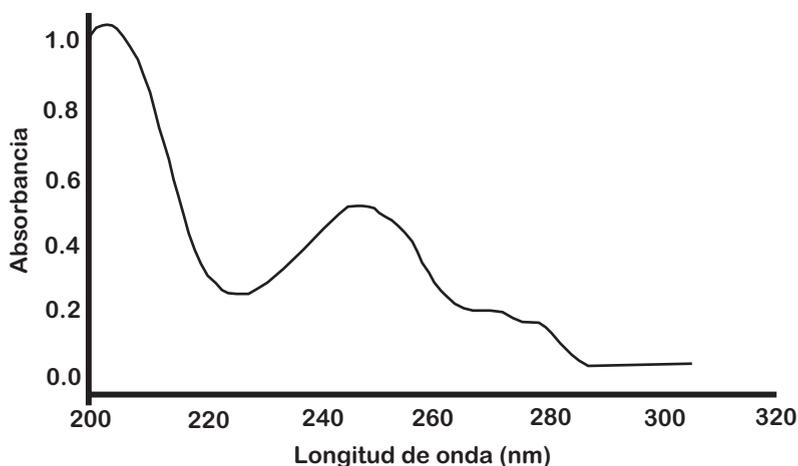


FIGURA 2.9. Espectro UV de la estricnina.

En cuanto a los espectros de la *región visible*, se emplean en el análisis de color, como es el caso de **fibras, tintas o pinturas**. No obstante, tanto los espectros visibles como los UV no se usan demasiado en el laboratorio forense, si bien en los últimos tiempos se han incrementado sus ventajas gracias a su aplicación dentro de la microespectrofotometría (sección 2.7.1).

2.8.2. Espectroscopía IR

Los espectros de la región IR son ya mucho más complicados, presentando gran número de bandas, por lo que en este caso el espectro de una sustancia sí que puede aportar información suficiente para su identificación. En definitiva, el espectro IR es característico de cada sustancia y constituye así lo que puede considerarse como su «huella dactilar». En este sentido, se han realizado miles de espectros IR de compuestos orgánicos, que se han recogido y catalogado, con lo cual se utilizan como referencia para la identificación por comparación de sustancias desconocidas de este tipo. Este método se utiliza frecuentemente en química forense para el **análisis de drogas** y también para el de **fibras**.

La región de las radiaciones infrarrojas más utilizadas en ciencia forense es la del rango medio (número de ondas, de 4000 a 400 cm^{-1} , aproximadamente). Esta técnica ha mejorado sensiblemente sus aplicaciones con el desarrollo de los *espectrómetros infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR)*.

2.8.3. Espectroscopía Raman

La espectroscopia Raman es complementaria de la IR y difiere de ella en que estudia las radiaciones dispersadas en lugar de las absorbidas. Da información interesante sobre los enlaces polarizables existentes en las moléculas. Como es una técnica no destructiva, en ciencia forense está adquiriendo gran utilidad, especialmente en el **análisis de explosivos, drogas, tintes, fibras, pinturas y fluidos corporales**. Para la obtención de espectros Raman se recurre generalmente a los *rayos láser*, con lo que se consigue dirigir hacia la muestra problema una intensa corriente de radiación monocromática. Si desea saber algo más sobre los rayos láser, puede revisarlo en la lectura ubicada al final del tema.



2.8.4. Espectroscopia de emisión Rayos X

Cuando una radiación X o un chorro de electrones interacciona con la materia tienen lugar una serie de fenómenos muchos de los cuales tienen importantes aplicaciones en el análisis químico. Tal es el caso de la espectroscopia de emisión de rayos X (**XES**), ya que si se utilizan electrones de alta energía como fuente de excitación, al chocar con una muestra metálica ésta emitirá rayos X, que una vez detectados y registrados en un analizador, proporcionan el *espectro de emisión de rayos X* de dicha muestra. Esta técnica es muy útil en **balística**.

2.8.5. Otros métodos espectroscópicos

Pueden incluirse otros tipos de *espectroscopia de emisión* (como la visible o la de electrones Auger) y también las técnicas de *luminiscencia*, *fluorescencia* y *fosforescencia*, muy empleadas en la detección de **pinturas**, **tintas** y **fluidos corporales**.

Otro tipo de espectroscopía, la de *resonancia magnética nuclear* (**RMN**), aunque en muchos laboratorios sea una herramienta muy valiosa para la elucidación estructural, no es así en el forense, donde raramente se emplea.

La **fluorescencia de rayos X**, **XRF**, consiste en la emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) por un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o con rayos gama. Este fenómeno es muy utilizado, sobre todo, en el análisis de **metales**, **vidrios** y **materiales cerámicos**.

2.8.6. Espectrometría de masas

Esta técnica, **MS** (del inglés **Mass Spectrometry**), se encuadra a veces dentro de las técnicas espectroscópicas, debido a que genera un espectro del material que analiza, aunque no está relacionado con la energía electromagnética, sino que resulta de la interacción de la muestra (vaporizada) con partículas a gran velocidad, generalmente electrones. El material se ioniza y fragmenta en porciones de distintos tamaños, que son registrados en función de la relación masa-carga de cada uno, obteniéndose un gráfico o *espectro de masas* del material examinado.

Generalmente este instrumento se emplea *acoplado a un cromatógrafo de gases (GC-MS*, cromatógrafo de gases acoplado con un espectrómetro de masas), con lo cual se supera el inconveniente de éste de que no proporciona de forma segura la identificación de sustancias. Al estar ambos aparatos unidos, a medida que un componente sale del CG pasa al MS, a una cámara del mismo donde es bombardeado por electrones de alta energía. El espectro de masas obtenido de ese componente es característico de cada sustancia (como ocurría con el IR), por lo que en este caso es también como su “huella digital” y se puede identificar con él la sustancia en cuestión. Además, este análisis necesita una cantidad de sustancia sumamente pequeña, todo lo cual convierte esta técnica en una de las herramientas clave del laboratorio forense, sobre todo en el estudio de **drogas**.

También suele combinarse el conjunto GC-MS con un ordenador, lo que permite obtener el espectro de masas de numerosísimas sustancias, que quedan almacenadas en la memoria de aquél, para convertirlas en un amplio muestrario de referencias patrón.

2.9. OTRAS TÉCNICAS INSTRUMENTALES

Se han revisado las técnicas instrumentales más usuales en ciencia forense. No obstante, hay otras muchas que también se emplean aunque con menos frecuencia, aportando cada una determinados avances en análisis de muestras, aunque con una información más parcial. Por ello, no nos detendremos en su discusión y tan sólo se mencionarán algunas de las más destacadas:

- **Técnicas ópticas**

Espectroscopias de emisión (como la ya mencionada de rayos X). Refracción de la radiación, como la *refractometría* y la *interferometría*. Dispersión de la radiación. Difracción de la radiación: dentro de esta técnica se encuentra *la difracción de rayos X (XRD)*, herramienta de enorme valor para el estudio de **estructuras moleculares y de sólidos cristalinos** (no hay más que recordar su contribución al descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN). Rotación de la radiación: tal es la *polarimetría* para el estudio de sustancias ópticamente activas.



- **Técnicas térmicas**

Análisis termogravimétrico, para estudiar la estabilidad térmica. Análisis térmico diferencial, sobre todo para la caracterización de polímeros. Métodos de calorimetría de barrido diferencial, para el estudio del envejecimiento de **materiales poliméricos** y para determinar la pureza de **drogas**.

- **Técnicas electroanalíticas**

Potenciometría. Conductimetría. Electrogravimetría. Culombimetría (entre otras). Como ventajas presentan su bajo coste, sensibilidad y ser específicas, lo que hace que se empleen en el laboratorio forense, especialmente para la **detección de metales** en ciertas muestras (por ejemplo, en fluidos biológicos).

- **Técnicas cinéticas**

Muy útiles para la detección de trazas, aplicándose sobre todo para compuestos bioquímicos, sobre todo **enzimas**.

En los últimos tiempos se utilizan con gran frecuencia equipos en los que algunas *técnicas están acopladas entre sí*, de lo que se han expuesto algunos ejemplos. En lo que a la investigación forense se refiere esto presenta grandes ventajas, pues no sólo se logra mejorar su rendimiento, sino también abrir su campo de empleo a un mayor número de aplicaciones.

En este tema se han tratado las técnicas instrumentales que pueden considerarse como básicas en el laboratorio forense. Por ello, a lo largo de los siguientes temas irán apareciendo no sólo estas técnicas, sino además otras que pueden ser empleadas asimismo en el análisis de determinados indicios.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES**Planteamiento**

1. En un laboratorio forense se necesitan analizar los restos de un disparo que pudieran haber quedado en los puños de una camisa del sospechoso, a fin de determinar la posible presencia de determinados metales. De las siguientes técnicas, señale cuál sería la más adecuada: cromatografía de gases; electroforesis; técnica SEM-EDX. *Justifique* su elección.
2. Responder si las siguientes afirmaciones son *ciertas* o *falsas*, justificando brevemente la respuesta:
 - a) En la espectroscopia Raman se estudian las radiaciones absorbidas por la muestra estudiada, cuando se dirige sobre ella un haz monocromático de rayos láser.
 - b) Los espectros UV proporcionan de forma inequívoca y con toda certeza la identidad de una muestra.
 - c) A través de los espectros IR se puede determinar la identidad de una sustancia, a pesar de presentar muy pocas bandas y ser muy sencillos.
3. Han llegado al laboratorio forense las siguientes evidencias: unas esquirlas de pintura, una muestra de tinta, unos fragmentos de plástico, restos de un explosivo y un polvo del que se supone es la droga LSD. Para determinar sus componentes se dispone de las siguientes técnicas: cromatografía en capa fina, cromatografía líquida de alta eficacia, cromatografía de gases acoplada a pirólisis. Indique cuál o cuáles de esas técnicas serían adecuadas al análisis de esos productos. *Justifique* brevemente su respuesta.
4. Acerca de la utilización del microscopio en el examen de distintos indicios, se hacen una serie de propuestas. Señale la correcta, *justificando* la elección:
 - a) Para estudiar fragmentos de un plástico transparente se emplea generalmente un microscopio de campo claro.
 - b) Para analizar el color de una fibra se emplea un microscopio de comparación.
 - c) Para el estudio de minerales del suelo es conveniente el microscopio de luz polarizada.
 - d) Las células pueden estudiarse en un microscopio de campo oscuro, aunque necesitan teñirse previamente.



Resolución

1. Se emplearía la técnica SEM-EDX, consistente en un microscopio electrónico de barrido (SEM) al que se acopla un analizador de energía dispersiva de rayos X (EDX), ya que permite analizar cuali y cuantitativamente las trazas de metales que podrían haber quedado en la camisa tras la detonación del disparo.

La cromatografía de gases no sería adecuada, ya que es una técnica para líquidos o sólidos solubles, que no es el caso de los metales.

La electroforesis sería adecuada para sustancias con partículas cargadas y que habría que disolver previamente a tratarlas mediante esta técnica, que tampoco es el caso de los posibles metales a analizar.

2. a) *Falso* en parte: En la espectroscopia Raman lo que se estudia son las radiaciones dispersadas, pero no las absorbidas, si bien es cierto lo que se indica sobre la forma de iluminación de la muestra.
b) *Falso*: Es necesario confirmar la identidad por otros medios, aunque son útiles para descartar o no una muestra sospechosa.
c) *Falso* en parte: Si bien es cierto que los espectros IR pueden proporcionar datos suficientes para identificar una sustancia, no es cierto que en general sean de aspecto simple ni que presenten pocas bandas.
3. Esquirlas de pintura y fragmentos de plástico: con cromatografía de gases acoplado a pirólisis, PGC, ya que se trata de dos materiales sólidos, no solubles.

Tinta: con cromatografía en capa fina, TLC, ya que se trata de un material líquido, constituido básicamente por un colorante disuelto o suspendido en un disolvente.

Restos de explosivo y posible LSD: con cromatografía líquida de alta eficacia, HPLC, ya que se trata de materiales sensibles a las altas temperaturas y con esta técnica la separación puede hacerse a temperatura ambiente.

4. a) *Falso*: Para materiales transparentes se emplea el microscopio de campo oscuro.
b) *Falso*: El microscopio de comparación se emplea para estudiar dos muestras simultáneamente, la muestra problema y otra de referencia
c) *Cierto*: El microscopio de luz polarizada permite estudiar sustancias cristalinas, como son muchos componentes del suelo
d) *Falso en parte*: Si bien es cierto que en el microscopio de campo oscuro se pueden observar materiales transparentes, caso de las células, no es necesario teñirlas.



LECTURA

«Rayos láser»

*El láser (de las siglas de Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) es un dispositivo que genera un haz de luz coherente (es decir, que sus ondas están vibrando al unísono), monocromática y muy intensa, que puede ser dirigida sobre una superficie muy pequeña. Para hacernos una idea de la gran intensidad de las radiaciones láser, si se enfoca sobre un diamante a áreas del tamaño de la punta de un alfiler pueden hacer en aquél orificios microscópicos. Su inmediato predecesor es el máser, cuyo fundamento fue desarrollado por **Albert Einstein** en 1916, partiendo entre otros conceptos de la ley de radiación de Planck. En 1964 los científicos rusos **Nicolái Básov** y **Aleksandr Prójorov** y el norteamericano **Charles H. Townes** compartieron el Premio Nobel de Física por “los trabajos fundamentales en el campo de la electrónica cuántica”, que condujeron a la construcción de osciladores y amplificadores basados en los principios de los máser-láser.*

El láser tiene multitud de aplicaciones. Todos conocemos, por ejemplo, su empleo en muchos campos de la medicina. Pero también en otros más insospechados: por sus características y por consistir en radiaciones monocromáticas, se utiliza en muchas técnicas espectroscópicas como fuente de luz. En cuanto a la investigación forense, tiene importantes y muy variadas aplicaciones, desde formar parte de técnicas instrumentales más o menos sofisticadas, a otras más simples y no por ello menos interesantes, como son su empleo como luces forenses. En este último aspecto, y debido a que provocan fluorescencia, con luces de rayos láser se logran detectar en muy breve espacio de tiempo huellas latentes o cantidades sumamente pequeñas de indicios que con otras técnicas podrían haber pasado desapercibidos.

Tal fue el caso de un niño que había sufrido una agresión sexual en la casa de una familia integrada por muchos parientes. Con las luces de rayos láser se identificaron en la cama y alfombra de la escena del delito (uno de los dormitorios) restos de semen, un cabello y fibras de un jersey, con todo lo cual se pudo identificar al culpable de forma inequívoca.

INVESTIGACIÓN FORENSE DE PINTURAS Y DOCUMENTOS



Pinturas para coches y documento con letras fluorescentes

Soledad Esteban Santos

OBJETIVOS

General

Distinguir los casos forenses más frecuentes en los que pinturas y documentos aparecen como evidencias y, asimismo, determinar las técnicas analíticas más adecuadas para su estudio, basándose en la composición y propiedades químicas de los diferentes integrantes de dichas evidencias.

Específicos

1. Diferenciar los conceptos de colorante, pigmento y tinte.
2. Distinguir los distintos tipos de evidencias de pinturas.
3. Indicar los componentes fundamentales de las pinturas.
4. Señalar las características de las capas de pinturas de los vehículos.
5. Determinar las técnicas analíticas más importantes para estudiar las evidencias de pinturas.
6. Definir los objetivos más importantes del análisis forense de documentos.
7. Explicar los casos más frecuentes de investigación forense de documentos.
8. Indicar los compuestos más importantes que entran a formar parte de las tintas y del papel.
9. Seleccionar las técnicas analíticas más adecuadas para el estudio de documentos en función de su características físico-químicas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para comprender mejor este tema es conveniente revisar los contenidos correspondientes al espectro electromagnético, especialmente los relativos al visible, así como los conceptos de luminiscencia y fluorescencia.

Tema 3. Investigación forense de pinturas y documentos

- 3.1. Introducción
- 3.2. Colorante, tinte, pigmento
- 3.3. ¿Por qué las sustancias tienen color?
- 3.4. El color en los tintes
- 3.5. El color en los pigmentos
- 3.6. La investigación forense y el color
- 3.7. Pinturas como evidencia: localización, recogida y transporte
- 3.8. Análisis forense de pinturas: composición y técnicas analíticas
- 3.9. Documentos cuestionados: localización, recogida y transporte
- 3.10. Análisis forense de tintas: composición y técnicas analíticas
- 3.11. Tintas invisibles, documentos secretos
- 3.12. Análisis forense del papel: composición y técnicas analíticas
- 3.13. Alteraciones en los documentos
- 3.14. Documentos impresos
- 3.15. Datación de documentos

Ejercicios y Soluciones

Lectura: «Falsificación de papel moneda: un delito más frecuente de lo que pudiera pensarse»

3.1. INTRODUCCIÓN

Este tema se dedica al estudio de la investigación forense de pinturas y de documentos. Pero, ¿por qué se han recogido en un mismo tema? El motivo de ello ha sido la presencia en ambos casos del *color*. Si bien su importancia es fácil de comprender en las pinturas, en los documentos no resulta tan evidente. Sin embargo, si pensamos en la tinta, componente fundamental de los documentos, su relación con el color queda ya manifiesta.

En el caso de las pinturas, los responsables de su color son unos compuestos llamados *pigmentos*, mientras que las tintas deben su color gene-

ralmente a un tipo diferente de compuestos, los *tintes*. Por ello, ante todo dedicaremos un primer apartado a estudiar en qué consisten los pigmentos y los tintes, cuáles son sus diferencias y sus semejanzas y a qué deben el color que exhiben. Todo ello justificado desde una perspectiva química.

■ LA QUÍMICA Y EL COLOR ■

Existen unas sustancias que tienen color y que son capaces además de impartir color a otros materiales. Se trata de los *colorantes*, y dentro de ellos hay que distinguir dos tipos: tintes y pigmentos.

3.2. COLORANTE, TINTE, PIGMENTO

El empleo de estos tres términos, colorante, tinte y pigmento, genera cierta confusión en cuanto al alcance de su significado. El término de colorante es más amplio, ya que abarcaría a lo que tradicionalmente entendemos como *tintes* y también a los *pigmentos*. Ambos materiales son, pues, colorantes, ya que se caracterizan no sólo porque tienen color sino porque además dan color a otros materiales. Sin embargo, responden a conceptos diferentes. Si atendemos al *punto de vista químico*, su diferencia estriba en los siguientes aspectos:

Colorantes: Son materiales que pueden *absorber y emitir energía electromagnética* dentro del rango visible.

Tintes: El color que muestran estas sustancias (generalmente orgánicas) se debe a *cambios en la estructura de sus moléculas* que permiten que la luz visible interactúe con determinados orbitales moleculares de las mismas.

Pigmentos: Son compuestos en los que existen metales, normalmente de transición. En ellos el color se detecta en virtud de un mecanismo diferente al anterior, debido en este caso a *cambios en los orbitales d* de metales que forman parte de su composición.

No obstante, desde el *punto de vista tecnológico* hay también otra diferencia. Teniendo en cuenta que, en ambos casos, para que den color a

otro material han de estar suspendidos o disueltos en un vehículo líquido, resulta que:

Los **pigmentos**, que tanto se utilizan en barnices y pinturas, son normalmente sólidos e *insolubles en el vehículo* con el que se va a dar el color correspondiente (formando una *suspensión*), y la coloración que proporcionan tiene lugar sólo en la superficie sobre la que actúan.

Sin embargo, los **tintes** son *solubles en el vehículo* (resultando así una *disolución*) y en general se emplean para teñir las fibras, teniendo lugar la coloración en toda la fibra, desde su interior (y no sólo en su superficie).

Pero, ante todo, cabe formularse una pregunta fundamental: ¿por qué unas sustancias tienen color y otras no? *La respuesta a esta pregunta la proporciona el conocimiento de la estructura molecular y la teoría del enlace químico*. Es decir, a través de las teorías de química se puede explicar el color de las sustancias.

3.3. ¿POR QUÉ LAS SUSTANCIAS TIENEN COLOR?

Tanto la luz solar como la luz blanca están constituidas por radiaciones electromagnéticas y su espectro se ha dividido en tres regiones: la ultravioleta (UV), la visible y la infrarroja (IR), según se expuso en el tema 2 (figura 2.6). Las radiaciones electromagnéticas se caracterizan porque cada una posee una longitud de onda y una frecuencia determinada. Recordemos que cada radiación tiene una energía, expresada según $h\nu$, siendo ν la frecuencia correspondiente y h una constante (constante de Planck). La relación entre todos estos parámetros es que a *mayor longitud de onda, menor frecuencia y menor energía*. Resulta así que las radiaciones de menor longitud de onda y de mayor energía y frecuencia, son las del UV, y las de mayor longitud de onda y menor energía y frecuencia, son las del IR.

Cuando a un material se le ilumina con luz blanca y es capaz de absorber determinadas radiaciones de la porción visible del espectro de la luz, tendrá color. Precisamente, mostrará el color correspondiente a las radiaciones que no haya absorbido o *color complementario*. Al absorber fotones de esas longitudes de onda de la luz visible, la energía lumínica absorbida excita a algunos electrones a niveles energéticos más altos. En consecuencia, la luz

que emerge de ese material ha perdido la energía correspondiente a los fotones absorbidos, por lo que ya no será blanca. Así, el cloro es amarillo verdoso porque absorbe las radiaciones violetas, y el β -caroteno de la zanahoria absorbe las radiaciones azules y por eso el color que percibimos es naranja.

La causa más común del **color** en la naturaleza consiste en la absorción por parte de la materia de ciertas longitudes de onda de la región visible de la luz blanca, que se encuentran entre 400 y 750 nm ($1 \text{ nm} = 1.10^{-9} \text{ m}$).

En definitiva, algunos electrones serán excitados por esas radiaciones del visible, con lo que saltarán de un orbital a otro de energía superior, produciéndose saltos entre esos orbitales (ya sean atómicos o moleculares), que corresponderán a *saltos energéticos dentro del rango visible*. De esta manera, *absorben* determinadas radiaciones del visible y *reflejan* el resto de ellas.

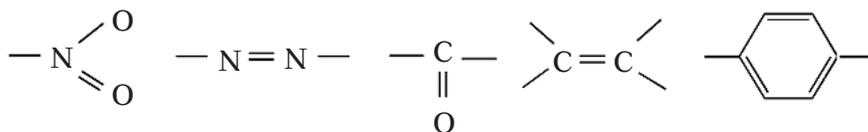
Si una radiación del IR incide en una molécula, como su energía es muy baja sólo será capaz, en general, de provocar alteraciones en los movimientos de rotación y de vibración de los electrones, pero no así transiciones entre niveles energéticos distintos. Sin embargo, las radiaciones del visible tienen ya una energía mayor, por lo que serán capaces de provocar dichas transiciones. En cuanto a las radiaciones UV también provocan saltos electrónicos en las sustancias, pero el ojo humano no está capacitado para detectarlo.

3.4. EL COLOR EN LOS TINTES

Los tintes, como ya se ha dicho, son generalmente *compuestos orgánicos*, por lo que se les conoce también como *colorantes orgánicos*. Desde el punto de vista químico, el establecimiento de la química estructural permitió conocer los grupos atómicos responsables de su color.

3.4.1. Grupos cromóforos y grupos auxocromos

Se observó que el color generalmente aparecía en compuestos orgánicos que contenían grupos con enlaces múltiples, y se les dio el nombre de *grupos cromóforos* (del griego *chroma*, color, y *phoros*, llevar). Tales son:



La intensidad del color suele aumentar con el número de cromóforos de la molécula. Pero para que un compuesto sea un tinte —es decir, para que se una a la fibra y la coloree— no basta con que tenga color. La existencia de grupos cromóforos no es pues suficiente, sino que el compuesto debe tener además propiedades ácidas o básicas que le darán capacidad de reaccionar con las fibras de naturaleza química opuesta. Este carácter viene determinado por otros grupos presentes en la molécula, pero que en sí mismos no son cromóforos. Se trata de lo que se llamó *grupos auxocromos* (del griego *auxein*, aumentar), que pueden ser así ácidos o básicos, tales como:

Ácidos grupo fenol ($\text{C}_{\text{aromat.}}-\text{OH}$), grupo carboxilo ($-\text{COOH}$), grupo sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$)

Básicos $-\text{OH}$, $-\text{OR}$, $-\text{SH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{NRR}'$, $-\text{X}$ (halógeno), etc.

3.4.2. La causa del color en los tintes

Como la energía de las radiaciones del visible no es demasiado alta, los electrones excitables han de tener cierta movilidad. En las moléculas orgánicas los electrones π de los dobles enlaces la tienen, aunque no lo suficientemente grande. Por esta razón, es necesaria la existencia de más enlaces dobles en el grupo cromóforo de la molécula y que además estén *conjugados*. Como ejemplo, veamos esta cadena de carbonos:



De esta manera los electrones π se pueden mover a lo largo del sistema conjugado, con lo que su movilidad es mayor. Es decir, que se trata de electrones deslocalizados, por lo que dan lugar a formas resonantes.

Por otra parte, en los grupos *auxocromos* existen átomos con pares de electrones sin compartir (electrones n), que también se deslocalizan a lo largo de este sistema conjugado. Es decir, que refuerzan ese efecto de movilidad, contribuyendo a una mayor deslocalización electrónica, ya que aumentan la conjugación y con ella la movilidad de los electrones. En consecuencia, esos electrones ya son capaces de absorber radiaciones de energía y frecuencia aún más bajas, como son las radiaciones correspondientes al color rojo, y se dice que intensifican o exaltan el color:



El que una molécula de color sea un tinte requiere, pues, desde el punto de vista químico, *dos condicionantes*: a) que tenga grupos cromóforos, que dan lugar a que tenga color, y b) que posea además algún grupo auxocromo, para que pueda reaccionar químicamente con la fibra a teñir. Así en la figura 3.1 aparecen tres derivados del naftaleno: el compuesto A es incoloro (no hay grupos cromóforos), el B ya es amarillo débil (dos grupos cromóforos, NO₂) y el C es amarillo fuerte y el único tinte de todos ellos, llamado *amarillo Martius* (dos grupos cromóforos, NO₂, y un auxocromo, OH).

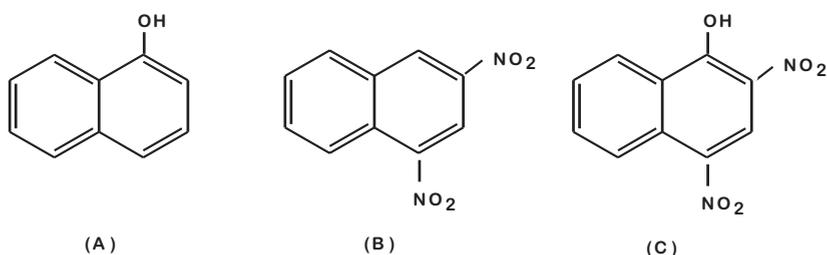


FIGURA 3.1. Acción de los grupos *cromóforos* y *auxocromos*.

3.4.3. Clasificación de los tintes

Desde el Neolítico las poblaciones humanas comenzaron a dar color a sus ropas con ciertos productos obtenidos de animales y plantas. Eran los

tintes naturales (índigo, púrpura, pastel...) que se emplearon hasta mediados del siglo XIX, en que fueron sustituidos por los *tintes sintéticos*, es decir, obtenidos en un laboratorio mediante reacciones químicas. Comenzó esta nueva etapa cuando en 1856 el químico inglés **William Henry Perkin** (1838-1907) sintetizó por azar el tinte *mauveína* (llamado así a causa de su color malva, «mauve» en francés). Este descubrimiento abrió paso rápidamente a una poderosa industria que produjo un gran número de tintes de características y colores muy diversos. Dada la enorme variedad de los tintes, tanto por sus propiedades como por su estructura química, es muy difícil realizar una clasificación completa de los mismos. Por ello, se han adoptado distintos criterios de clasificación. Así:

- En cuanto a sus propiedades *ácidas* o *básicas*. *Tintes ácidos*: nitrofenoles y compuestos con grupos ácidos carboxílicos o sulfónicos. *Tintes básicos*: contienen grupos amino.
- En cuanto a su *estructura química*: Es sumamente variada, por lo que la clasificación según este criterio es muy compleja. Se dividen en: nitrosocolorantes, nitrocolorantes (como el *amarillo Martius*, figura 3.1 C), tintes derivados de la ftalocianina, tintes de diarilmetano, de triarilmetano, de xanteno, de difenilamina, heterocíclicos, azoicos, del grupo del índigo, del grupo de la antraquinona, de azulre... (figura 3.2).

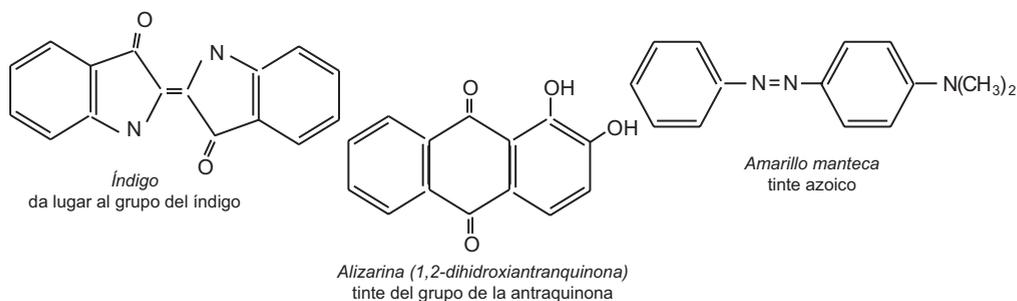


FIGURA 3.2. Estructura de algunos tintes.

Desde el punto de vista forense interesa especialmente el grupo de los *tintes azoicos* debido a su frecuente relación con determinados análisis forenses, por lo que le dedicaremos el siguiente apartado:

Tintes azoicos

En 1856, el químico alemán **Peter Griess** (1829-1888) descubrió las *sales de diazonio*. Estas sales, que en sí mismas no tenían ningún valor como tintes, eran muy inestables y de muy difícil manejo. Pero, a pesar de ello, Griess logró trabajar con estos productos y comprobó que podían unirse rápidamente a fenoles y aminas aromáticas (reacción llamada de «acoplamiento»), dando entonces lugar a tintes sumamente eficaces. Este hecho abrió otra nueva gama de tintes, tal vez la más importante y extensa, la de los *tintes «azo»* o *azoicos*. (figura 3.2).

En química forense este tipo de reacción es el fundamento del llamado «test de Griess» para la detección de explosivos comunes.

El *test de Griess* se basa precisamente en este tipo de reacciones. Se emplea para detectar restos de disparos o explosivos intactos (ver temas 6 y 7) y, si es positivo, al final se forma un colorante azoico de color rojo.

3.5. EL COLOR EN LOS PIGMENTOS

Los pigmentos también son sustancias con color, y éste se debe a que, como ya se ha dicho, son compuestos en los que existen metales de transición. En este caso el color está relacionado con la estructura electrónica de estos metales, concretamente con la existencia de *electrones y orbitales d*. Entre esos niveles energéticos hay una separación tal que se pueden producir transiciones electrónicas compatibles con la absorción de longitudes de onda dentro de la región del espectro visible.

3.6. LA INVESTIGACIÓN FORENSE Y EL COLOR

El color tiene gran interés en la química forense. En *primer lugar*, como característica de determinados indicios. Tales son en los restos de pinturas o de fibras teñidas (de ropas, alfombras, etc.). Además, en la investigación de documentos o de falsificación de moneda en billetes es fundamental el análisis de tintas, ya que en la composición de éstas los colorantes están siempre presentes.

Y en *segundo lugar*, en el mismo análisis forense. Así, gran número de tests para la detección de sangre, semen y, sobre todo, drogas y explosivos (como el de Griess, ya mencionado), están basados en reacciones en las que puede haber un cambio de color, debido a la formación de un colorante orgánico.

■ INVESTIGACIÓN FORENSE DE PINTURAS ■

Las pinturas dan lugar a las evidencias más frecuentes en los laboratorios forenses. Cuando se trata de esquirras de pinturas, caso más general, corresponden a lo que se conoce en términos forenses como *evidencias trazas*, debido a que tienen unas dimensiones muy pequeñas (como es también el caso de indicios de vidrio o de fibras). Examinaremos cómo son los evidencias de pinturas, los tipos de delitos de donde provienen y la forma de analizarlos.

3.7. PINTURAS COMO EVIDENCIA

Los sucesos delictivos en los que se generan indicios de pinturas son, en primer lugar, aquéllos en los que están implicados vehículos, como son choques y atropellos (sobre todo, cuando el conductor se da a la fuga), y también robos en cajas de seguridad o en viviendas y locales en los que se ha forzado la puerta de acceso. Tanto en unos casos como en otros se generan pequeños fragmentos de pinturas. Pensemos, por ejemplo, en un atropello, donde es muy probable que esquirras de la carrocería del coche queden en el lugar de los hechos y en las ropas de la propia víctima. O en un robo en el que se ha abierto la puerta de entrada de una casa haciendo palanca con una herramienta (lima, palanqueta, etc.): fragmentos de pintura pueden haber quedado en la herramienta y en la ropa del ladrón e incluso en la suela del su calzado si han caído al suelo y las ha pisado. Pero en los atropellos o en choques de vehículos, además de pequeños fragmentos de pintura, frecuentemente se originan otra clase de evidencias, las manchas producidas por la pintura de la chapa, a causa de la fricción.

Todas estas evidencias corresponden a pinturas que ya están secas. No obstante, si la pintura está aún fresca puede producir otro tipo de indicios,

consistentes en distintos tipos de huellas. En este sentido, el contacto de las manos con una superficie recientemente pintada originaría huellas latentes, que quedarían impresas en ella (huellas dactilares o incluso palmares, ver en tema 7). Una pintura fresca derramada en el suelo daría lugar a huellas de pisadas o de neumáticos, según el caso. Asimismo, pueden quedar manchas de pintura fresca en la ropa.

En casi todos estos ejemplos se habrá producido una transferencia de materia (de pintura, en estos casos) con la que se puede establecer una relación entre el delito y el posible autor del mismo, de acuerdo con el principio de transferencia de Locard de que todo contacto deja un rastro (ver en tema 1).

3.7.1. Forma de localizar, recoger y transportar las evidencias de pinturas

Aunque los fragmentos de pinturas generalmente pueden detectarse a simple vista, es conveniente el empleo de una luz blanca potente. En el caso de vehículos, como a veces las pinturas tienen propiedades luminiscentes, es importante el empleo de luces forenses para poner de manifiesto esa luminiscencia.

Una vez detectados los indicios, se recogerán y transportarán de distintas formas, según el caso. La elección dependerá, como siempre, de la experiencia y buen sentido del agente encargado de ello. Cuando están sobre una superficie (como suelo, muebles, etc.), los fragmentos de pinturas se pueden recoger directamente sobre un papel con ayuda de unas pinzas, o «barriéndolas» mediante un pequeño pincel o un cepillito. En algunos casos, es conveniente sacudir suavemente el objeto sobre el que se encuentran los trocitos de pintura (ropa o una alfombra, por ejemplo). Ya recogidas estas evidencias, el papel sobre el que se han recogido se introducirá en un sobre o en un pequeño recipiente (de vidrio o de metal), provisto de una tapa, que a su vez se guardará en una caja, para protegerlas. Aunque se haga con otros indicios traza (ver tema 4), no es conveniente recoger los fragmentos de pinturas con cinta adhesiva, ya que al ser muy frágiles podrían deteriorarse por este método. Es sumamente importante poner enorme cuidado en *no dañar los fragmentos*, para que no se rompan ni deterioren. Esto último tiene gran trascendencia especialmente en los casos de atropello con huida del conductor, ya que si se encontrara un coche sospechoso

siempre se deberá comprobar si alguno de esos fragmentos encaja con una zona descascarillada de la superficie del coche (figura 3.3). Por ello, es importante observar atentamente los bordes.

En algunos casos de restos de pinturas depositados sobre determinados objetos (como herramientas o ropa), lo mejor es recoger el objeto entero, protegiendo la zona que contenga los vestigios, y colocar todo en una caja para su posterior transporte. Lo mismo si se trata de una mancha de pintura sobre un objeto. Se pondrá cuidado asimismo en no estropear otras marcas de las que el objeto pudiera ser portador y que constituirían así otro tipo de evidencias (como huellas dactilares, restos de sangre, fibras...).



FIGURA 3.3. Desperfectos en la pintura de la chapa de un coche tras una colisión (se han enmarcado con círculos rojos los descascarillados de pintura).

3.8. ANÁLISIS FORENSE DE PINTURAS

Para determinar los métodos más adecuados para analizar las pinturas es necesario conocer cuál es su composición desde el punto de vista químico y, además, cuál es la estructura de las capas de pintura sobre una superficie.

3.8.1. Composición de las pinturas

Las pinturas consisten en una mezcla de distintos componentes: *pigmentos*, *resinas*, *aditivos* y *disolventes*. Lo que podemos considerar como componentes principales son los dos primeros. Los *pigmentos*, responsables del color, según ya se ha señalado anteriormente son compuestos de tipo inorgánico (aunque últimamente va en aumento el empleo de otros de

naturaleza orgánica). Por su parte, las *resinas* son de estructura polimérica y sirven como medio de soporte de pigmentos y aditivos, además de conferir ciertas propiedades a las pinturas, tales como dureza y adhesión (esta última favorece que la capa de pintura quede adherida a la superficie sobre la que se aplica). Pero la fabricación de pinturas requiere añadir otros productos, conocidos con el término general de *aditivos*, que proporcionan a aquéllas unas características especiales, afectando a sus propiedades físicas y químicas (viscosidad, brillo, resistencia a microorganismos, etc.).

Estos tres componentes constituyen lo que se conoce en conjunto como *estructura sólida* de la pintura. Pero deben estar diluidos (disueltos o dispersos) en uno o más *disolventes*, los cuales constituyen la *estructura volátil*. Así, cuando se pinta sobre una superficie, tras la evaporación de los disolventes la capa polimérica con pigmentos y aditivos quedará adherida y fija sobre esa superficie.

3.8.2. Problemas forenses a resolver

Los componentes anteriores, en cada uno de los cuatro tipos, pueden ser sumamente variados, así como las proporciones en que se encuentran en una pintura determinada. Por ello, el problema forense del análisis de pinturas resulta sumamente complejo. Nos centraremos en uno de los casos de estudios forenses de pinturas más comunes, el de accidentes de tráfico. Anteriormente se ha aludido a la estructura en capas de la pintura. Es muy importante tenerla en cuenta a la hora de llevar a la práctica el análisis de pinturas en el caso de accidentes de vehículos. El recubrimiento de la chapa consta al menos de cuatro capas (figura 3.4):

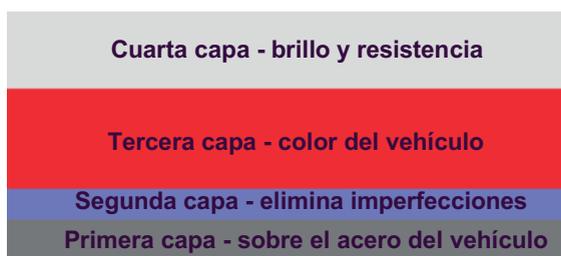


FIGURA 3.4. Capas de pintura en los vehículos.

- *primera capa*, consistente en una resina depositada sobre el cuerpo de acero del vehículo mediante un proceso de galvanizado, que proporciona protección contra la corrosión. Su color va del gris al negro.
- *segunda capa*, de poliésteres modificados con epoxi o de poliuretanos, cuya función es la de eliminar las imperfecciones de la superficie y dejarla completamente lisa. Está fuertemente pigmentada, para disminuir al máximo el contraste de color entre la capa primera y la siguiente o tercera capa.
- *tercera capa* o capa de color, que proporciona al coche el color y la estética de su acabado y, además, debe presentar resistencia ante fenómenos climáticos y ambientales (lluvia ácida o radiación UV). Se suelen emplear polímeros de base acrílica y pigmentos de naturaleza orgánica, ya que los pigmentos tradicionales de metales pesados (como plomo y cobre) se van abandonando debido a su carácter tóxico.
- *cuarta capa*, incolora, que mejora el brillo y la resistencia, normalmente de base acrílica.

En la industria de automóviles existe una enorme cantidad de marcas, líneas y modelos, así como una gran diversidad de colores. Por ello, son miles las variedades de pinturas de automóviles. De ahí la importancia de que se disponga de *bancos de datos* de pinturas de carrocería (sobre la estructura de las capas y el color) como referencia, para poder llevar a cabo una *comparación* entre el fragmento de pintura del que disponemos como indicio y los datos de referencia de los que dispone la policía forense. Así, en Estados Unidos se realizó este tipo de registros en varias fábricas de coches a partir del año 1974, dando lugar a bases de datos en los que los fabricantes incluían las características de las pinturas empleadas por ellos.

En cualquier caso, en los indicios de pinturas de coches es muy difícil asegurar si la esquila corresponde a una determinada marca y modelo de automóvil.

Asimismo, es igualmente complejo el poder asignar un origen concreto a un fragmento dado de pintura, teniendo en cuenta la acción de la intemperie sobre el exterior del vehículo, a lo que se añade que éste podría haber sido repintado.

Por todo ello, se necesita ayuda adicional, consistente sobre todo en el *análisis de comparación* (ver tema 1), fundamental dada la enorme diversidad de posibilidades de pinturas.

3.8.3. Técnicas analíticas para pinturas

Nos centraremos en este capítulo en el análisis de los indicios referidos a pinturas secas. Ante todo hay que resaltar que desde el punto de vista forense la propiedad más característica de las pinturas es el *color*, debido a la gran variedad de colores y de matices que puede haber. Por otra parte, es necesario determinar los componentes de las pinturas mediante análisis químicos. En este sentido, las técnicas analíticas más empleadas son:

- **Técnicas microscópicas**

En primer lugar, para localizar los fragmentos de pintura que pueden estar mezclados con otras evidencias el *microscopio de campo claro* es una herramienta imprescindible. Para conocer la textura superficial de las capas de pintura, su grosor, el tamaño y la distribución de partículas de los pigmentos, su color y la secuencia de colores en las distintas capas (referido en este caso a los automóviles), así como para poder comparar dos muestras (una desconocida con otra conocida) es imprescindible el empleo del *estereomicroscopio*. Es importante realizar un corte transversal del fragmento con ayuda de un bisturí, lo que permite estudiar mejor las capas de pintura. Asimismo, es importante el examen de los bordes del fragmento.

El estudio se mejora con otras técnicas microscópicas, como es la *microespectrofotometría (MSP)*, que hace posible distinguir entre capas que aparentemente pueden parecer similares en su superficie o en su color. Proporciona así datos más específicos sobre el color, siendo esencial que se lleve a cabo este análisis con luz reflejada desde la superficie del fragmento de pintura, pero no la transmitida a través del material (en este último caso sería preciso cortar láminas sumamente finas del fragmento de pintura, a fin de que fueran transparentes a la luz). Con esta técnica se obtendrán los espectros correspondientes del indicio, que se podrán comparar con los de una muestra control (por ejemplo, la obtenida del coche sospechoso) o con los de las bases de datos.

A veces se emplea también la *colorimetría*, si bien requiere que el espesor de la muestra sea al menos de 4 mm y sólo ampliaría la información relativa a la capa superior de ésta.

El paso siguiente consiste en conocer otras propiedades físicas y químicas de la pintura y, sobre todo, su composición química.

- **Pruebas químicas**

En primer lugar se pueden llevar a cabo pruebas sencillas de tipo químico. Tales son *pruebas de solubilidad*, tratando la muestra con algunos disolventes (acetona, cloroformo o tolueno). También se realizarán *pruebas microquímicas*, tratando los indicios con una serie de reactivos químicos de determinadas propiedades (tales como oxidantes, reductoras, deshidrantes, etc.). En todos los casos se observarán a través del microscopio los cambios sufridos por la pintura bajo la acción de cada disolvente y de cada reactivo (hinchazón, efervescencia, cambios en la coloración, desprendimiento de gases...).

Todos estos ensayos tienen el inconveniente de que son *pruebas destructivas*.

- **Análisis químico con técnicas instrumentales**

Se aplicarán las técnicas instrumentales más adecuadas de acuerdo con la composición química de las pinturas. En el caso más frecuente, el de los coches, se tendrá presente por tanto la composición de cada capa.

- **Microscopía electrónica de barrido acoplada a un análisis de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDX)**. Como ya se ha explicado en el tema 2, en la microscopía electrónica de barrido (SEM) un haz de electrones choca con la muestra, con lo que ésta emite rayos X, cuyo registro en un analizador (EDX) proporciona el análisis elemental de la muestra. Es, pues, una excelente herramienta para realizar el análisis químico de los componentes inorgánicos de las pinturas, identificando los constituyentes metálicos de los pigmentos. Asimismo permite examinar sucesivamente, y en un solo barrido, las distintas capas y partículas de forma individual. Tiene otra ventaja además, que se trata de una prueba no destructiva.
- **Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)**. De esta técnica se obtiene asimismo el análisis elemental de los metales presentes en los pigmentos de la muestra.

- **Difracción de rayos X (XRD)**. Revela la estructura cristalina de los componentes inorgánicos, siendo capaz de diferenciar entre distintas formas cristalinas presentes en los pigmentos, por lo que sirve para detectar muy pequeñas cantidades de éstos.
- **Espectroscopía Raman**. Muy útil para caracterizar los pigmentos de las pinturas, teniendo la ventaja de que las resinas de éstas casi no interfieren en los espectros.
- **Espectroscopía infrarroja (IR)**. Empleada para obtener información sobre los componentes orgánicos de las pinturas, como son las resinas de las mismas (de naturaleza polimérica), tanto las que sirven de soporte como las que se añaden como protectoras de la capa externa. Los resultados se mejoran sensiblemente con espectroscopía IR con transformada de Fourier (**FTIR**).
- **Espectrometría de masas acoplada a cromatografía de gases (GC-MS)**. Limitada tan sólo a los componentes solubles en medio orgánico, caso de los disolventes de las pinturas (como glicerina, trietilenglicol o trietanolamina), que así pueden identificarse.
- **Pirólisis acoplada a la cromatografía de gases (Py-GC o PGC)**. También para los componentes orgánicos pero en el caso de que no sean solubles, como son los poliméricos. Como esos componentes insolubles no se pueden introducir directamente en el GC, se acopla a éste un sistema pirolítico. La muestra a analizar se somete previamente a altas temperaturas, con lo que se descompone en numerosos productos gaseosos, que se introducen y analizan en el cromatógrafo de gases y, registrados después, dan lugar a un cromatograma o *pirograma*, característico de cada polímero, lo que sirve para distinguirlos.

Estas técnicas instrumentales, con excepción de la GC-MS Y PGC, tienen la ventaja de ser *no destructivas*.

Cuando el indicio consiste en una transferencia de pintura en forma de mancha, la estructura de capas ya no existe, por lo que su análisis se basará en el estudio de su aspecto, color y componentes químicos.

■ INVESTIGACIÓN FORENSE DE DOCUMENTOS ■

Este tipo de estudio forense implica el examen de documentos tanto impresos como manuscritos. A su vez, ello supone el análisis de tintas y papel. Además, en el caso de manuscritos hay que hacer una cuidada revisión de los rasgos de la letra e, incluso, del estilo de redacción y, en los documentos firmados, la comprobación de la autenticidad de la firma. Por todo ello, este campo de la investigación forense es amplio y complejo, requiriendo la colaboración de técnicas y especialidades muy diversas, aunque obviamente aquí nos centraremos en los aspectos relacionados con la química.

3.9. DOCUMENTOS CUESTIONADOS

El examen de «documentos cuestionados» (ver tema 1), del inglés **Questioned Documents Examination (QDE)**, constituye una disciplina dentro de la ciencia forense dirigida al estudio, análisis y dictamen de ciertos documentos que pueden estar relacionados con hechos presuntamente delictivos y en muchos litigios de nuestra vida social. En otros tiempos la *grafología* era imprescindible y casi la única vía de estudio para este tipo de documentos. Después, con la introducción de las máquinas de escribir y posteriormente de los ordenadores, se han ampliado las vías de investigación. Hoy en día, no obstante, gracias a la colaboración de otras ciencias, la química sobre todo, y a los grandes avances tecnológicos, este estudio se ha perfeccionado enormemente, a la vez que se ha convertido en mucho más objetivo.

Los documentos pueden constituir importantes evidencias en ciertos sucesos, como son falsificaciones, secuestros, homicidios, suicidios, chantajes..., aunque generalmente no tienen por qué encontrarse en la escena del suceso, como otros tipos de evidencias. Muchos de ellos forman parte de nuestra vida diaria, tanto en aspectos sociales como en el mundo de los negocios. Desde cartas, diarios, contratos o testamentos hasta pasaportes, carnets de conducir, cheques... e, incluso y como caso curioso, el análisis de billetes de lotería. Pero la investigación forense de documentos es mucho más amplia, pues también implicaría el estudio de documentos históricos y, dentro del servicio secreto, de documentos relacionados por ejemplo con

cuestiones de espionaje. Asimismo, puede incluirse el estudio de moneda en billetes, ya que supone el análisis de tinta, papel y posibles marcas introducidas en éste, por lo que los métodos e instrumentos de su análisis serían comunes a los empleados en el estudio de documentos cuestionados.

Los *objetivos* de esos análisis básicamente son dos. En unos casos, comprobar la autenticidad de un documento del que se supone puede haberse falsificado (bien totalmente o bien en algunas de sus secciones). Y en otros, asegurar su fuente u origen. En este último aspecto se incluirían documentos de tipo histórico, para comprobar si corresponden a una persona o a una época determinada, lo cual supondría también datar dicho documento.

Para estudiar todo ello, el investigador tiene a su disposición distintas herramientas analíticas, como son métodos microscópicos y cromatográficos, técnicas luminiscentes, etc. Pero no hay una fórmula mágica para llegar a unas conclusiones firmes, por lo que se deberá estudiar el documento desde diversas perspectivas y, como siempre, el profesional forense se ayudará de su experiencia y buen criterio. Por otra parte, en los documentos existen dos áreas a estudiar: el *papel*, base (en general) de los documentos, que sirve de soporte a las *tintas*, material con el que se elaboran los textos.

3.9.1. Forma de recoger y transportar los documentos cuestionados

Al recoger un documento para su futuro análisis forense, debe hacerse con sumo cuidado a fin de no deteriorarlo. Cada hoja se guardará separadamente de las otras que pudiera contener el documento para evitar que se contaminen entre sí, introduciéndolas una a una en una carpeta de cartón, que a su vez se guardará en una bolsa de plástico para aislarlas en lo posible del medio ambiente, evitando también así que se doblen o arruguen. En el transporte, igualmente, se evitará su deterioro.

En cualquier caso, es importante tener presente que siempre se debe asegurar la integridad del documento a examinar. Por ello, se debe manipular con cuidado y en su análisis se intentarán emplear *técnicas analíticas no destructivas* (aunque esto no sea siempre posible).

3.10. ANÁLISIS FORENSE DE TINTAS

El examen de la tinta o tintas con las que se ha escrito un documento es de interés fundamental para el estudio forense. El problema más general a resolver es determinar si la tinta es la misma en todo el documento o, por el contrario, si se han empleado distintos tipos de tintas. De esta manera, se podrá conocer también si se ha intentado modificar el contenido del texto introduciendo nuevas anotaciones, modificando palabras, letras o cifras e, incluso, borrándolo en parte.

Como en el caso de las pinturas, antes de abordar los métodos de análisis de las tintas es necesario conocer cuál es su constitución desde el punto de vista químico.

3.10.1. Composición de las tintas

La composición de las tintas ha variado mucho a través de los tiempos. En la Antigüedad se elaboraban a base de negro de humo mezclado con cola o suspendido en aceite, caso de los antiguos egipcios. En la Edad Media se emplearon mucho las tintas ferrogálicas, llamadas así por el ácido gálico (*ácido 3,4,5-trihidroxibenzoico*), que se encuentra en las agallas del roble y en otras plantas formando parte de los taninos. En estas tintas el color era debido a tanatos de hierro (II), formados por reacción de los taninos con sales ferrosas, a lo que se añadía cola o goma arábiga para mantenerlos en suspensión. Poco a poco se fueron agregando otros ingredientes a fin de mejorar las cualidades de las tintas, sobre todo las relativas a su viscosidad o a su resistencia a hongos y bacterias. También se emplearon otros productos colorantes, principalmente tintes naturales, hasta que fueron sustituidos por los tintes sintéticos.

Respecto a la investigación forense, hay que destacar ante todo que las tintas constituyen un grupo de productos muy heterogéneo y que, desde el punto de vista químico, fundamentalmente están constituidas por dos componentes principales: un material responsable del color (es decir, colorantes), que se encuentra disuelto o suspendido en otro componente, un material que constituye su vehículo o portador.

Como *colorantes*, generalmente se emplean tintes, aunque también pueden ser pigmentos o mezclas de ambos. Así, en el caso de tintas más fluidas (como

era el caso de tintas de las antiguas plumas estilográficas) se suelen emplear tintes de distintos tipos, solubles en el vehículo. Para tintas más viscosas se utilizan ya pigmentos (como las de las impresoras, salvo las de inyección y algún otro caso), insolubles en el vehículo, por lo que quedan en suspensión. Estas últimas tintas tienen el inconveniente de su mayor toxicidad de cara al medio ambiente, debido a la presencia en los pigmentos de metales pesados, además de que con la viscosidad disminuye la transparencia de la tinta.

En cuanto al *vehículo* puede ser agua (caso de las tintas acuosas) o disolventes orgánicos, que se evaporan más rápidamente. Al vehículo se le suelen añadir determinados *aditivos* a fin de proporcionar a la tinta ciertas características, tales como acelerar el proceso de secado, modificar la viscosidad, mejorar su adherencia al papel, etc. A veces se introducen *aglutinantes*, que favorecen el fijado al coagular las partículas del colorante y que, como ocurría en el caso de las pinturas, suelen consistir en resinas.

Con todas estas variables es obvio llegar a la conclusión del gran número de tintas que ofrece el mercado. No obstante, cada fábrica elabora sus propias tintas, manteniendo la misma composición para cada una de sus modalidades al menos durante algún tiempo. Por ello, dentro de cada tipo de una marca determinada y del mismo periodo de producción, lo más probable es que no se puedan distinguir la tinta de dos bolígrafos o de dos tóners, por ejemplo. Sin embargo, ya sí serán distinguibles las tintas de marcas diferentes, aunque aparentemente sean iguales de aspecto y características. En este sentido son muy importantes los registros de la composición de tintas de cada fábrica, lo cual proporciona valiosas bases de datos, imprescindibles a la hora de realizar el análisis comparativo de tintas. Se han creado así importantes y extensos catálogos sobre un enorme número de tintas en sus distintos tipos, como son los del Servicio Secreto de Estados Unidos, elaborados a partir de 1968.

3.10.2. Técnicas analíticas para tintas

El primer problema con el que se encuentra el especialista forense cuando se enfrenta al análisis de una tinta es que, como ocurre en las pinturas, se trata de una mezcla y no de un compuesto único. Esto supone, pues, una dificultad añadida para conseguir su identificación, por lo que el caso más frecuente es el análisis comparativo, bien entre dos tintas desconocidas

para comprobar si son o no iguales, bien comparando las características de la tinta estudiada con las de las bases de datos.

Para estudiar las tintas el forense dispone de una serie de métodos:

- **Métodos ópticos**

Presentan la ventaja de ser *no destructivos*. Los más importantes son:

- **Métodos microscópicos**

Se comenzará por el examen del documento al microscopio, que proporcionará datos sobre la tinta en cuanto a su color, brillo, profundidad del trazo, adherencia, etc. Este examen puede revelar la presencia de partículas metálicas, así como la de pigmentos, debido a sus formas cristalinas y propiedades ópticas. Además, permite distinguir entre distintos métodos de impresión (por ejemplo entre un tóner para impresoras láser o de tipo de inyección). Este examen también aportará algunos importantes datos sobre el del papel, como se tratará más adelante.

- **Técnicas luminiscentes**

Se ha comprobado que muchas tintas tienen propiedades luminiscentes, además muy variadas (ver tema 2, sección 2.2.1), por lo que se emplean técnicas que se basan, pues, en este tipo de propiedades. Para ello se estudia la tinta iluminándola con luz a distintas longitudes de onda, del IR al UV, e incluso a veces también con láser. La respuesta de la tinta dependerá de su naturaleza química. Así, muchas tintas dan fluorescencia en la región visible o IR del espectro cuando se las ilumina, respectivamente, con luz UV o con luz visible. Para poder detectar la fluorescencia IR es necesario emplear filtros y una película fotográfica sensible al IR, con lo que la emisión IR se convierte en la equivalente visible (ya que de lo contrario no podríamos verla).

De esta manera, si tenemos dos tintas que a simple vista resultan iguales, puede ocurrir que examinadas en la región IR o en la UV ya no lo sean. Hay que ir probando las distintas posibilidades en cuanto a diferentes frecuencias del espectro electromagnético. Por ejemplo, una tinta puede no verse (es decir, ser transparente) en la región IR, pero sí producir fluorescencia en la UV.



FIGURA 3.5. Aparato transportable para la detección de propiedades luminiscentes.

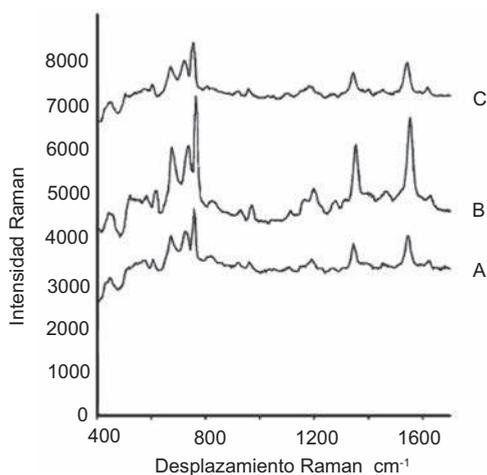


FIGURA 3.6. Espectros Raman de tres tintas distintas, A, B y C.

• Métodos químicos

Cuando se necesita hacer un análisis más riguroso para conocer la composición de una tinta, se recurre a métodos químicos más clásicos. Son *destructivos*, aunque se intenta minimizar este problema empleando una pequeñísima cantidad de muestra:

Estas técnicas son muy útiles para percibir muchas alteraciones en los textos de los documentos, como se tratará más adelante (sección 3.12). Por otra parte, en la fabricación de moneda en papel se suelen añadir tintas con determinadas propiedades luminiscentes, muy difíciles de imitar por los falsificadores.

Existen aparatos en el mercado, muy sencillos e incluso portátiles (figura 3.5) que permiten examinar las tintas dentro de un amplio rango de condiciones de iluminación, a muy distintas longitudes de onda, y que aumentan también los efectos luminiscentes, con lo cual éstos se pueden visualizar aunque sean débiles.

— Espectroscopía Raman

Es muy útil para diferenciar tintas que resultan indistinguibles por las técnicas luminiscentes. Dentro de la espectroscopía Raman, generalmente se emplea la técnica llamada espectroscopía **SERRS** (**S**urface **E**nhanced **R**esonance **R**aman **S**cattering), que aumenta notablemente las señales de los espectros (figura 3.6).

— *Pruebas de solubilidad*

Se trabaja con diminutas partes del documento, a las que se añaden los disolventes para comprobar si la tinta se disuelve o no en cada uno de ellos. Las tintas cuyo vehículo es un disolvente de tipo orgánico, se suelen disolver en piridina (por ejemplo, las de bolígrafo). Las tintas acuosas, por su parte, se disuelven en metanol, etanol o mezclas etanol-agua.

— *Técnicas cromatográficas*

Como las tintas suelen contener varios tintes y éstos son moléculas orgánicas, una vez disuelta la muestra dichos tintes se pueden separar por una técnica tan rápida y sencilla como la **TLC** (cromatografía en capa fina). También se emplea la **HPLC** (cromatografía líquida de alta eficacia). La muestra de tinta a analizar se prepara bien pinchando sobre el escrito a estudiar con una aguja hipodérmica o bien raspando cuidadosamente con un bisturí una pequeñísima porción dentro de una línea de un carácter del texto. De esta manera se intenta dañar éste lo menos posible.

3.11. TINTAS INVISIBLES, DOCUMENTOS SECRETOS

En algunas ocasiones se precisa escribir un documento en el que el texto resulte invisible. No hay más que recordar tantas películas de espionaje. Para ello se emplean *tintas invisibles*, también llamadas *tintas simpáticas*, cuya característica fundamental es que lo escrito con ellas sólo puede verse mediante determinados tratamientos físicos o químicos.

Estas tintas son de naturaleza muy diversa: jugos de muchos vegetales (limón, cebolla, pera, manzana...), leche, aceites, disolución de azúcar o de miel, fluidos biológicos (saliva, orina, suero...), sales de determinados metales (cobalto, hierro o plomo, por ejemplo)... Incluso, el agua serviría para ese fin. Asimismo, son muy diferentes los procesos por los que estas tintas pueden hacerse visibles, desde los más sencillos e incluso caseros, como calentar el papel con una plancha o con una vela, a otros que requieren ya el tratamiento con determinados reactivos químicos. Además, existe otro tipo, las tintas fluorescentes, para cuya visualización se emplean métodos más sofisticados, como es la luz ultravioleta.

La razón del proceso de visualización de esas tintas depende de su composición química. Así, en las de origen biológico (jugos vegetales o fluidos biológicos) basta comunicar calor, con lo que se produce la carbonización de los compuestos orgánicos que contienen. También las tintas de ciertas sales de cobalto se logran ver cuando se calientan, ya que cambia su estado de hidratación por pérdida de agua: por ejemplo, el cloruro de cobalto (II) es de color rosa muy pálido (prácticamente invisible) al estar hidratado, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, mientras que la sal anhidra es azul.

En otros casos son necesarios determinados agentes químicos. Las tintas invisibles de sales de hierro se revelan por adición de ácido gálico (lo que da lugar a un compuesto complejo coloreado), mientras que las de sales de plomo, por tratamiento con un sulfuro alcalino, con lo que se forma sulfuro de plomo, de color negro. Las de sales de plata por exposición a la luz solar dan coloración también negra, ocasionada en este caso por la reducción del ion Ag^+ a plata metálica. Por otra parte, las tintas que contienen almidón se visualizan con yodo, ya que se forma un complejo de color azul intenso. En algunos casos, el proceso de revelado se basa en una reacción ácido-base, como las tintas de fenolftaleína, que con vapores de amoníaco toman un color rosa intenso.

En ocasiones se requiere un proceso más complejo, que supone el tratamiento previo del papel con una disolución de un compuesto determinado. Al escribir con la disolución empleada como tinta, se produce una reacción entre ambas disoluciones que da lugar a una escritura invisible. Este procedimiento tiene la ventaja de aumentar las posibilidades de mantener el documento en secreto, ya que para revelar el escrito es necesaria la utilización de reactivos específicos, difíciles de conocer para todo aquél ajeno al proceso.

De todas las variedades, las de uso más extendido en la actualidad son las *tintas fluorescentes*. Se aprovechan las propiedades de fluorescencia de muchas tintas, ya comentadas (sección 3.10.2), y son «invisibles» porque sólo se pueden percibir al ser expuestas a una lámpara UV, emitiendo entonces una imagen fluorescente. Además, poseen la ventaja de que una vez que deja de exponerse a la luz UV, esa imagen desaparece, pero puede volver a hacerse visible por el mismo procedimiento. Tienen una enorme aplicación como tintas de seguridad, especialmente para verificar la autenticidad de ciertos documentos, como son cheques, pasaportes, per-

misos de conducir... y para marcar papel moneda, con lo que se previenen posibles falsificaciones. Asimismo se utilizan mucho en espectáculos para controlar la reentrada de aquellos asistentes que deseen salir por un tiempo, colocándoles en la mano un sello de esta tinta invisible (figura 3.7).



FIGURA 3.7. Mano con tinta fluorescente.

3.12. ANÁLISIS FORENSE DEL PAPEL

Aunque en el estudio de documentos cuestionados tiene el mayor protagonismo el análisis de tintas, el del papel aporta frecuentemente importantes datos. Los objetivos de su estudio son, por una parte, dictaminar si dos papeles tienen o no el mismo origen y, por otra, conocer su identidad. Este último problema es muy difícil de resolver y, en cuanto al primero, si bien es posible determinar que dos papeles tienen distinto origen, no se puede establecer con seguridad plena que su origen sea el mismo.

Para determinar los métodos de análisis del papel es necesario saber ante todo lo que es éste desde el punto de vista químico.

3.12.1. Composición química del papel

Los soportes de la escritura han ido cambiando a lo largo de la historia: desde las impresiones grabadas en piedra y en tablillas de arcilla, hasta papiros y pergaminos. Pero el invento chino del papel supuso una verdadera revolución. Aunque se supone que empezaron a fabricarlo en el siglo II a. C. (con distintos residuos de origen vegetal, como seda, cáñamo, paja del arroz, algodón, etc.), no se comenzó a extender por otras zonas de Asia hasta del siglo VII, llegando a Europa en el siglo XII. A partir de entonces, el papel fue desterrando el empleo del pergamino.

Desde el punto de vista químico, el papel es un material constituido fundamentalmente por celulosa, polímero natural con glucosa como monómero (figura 3.8 A). Se obtiene así de una pasta de este tipo de fibras vegetales, molidas y suspendidas en agua (pulpa de celulosa), generalmente blanqueada, y

posteriormente secada y endurecida (figura 3.8 B). Actualmente se parte, en general, de la madera de ciertos árboles, aunque también de las fibras recuperadas de restos de papel, de ropa y de otros productos (papel reciclado). Las fibras de celulosa se mantienen unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, aunque normalmente se le añaden sustancias para aglutinarlas más. Asimismo se agregan determinados productos, o aditivos, para conseguir una serie de propiedades especiales, tales como colorantes (tintes o pigmentos), ceras y aceites, resinas sintéticas para aumentar su resistencia a la penetración de la tinta y del agua, productos para mejorar su brillo y consistencia (yeso, talco, carbonato de calcio, almidón...). Esta amplia gama de aditivos tan diferentes proporcionará pistas muy útiles para el investigador forense.

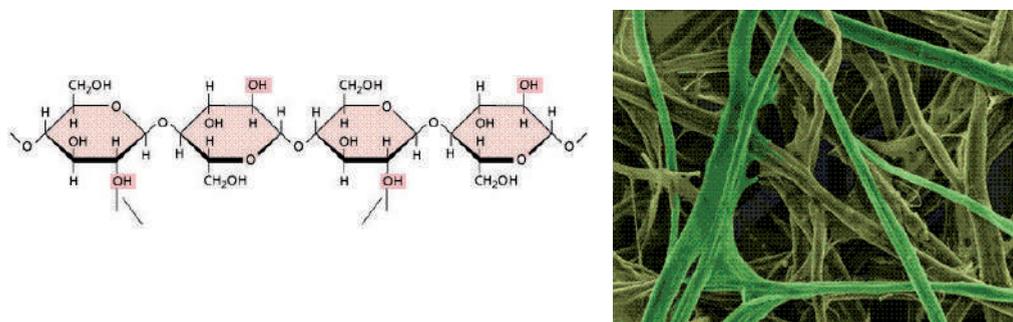


FIGURA 3.8. Polímero de celulosa unidades de glucosa (A) y fibras de celulosa en el papel (B).

3.12.2. Técnicas analíticas del papel

Los aspectos más estudiados en el examen de papel son, normalmente, sus rasgos morfológicos y propiedades físicas. Pero además hay que averiguar su composición química, analizando las fibras, así como los colorantes y aditivos que contiene, todo lo cual daría lugar a obtener su “huella química”. Por otra parte, es muy importante la imagen (escudo, logotipo, palabras, etc.) que aparece en muchos papeles con el aspecto de sombras más claras y más oscuras y que generalmente puede verse al trasluz. Es lo que se conoce como *marcas de agua* y son debidas a variaciones en el espesor o en la densidad de la hoja de papel. Buen número de fabricantes (aunque no todos) las introducen en el papel durante su proceso de elaboración y suelen cambiarlas de forma periódica. Como esto normalmente queda en

los registros de fábrica, las marcas de agua ayudarán a determinar si un papel, en su análisis comparativo, resulta o no del mismo origen que otro y, además, a calcular su antigüedad.

Para todo ello, el criminalista cuenta con tres herramientas fundamentales: métodos físicos (sobre todo examen visual y microscópico), métodos químicos y análisis instrumental.

- **Métodos físicos**

La determinación de muchas propiedades físicas del papel, como aspecto, color, brillo, espesor, densidad, permeabilidad o resistencia, contribuye a poder clasificarlo.

Observando el papel con un *microscopio*, frecuentemente se pueden observar fibras y partículas, lo que permite a veces clasificar las primeras. Tal es el caso de las fibras de algodón, sobre todo si se emplea luz polarizada. También se puede distinguir la capa de recubrimiento que frecuentemente se da al papel para dotarle de mayor resistencia, brillo o impermeabilidad. Por otra parte, es muy útil la observación del papel con luz UV, a fin de estudiar sus posibles propiedades luminiscentes, puesto que a veces presenta fluorescencia (figura 3.9) debido a determinados tratamientos durante el proceso de fabricación (por ejemplo, en el blanqueado). Estos métodos tienen la ventaja de ser no destructivos y con frecuencia son suficientes para demostrar que dos papeles no tienen el mismo origen.

No obstante, a veces es necesario recurrir además a un tratamiento químico. Ante todo, se han de liberar las fibras de celulosa, por lo que se entra ya en un proceso destructivo. Generalmente, basta tratar una muestra de papel del documento (que no contenga ningún texto) con agua destilada. El paso siguiente sería observar las fibras ya liberadas al microscopio y estudiar así sus características morfológicas. De esta manera, se pueden identificar mejor los tipos de fibras de celulosa empleadas en su fabrica-



FIGURA 3.9. Distinta fluorescencia de varios papeles de un documento, lo que demuestra que no tienen el mismo origen.

ción (generalmente procedentes de madera o de algodón), lo cual puede ayudar en algunos casos a localizar su origen geográfico, aunque éste es un problema muchas veces muy difícil de resolver.

- **Métodos químicos**

Tras este examen, para ahondar en la distinción de las fibras, hay que acudir a *pruebas químicas*. Se trata la muestra de papel en el que las fibras se han dejado libres con una serie de reactivos y se observa su reacción con la ayuda nuevamente del microscopio. Son análisis basados en procesos de tinción de las fibras, en los que se tiñen éstas de distintos colores, dependiendo de su tipo y proceso de fabricación. En cuanto a conocer los aditivos y otros componentes químicos del papel (almidón, ceras y aceites, proteínas, etc.), se recurre también a pruebas químicas específicas para cada uno. Por otra parte, su análisis elemental se puede realizar mediante una marcha analítica clásica.

- **Análisis instrumental**

Estas pruebas tienen el inconveniente, pues, de ser destructivas, por lo que van siendo sustituidas por el análisis instrumental. Así, la espectroscopía IR, aunque no muy útil para caracterizar las fibras de celulosa (ya que se trata de un polímero), sí lo es para reconocer otros componentes, como por ejemplo el carbonato de calcio, que lleva asociadas unas bandas características en el IR. En cuanto al análisis elemental, la técnica **ICP-MS** (**I**nductively-**C**oupled-**P**lasma-**M**ass-**S**pectrometry) ha resultado muy eficaz, siendo además sólo mínimamente destructiva. Y mejor aún si se emplea esta técnica acoplada a ablación láser (**LA**, **L**asser **A**blation), de lo que resulta el sistema **LA-ICP-MS**, que ha tenido gran éxito en el estudio de distintos papeles blancos oficiales al proporcionar datos cuantitativos de ciertos metales (como Na, Al y Sr), a pesar de estar presentes en muy bajas concentraciones, lo que ha servido para poder diferenciar dichos papeles.

Finalmente, la fluorescencia de rayos X (**XRF**) y difracción de rayos X (**XRD**) son también muy eficaces en la clasificación del papel. Así, el estudio de las marcas de agua, uno de los datos de mayor valor para conseguir ese objetivo, se lleva a cabo con ayuda del microscopio y sobre todo con esas técnicas de rayos X. Éstas, por otra parte, también son capaces de detectar la rotura o la alteración de fibras, como ocurre al abrir un sobre para leer su contenido y volverlo a cerrar, por ejemplo.

3.13. ALTERACIONES EN LOS DOCUMENTOS

Un documento puede alterarse, bien totalmente o sólo en parte, para cambiar su contenido y significado. En este sentido se borran o tachan ciertas frases o palabras del documento y, a veces, en documentos manuscritos, se sobrescriben o se disimulan cuidadosamente algunas letras o cifras para que parezcan otras. En la mayoría de estos casos la intención es claramente fraudulenta para falsificar un documento o para ocultar o cambiar su contenido y significado. Para ello se recurre a distintos procedimientos:

3.13.1. Borrar el texto

Puede llevarse a cabo por varios métodos.

- **Borrado por métodos físicos:** se emplea una goma, una cuchilla, arena, etc. En estos casos se borran letras, palabras o cifras, pero en mayor o menor medida siempre se dañan fibras del papel. Aunque este hecho pueda no percibirse a simple vista, sí se consigue observándolo a través de un *microscopio*, con luz directa o con luz que caiga oblicuamente sobre la superficie del papel. No obstante, es prácticamente imposible identificar el texto original.
- **Borrado por métodos químicos:** normalmente se realiza mediante la acción de un agente oxidante fuerte, que al reaccionar con la tinta da lugar al producto oxidado incoloro. También aquí para percibirlo es necesario el empleo del *microscopio*, con lo que se observa la zona decolorada del papel. Otras veces basta iluminar con luz UV o IR para detectar dicha zona, como se explicará a continuación.

3.13.2. Cambiar el texto

Es el caso más frecuente. Se altera el texto cambiando ciertas letras o cifras con una tinta que, generalmente no es la original. Para su posible detección se aprovechan ciertas propiedades que pueden tener las tintas:

- **Luminiscencia IR.** Muchas tintas tienen la propiedad de absorber las radiaciones visibles de la región verde-azul e irradian después luz IR. Si se ha producido la alteración en el texto con una tinta de este tipo,

es fácil percibirlo añadiendo al sistema de detección una película sensible al IR, con lo que obtendríamos fácilmente una fotografía con la imagen luminiscente. Así, en la figura 3.10 B se aprecia que las cifras inicialmente eran 1900 y que se cambiaron a 7968, ya que la tinta del original presentaba luminiscencia IR.

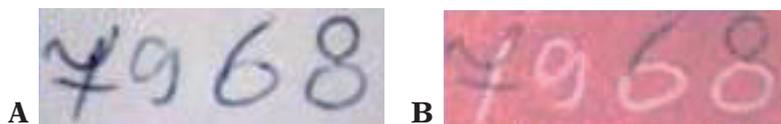


FIGURA 3.10. Fotografías de las cifras en un cheque: A, bajo iluminación normal; B, bajo iluminación de luz verde-azul y película sensible al IR.

Este método es tan sensible que es capaz de detectar los restos de tintas que pudieran haber quedado embebidos en el papel después de haber sido borrados.

- **Absorción de luz IR.** Otras tintas absorben luz IR en distinto grado y después la reflejan. Se ilumina así el documento con luz IR y la luz IR reflejada por la tinta se registra en una película sensible al infrarrojo. Ésta es otra manera de diferenciar tintas de distinta composición química con las que se haya alterado un documento.

3.13.3. Tachar el texto

Se pueden tachar palabras o cifras del texto, bien emborronándolas con una tinta espesa o con un fluido corrector, de tal manera que queden ocultas a nuestra vista. Si la tinta fuera la misma, es casi imposible poder leer el escrito que queda debajo y que se quiere ocultar.

Sin embargo, si se ha tachado con una tinta diferente, es posible visualizar lo tachado. Supongamos que la tinta con la que se ha tachado es transparente a la luz IR, pero no así la tinta del escrito que oculta bajo ella. Entonces, iluminando el documento con una luz de una radiación IR, dicha radiación atravesaría la capa de tinta transparente, pero sería absorbida por la tinta del escrito oculto, con lo que realizando una fotografía con una película sensible al IR se conseguiría descubrir lo que se había tachado.

3.13.4. Marcas de presión o escritura latente

Cuando se escribe a mano en una hoja de papel bajo la cual existe otra, en ésta última quedan impresiones de lo que se haya escrito en la primera. Se trata de lo que se llama *marcas de presión*, *escritura latente* o *escritura indentada* (figura 3.11 A). Algunas veces, si estas marcas son muy fuertes, pueden detectarse dirigiendo luz hacia la hoja que las contiene bajo un ángulo oblicuo. Pero éste es un caso muy poco frecuente, ya que para poder leer lo escrito es necesario emplear equipos especializados. Tal es el llamado **ESDA** (figura 3.11 B), que usa una técnica de detección electrostática (**E**lectro-**S**tatic **D**etection **A**pparatus), que permite de una forma relativamente rápida visualizar impresiones no ya sólo en la hoja inmediatamente inferior a la que se escribe, sino en otras que estén aún más abajo, marcas tan débiles que no podrían ser detectadas por otros métodos. La sensibilidad de esta técnica es tan grande que incluso detecta deformaciones en las fibras de papel ocasionadas por el movimiento debido a la misma acción de escribir o al roce de dos documentos, uno contra otro.

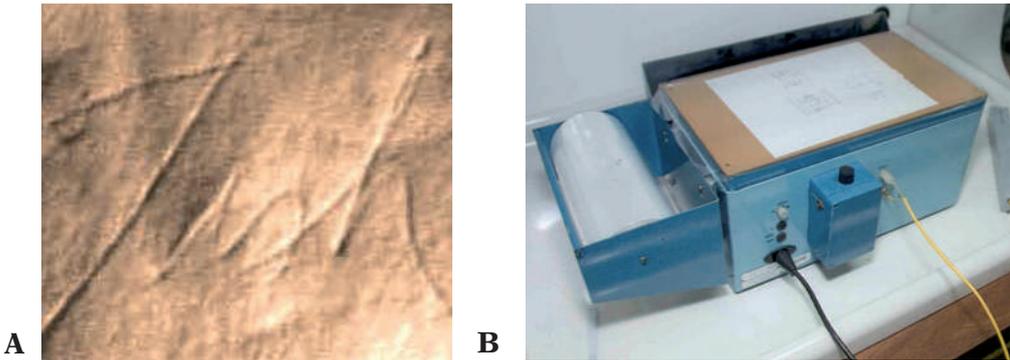


FIGURA 3.11. A. Marcas de presión y B. aparato ESDA para visualizar este tipo de marcas en documentos.

Con el ESDA se consigue también detectar lo que se conoce como *impresiones secundarias*, que consisten en las impresiones producidas no ya al escribir, sino por la acción de almacenar dos hojas juntas, de tal manera que las marcas de presión de una hoja dejarán impresiones —aunque debísimas— en la hoja que se deposite bajo ella. Asimismo en los últimos

tiempos se ha podido determinar el orden en que las páginas han sido escritas, al precisar qué se hizo antes en una hoja, si su propia escritura o las marcas de presión. Esto se ha conseguido a través del estudio de las intersecciones de unas y otras realizado con el ESDA.

Por todas estas razones este aparato, desarrollado en Londres en 1979, revolucionó el estudio forense de documentos al constituir el arma tal vez más poderosa para llevarlo a cabo, habiéndose convertido hoy en día en una técnica de rutina en los laboratorios forenses. El estudio con el ESDA debe realizarse antes que el análisis de las huellas dactilares, palmares o de otro tipo, ya que el tratamiento del documento con disolventes interferiría en dicho estudio.

Por otra parte, cuando las hojas de un documento escrito se depositan una sobre otra, pueden quedar restos de tinta de la inferior sobre el reverso de la que está encima. Y también puede transferirse tinta de una cara a otra, cuando se escribe un papel por las dos caras.

3.13.5. Otros tipos de alteraciones

En otros casos aparecen en los documentos perforaciones, pequeñas arrugas o dobleces que demuestran que la secuencia de páginas no es la que debería corresponder al escrito original. Por esta razón, conviene examinar todo el documento al microscopio o bien fotografiarlo y observar atentamente las fotografías.

A veces, incluso, ciertas partes de un documento pueden haberse quedado intencionadamente, a fin de ocultar algunos de sus fragmentos. En este caso, las fotografías IR o la observación del documento mediante una luz reflectora dirigida a la superficie del papel desde distintos ángulos, pueden revelar parte del escrito en el papel chamuscado. En este sentido, las técnicas de digitalización de la imagen son actualmente de una gran ayuda en el estudio de documentos. Una vez obtenidas las imágenes digitales, se harían ajustes en ellas mediante un programa adecuado (como, por ejemplo, el Adobe PhotoShop). Así, se puede aumentar el tamaño, la iluminación, la oscuridad, el contraste..., de las imágenes, según convenga, lo cual mejora muy sensiblemente la visualización del documento.

3.14. DOCUMENTOS IMPRESOS

Hasta ahora nos hemos centrado en documentos manuscritos. En cuanto a los impresos, de cara a la investigación forense su mayor interés radica en documentos de carácter oficial, estudiando su posible falsificación o alteración para conseguir el uso fraudulento de los mismos. Tales son pasaportes, documentos de identidad, permisos de conducir, letras de cambio... y moneda en papel.

La tecnología informática ha multiplicado los procedimientos y aparatos para obtener documentos impresos, como son impresoras de ordenadores, fotocopiadoras, faxes, etc., cada vez más usuales en la sociedad actual. Asimismo, los tipos de tinta son muy diversos (impresión láser, de inyección u otros tipos).

Por otra parte, esta sofisticada tecnología proporciona igualmente nuevos medios a los falsificadores de alterar determinados documentos, por lo que se han ideado diferentes fórmulas para impedirlo o al menos para hacerles esa tarea mucho más difícil. En este sentido, esos documentos se imprimen en papel sensible al borrado (ya sea por medios mecánicos o por la acción de productos químicos), o se le añaden fibras fluorescentes o se le hacen marcas específicas (como las de los billetes de dinero). Respecto a las tintas, se recurre también a muy variados procedimientos, tales como emplear las que presenten propiedades luminiscentes o que cambien de color bajo luz de diferentes longitudes de onda, entre otros. Por ello, muchas de las técnicas ya estudiadas para analizar la alteración de documentos manuscritos son válidas para los impresos.

En consecuencia, el forense dedicado a la investigación de este tipo de documentos ha de tener un profundo conocimiento sobre los distintos procesos de impresión y tipos de tintas, a fin de ser capaz de identificarlos y reconocer en su caso su posible falsificación.

3.15. DATACIÓN DE DOCUMENTOS

El cálculo de la antigüedad de un documento, es decir, su datación, no es en absoluto una tarea fácil. Para llevarla a cabo se dispone de dos áreas de investigación: por una parte, la tinta o tintas con las que esté escrito (bien a mano o bien impreso) y, por otra, el papel.

En el caso de la *datación de las tintas*, aún no se han conseguido métodos verdaderamente seguros. Ello exigiría ante todo poder identificar las tintas, lo que no siempre es posible como ya se ha mencionado, ya que no se cambia con frecuencia su composición básica, con lo cual existen en el mercado muchísimas tintas muy similares entre sí. No obstante, en los últimos tiempos algunas firmas, durante el proceso de fabricación de las tintas, añaden trazas de componentes con metales del tipo tierras raras que les confieren propiedades fluorescentes, y los cambian anualmente, lo que permite localizar el año de fabricación de la tinta. Por ejemplo, esto se hizo en Estados Unidos a partir de 1990.

Muy frecuentemente lo que interesa al forense es determinar la *antigüedad relativa*, para saber si distintas partes de un documento o dos documentos diferentes han sido realizados o no en el mismo momento. Para ello se recurre al estudio de lo que se conoce como *perfil dinámico de una tinta*, (cambios en sus componentes cuando se alteran con el transcurso del tiempo). Este proceso comienza cuando el disolvente de la tinta, una vez depositada sobre el papel por el acto de escribir, se va evaporando. Se parte de la idea de que cuánto más antigua es una tinta está más seca y es más difícil extraerla del papel. Por ello, en muestras de los documentos a estudiar se extrae la tinta con un disolvente y se mide la concentración relativa de los colorantes extraídos a su vez en esa tinta, lo que permite evaluar la edad relativa de los escritos correspondientes. También se puede comparar la facilidad para extraer del papel los componentes de una tinta con la de otras tintas de antigüedad conocida (lo que podría llamarse su extractibilidad relativa). Técnicas analíticas como HPLC, MS y espectroscopías UV, visible e IR son útiles para estos estudios. Sin embargo, tampoco es un método muy seguro, ya que los resultados no son totalmente reproducibles.

En algunos casos se puede acudir a otros datos, como es la presencia o no de tintes sintéticos en las tintas, ya que aquéllos no se desarrollaron totalmente hasta finales del siglo XIX. En este sentido, en las tintas antiguas suelen aparecer aglomerados de partículas, ya que sus componentes no estaban tan uniformemente distribuidos como en las tintas más modernas, lo que se puede detectar mediante métodos microscópicos.

En cuanto a la *datación del papel*, es un problema analítico aún más difícil. Su envejecimiento (que da lugar a una coloración amarillenta y una



mayor fragilidad) generalmente proviene de la degradación de la celulosa a glucosa mediante un proceso de hidrólisis ácida:



Por ello, este proceso se acelera por la presencia de determinados aditivos de papel que contengan ácidos de Lewis (como, por ejemplo, iones Al^{3+}), así como por la acción de la luz o la oxidación atmosférica, lo que da lugar a ciertos productos ácidos.

No obstante, la datación de documentos es un problema que interesa sobre todo a historiadores y arqueólogos, pero no tanto al investigador forense, más centrado en general en documentos más o menos recientes. En este aspecto, es de mayor utilidad el estudio de la antigüedad relativa, de lo cual ya se ha tratado en esta misma sección.

Estos son los procedimientos analíticos más empleados en el estudio forense de indicios de pinturas y de documentos. No obstante, se pueden ampliar en ciertas circunstancias con otras técnicas menos usuales.

En cualquier caso, se requiere del investigador una de sus características más preciadas, la paciencia, a fin de que vaya probando las distintas posibilidades de análisis, hasta encontrar las más adecuadas.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES**Planteamiento**

1. En un laboratorio forense se ha de realizar el análisis de los componentes resinosos de unos indicios de pintura. Se pregunta:
 - a) ¿Qué técnicas instrumentales serían más adecuadas para ello?
 - b) Suponiendo que todas esas técnicas suministran una información análoga, ¿cuál de ellas sería preferible? *Justificarlo* brevemente.
2. Responder si la siguiente afirmación es *cierta* o *falsa*, *justificando* brevemente su respuesta:

«Una de los mejores formas de recoger los fragmentos de pinturas para realizar posteriormente su estudio forense es mediante cinta adhesiva, ya que se trata de indicios en trazas».
3. Explicar brevemente en qué consisten los siguientes conceptos e indicar cuáles son los métodos analíticos más apropiados para cada caso.
 - a) Marcas de agua
 - b) Escritura indentada
4. Responder a la cuestión siguiente: Los textos escritos con cualquier tipo de tinta simpática, ¿se destruyen siempre, una vez que se han revelado?

Resolución

1. a) Dado el carácter orgánico de las resinas, las técnicas instrumentales más adecuadas serán: 1- La espectroscopía IR; 2- La pirólisis acoplada a la cromatografía de gases, PGC, ya que por su carácter polimérico, las resinas no son solubles en disolventes orgánicos y deben someterse previamente a pirólisis.
 - b) Sería preferentemente la primera, es decir, espectroscopía IR, ya que no es destructiva, mientras que la PGC sí lo es.
2. Es falso. Si bien este método es útil para otros indicios en trazas (como fragmentos de vidrio o fibras), no lo es en el caso de fragmentos de pinturas, ya que podrían romperse fácilmente.
3. a) Marcas de agua: consisten en imágenes que aparecen en muchos papeles con el aspecto de sombras más claras y más oscuras, debidas a variaciones en el espesor o en la densidad en la hoja de papel y que generalmente pueden verse al trasluz. Se analizan mediante examen con el microscopio y, sobre todo, con técnicas de rayos X.

- b) Escritura indentada (también llamada marcas de presión o escritura latente): marcas que quedan en un papel cuando se ha escrito en otro colocado encima de él, y son debidas a la presión del instrumento con el que se escribe. La mejor manera de estudiarla es mediante una técnica de detección electrostática, con el aparato llamado ESDA.
4. No siempre, aunque éste sea el caso más frecuente. Por ejemplo, los textos escritos con tintas invisibles fluorescentes no se destruyen, ya que el método de detección, iluminación con luz UV, no es destructivo.



LECTURA

«Falsificación de papel moneda: un delito más frecuente de lo que pudiera pensarse»

Todos conocemos la existencia de billetes falsos y, puede decirse, que la falsificación de dinero es tan antigua como su invención. O, incluso, existía cuando para pagar no se utilizaba lo que tradicionalmente entendemos como dinero. Tal es el caso de los mayas y aztecas, que solían emplear como «moneda» almendras de cacao (como cuenta el mismo Hernán Cortés), pero se ha sabido que en algunos lugares circularon almendras falsas, pues en su interior no había sino arena o barro. Cuando el dinero circulaba sólo en forma de monedas metálicas, la falsificación no era demasiado complicada. No había más que rebajar la cantidad de oro o plata en las aleaciones o, simplemente, dorar o platear monedas fabricadas solamente con metales de menor valor. Pero no resultaba una operación rentable, pues al fin y al cabo era necesario emplear esos metales preciosos. Cuando llegó el papel moneda (se inventó en China en el siglo VII y se extendió por Europa a partir del XVIII), el proceso de falsificación, aunque más laborioso, se abarató al partir de materiales menos costosos, básicamente papel y tinta.

Ante los riesgos de falsificación, se han ido tomando una serie de medidas de seguridad para hacer que ese trabajo, si no imposible, resulte al menos mucho más difícil. Con este fin se emplea un papel especial hecho generalmente de fibras de algodón y sin blanqueadores ópticos (lo que se detecta porque con luz UV no presenta fluorescencia). Asimismo, se utilizan marcas de agua (detectables con rayos X), hilos metálicos de seguridad, carteo (detección de tipo sonoro, pues al agitar el billete da sensación de metalizado), relieves, fibrillas fluorescentes, halogramas (imágenes tridimensionales que al moverlas cambian de aspecto o de color). También se recurre a tintas especiales, como son las invisibles y las tintas O.V.I. (Impresión Ópticamente Variable, que cambian de color según la incidencia de la luz y el ángulo del observador).

No obstante, siempre hay una carrera paralela entre esas medidas de seguridad y los nuevos medios tecnológicos, cada vez más sofisticados, con los que el falsificador puede contar. Y, de hecho, éste es un delito sumamente frecuente, mucho más de lo que pudiéramos imaginar. No hay más que echar un vistazo a noticias periodísticas de este tipo en cualquier hemeroteca o en Internet, que además de frecuentes, a veces son también muy próximas. Por ejemplo, se pueden encontrar títulos como éstos: «Detenidos tres hombres



por intentar crear el mejor billete falso de 50 euros» (El País, 14 de julio de 2014). En este artículo se comenta que los falsificadores, detenidos en las proximidades de Madrid, habían adquirido en China papel con muchas de las medidas de seguridad de los billetes legítimos, y además de gran calidad, como son hilos de seguridad, fibrillas luminiscentes u hologramas falsos.

Los falsificadores de dinero siempre han preferido las divisas de gran circulación, por lo que sus billetes favoritos han sido los de dólar. Pero con la aparición del euro esta moneda ha ido desplazando al dinero estadounidense en cuanto a punto de mira de los falsificadores, de tal manera que actualmente el Servicio Secreto de los Estados Unidos ha constatado una importante disminución en la cantidad de dólares falsificados.

LA QUÍMICA EN LA INVESTIGACIÓN FORENSE DE FIBRAS TEXTILES



Cáñamo, Seda, Viscosa y Nylon

María del Pilar Cornago Ramírez

OBJETIVOS

General

El objetivo del tema será ofrecer una visión general de los tipos de fibras existentes, cómo se clasifican, cuáles son sus características más importantes, cuál es la forma correcta de buscarlas y recogerlas, así como exponer las diferentes técnicas utilizadas en su caracterización.

Específicos

1. Entender qué son las fibras y cuáles son sus características más destacables.
2. Clasificar las fibras en relación a su composición y origen.
3. Reconocer la importancia de las fibras, como posible indicio, en las ciencias forenses.
4. Enumerar los procedimientos que existen para buscar y recoger fibras en la escena de un suceso.
5. Establecer las técnicas de análisis más importantes para el estudio de fibras en el contexto forense.
6. Diferenciar en cada caso la técnica de análisis más adecuada en función de la naturaleza y cantidad de la muestra disponible.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para el estudio de este tema, es importante revisar los contenidos relacionados con la química de polímeros: conceptos, clasificación y tipos de reacciones de polimerización.

Tema 4. La química en la investigación forense de fibras textiles

- 4.1. Introducción
- 4.2. Qué son las fibras
- 4.3. Fibras naturales: Tipos y propiedades
- 4.4. Fibras manufacturadas: Tipos y propiedades
- 4.5. Investigación forense de fibras
- 4.6. Identificación y comparación de fibras
- 4.7. Importancia de las fibras como indicio

Ejercicios y Soluciones

Lectura: «Pashmina y Shahtoosh, dos tipos de lana muy apreciadas»

4.1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de un químico forense y en lo que al tema de fibras se refiere estará encaminado a caracterizar e identificar los restos encontrados en la escena del suceso. Por ello el investigador deberá poseer un vasto conocimiento del mundo de las fibras y experiencia en el uso de las técnicas de análisis.

El hallazgo de una huella dactilar (tema 7) o de algún resto de fluido corporal que permita determinar el ADN (tema 8), son pruebas de incalculable valor a la hora de poder relacionar la escena del crimen y/o a la víctima con un determinado sospechoso. Otros posibles restos de material recuperable, tales como partículas de polvo, pintura (tema 3), vidrio, cabellos o fibras (este último el tratado en este tema), aunque a veces no sean tan concluyentes como los anteriores para establecer una identificación positiva, si pueden contribuir a confirmar los resultados de otras evidencias encontradas, o al menos, centrar las posibilidades de búsqueda en un grupo más reducido en el cuál pudiera tener cabida el sospechoso. Se trata en estos casos de objetos muy pequeños que pueden pasar inadvertidas a

simple vista, por lo que será la experiencia del investigador, junto con un protocolo de búsqueda apropiado, lo que hará posible su localización.

Tampoco hay que olvidar la posibilidad de un intercambio entre el sospechoso (si lo hubiera) y la víctima, ya que entonces aquél portará algún resto que convenientemente analizado servirá para establecer un vínculo sospechoso-víctima o sospechoso-escena del crimen. Este intercambio es de especial relevancia en el caso de peleas, homicidios o agresiones sexuales, incidentes en los que existe un contacto muy directo entre víctima y agresor.

No cabe duda, que el valor identificativo de estos restos será tanto mas alto cuanto menos abundantes o corrientes sean los mismos¹. Centrándonos ya en el análisis de fibras, el hallazgo por ejemplo de una fibra de algodón que además no esté teñida, carecerá de valor en la mayor parte de los casos. Por otro lado y aunque el avance en lo que a equipamiento tecnológico se refiere ha permitido a los laboratorios forenses llegar a diferenciar muchos tipos de fibras con la misma composición, la producción masiva de materiales textiles limita algunas veces el valor de estas pruebas como evidencia. En este sentido, si el investigador no puede comparar sus resultados con una muestra de referencia, la identificación también será más complicada y tendrá que recurrir a la búsqueda en las bases de datos.

4.2. QUÉ SON LAS FIBRAS

Una *fibra* es cualquier estructura sólida que sea larga, delgada y flexible y cuyo diámetro sea muy pequeño en relación a su longitud. La hebra larga, delgada y flexible resultado de unir y retorcer un grupo de fibras es el *hilo*.

El término *textil*, estrictamente hablando, se refiere a cualquier objeto que pueda tejerse o que ha sido tejido. Sin embargo, teniendo en cuenta la definición de fibra y dado que a su vez una fibra es la unidad fundamental de un producto textil, el término textil se puede utilizar en un sentido más amplio para referirse a aquellos productos compuestos de fibras y que no son tejidos, como es el caso de las cuerdas.

¹ Esto queda perfectamente ilustrado en la lectura "El enigma de las fibras" página 92 del texto: En la escena del crimen. Dorling Kindersley. Ed. Pearson Education 2003



Antiguamente las fibras textiles se utilizaban fundamentalmente como vestimenta, para protegerse contra los elementos externos y también como ornamento. Actualmente, además de las aplicaciones anteriores, su uso se ha extendido a otros ámbitos como el geotextil, arquitectura textil, etc.

4.2.1. Clasificación de las fibras

Las fibras que presentan mayor interés desde el punto de vista forense pueden clasificarse en base a su origen y composición. Así, y como muestra la figura 4.1, se pueden diferenciar dos grandes grupos: las fibras naturales y las fibras manufacturadas o fibras químicas. Muchas de estas fibras, como ya se ha mencionado, son fácilmente transferibles de un objeto a otro cuando existe un contacto físico; por ejemplo, las fibras de lana, debido a su superficie rugosa y con escamas, o las de algodón, que poseen recovecos. Además, la mayoría de ellas son resistentes a degradaciones físicas, químicas y biológicas medioambientales, por lo que pueden permanecer intactas durante largos períodos de tiempo.

4.2.2. Características de las fibras

Las fibras presentan una composición química definida que determina sus propiedades químicas, como resistencia a los ácidos, los álcalis, a agentes oxidantes. Poseen además una serie de parámetros geométricos característicos, como son:

Longitud. Distinguiendo entre fibras continuas o filamentos y fibras cortas o discontinuas (longitud limitada entre 0,5 y 25 cm). Las fibras naturales, excepto la seda, son cortas, dependiendo su longitud del origen de la fibra. Las fibras manufacturadas son continuas, aunque por medio de cortes se pueden transformar en discontinuas.

Rizado. Son las ondas, rizos o dobleces que presenta la fibra en su longitud. Su presencia hace que la cohesión, elasticidad, volumen, conservación del calor y resistencia a la abrasión y a la absorción aumenten.

Contorno de la superficie. Se entiende como tal la superficie a lo largo del eje de la fibra, que puede ser: lisa, dentada, serrada o estriada. Esta característica influye en el tacto y la textura.

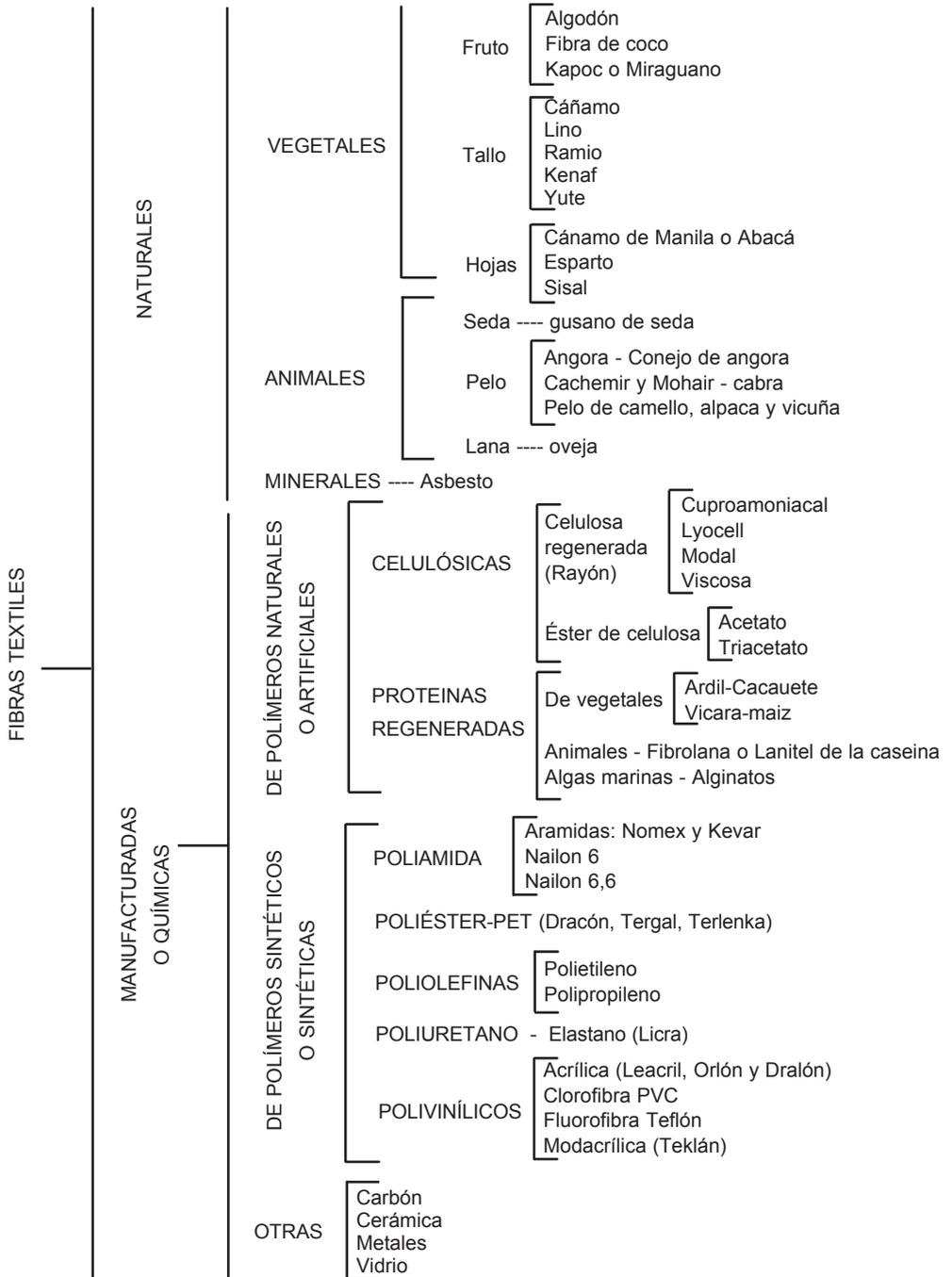


FIGURA 4.1. Clasificación de las fibras de interés forense.



Finura. Es la medida del grosor y está relacionada con el diámetro aparente de la fibra. Se expresa en micras en las fibras naturales y en tex (peso en gramos de 1000 m de filamento) en las fibras artificiales. Determina el tacto de una tela e influye en la calidad y el precio. Las finas dan suavidad mientras que las gruesas aportan rigidez y dureza.

Forma de la sección transversal. En las fibras vegetales esta sección depende de la forma en que se va acumulando la celulosa durante el crecimiento de la planta. En las de origen animal influye la formación de sustancias proteicas y la forma del folículo del pelo y, en el caso particular de la seda, también el orificio a través del cuál se extruye la fibra (figura 4.2). En el caso de las fibras manufacturadas (figura 4.3) dependerá de la forma de la hilera por la que se extruye, y del método de hilatura. Esta forma geométrica influye en el cuerpo, volumen, textura, lustre y sensación que produce la tela.

Las fibras presentan otra serie de características como son: comportamiento a la abrasión (capacidad para soportar el uso diario), conductividad eléctrica, plasticidad, higroscopicidad (relación hidrofilia/hidrofobia), termicidad (grado en el que

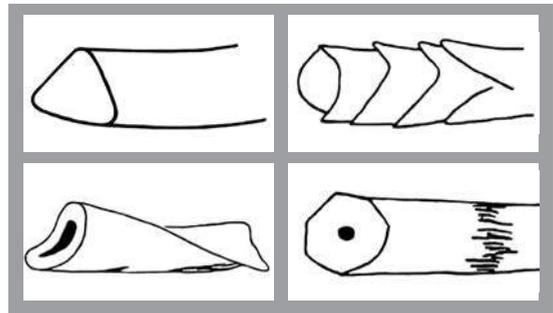


FIGURA 4.2. Sección transversal de fibras de seda (triangular con bordes redondeados), lana (circular con escamas superpuestas en la cutícula), algodón (forma de judía) y lino (poligonal).

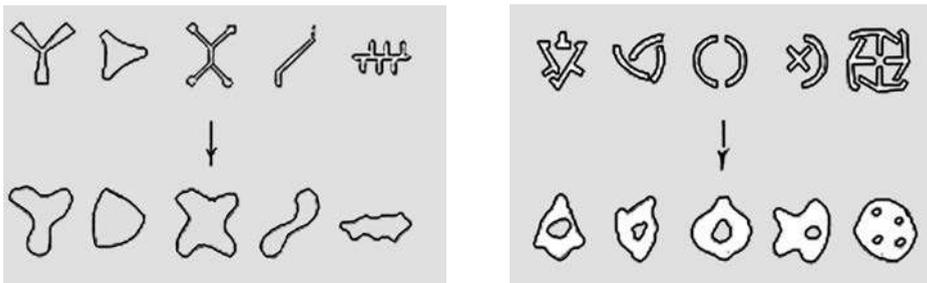


FIGURA 4.3. Parte superior, formas de hilera de fibras manufacturadas. Parte inferior, secciones transversales sin orificios (izquierda) y con orificios (derecha).

resguarda del frío), elasticidad, resistencia al alargamiento, comportamiento a la luz UV, color y brillo o receptividad a los tintes, entre otras.

Las propiedades deseables en una fibra variarían en función del uso al que vayan destinadas como, puede ser la manufacturación de textiles, cordelería o diferentes usos industriales.

En el estudio forense, determinar las características de una fibra ayudará a su clasificación en un determinado nivel, por ejemplo, si se trata de una poliamida o de una fibra natural de origen vegetal. Posteriormente y comparando esta información con la obtenida de una fibra control procedente de un sospechoso, podrá conducir al investigador a concluir que ambas fibras son similares como para proceder de la misma fuente o por el contrario, que son totalmente distintas.

4.3. FIBRAS NATURALES: TIPOS Y PROPIEDADES

Son aquellas fibras que se encuentran presentes en la naturaleza, y de la cual se obtienen por procedimientos físicos o mecánicos. Dentro de las fibras naturales se puede diferenciar entre fibras de origen animal, fibras de origen vegetal y fibras de origen mineral. En general, se destinan a la elaboración de textiles y también para otros usos, como fabricación de cuerdas, mangueras de incendios (cáñamo) o materia prima en la elaboración del papel (esparto), etc.

4.3.1. Fibras de origen animal

Las fibras de origen animal proceden de secreciones, como en el caso de la seda, o de estructuras epidérmicas denominadas también *faneras*, que incluyen el pelo y la lana. Todas ellas son proteínas, es decir, largas cadenas de α aminoácidos unidos mediante enlaces peptídicos.

Las estructuras *faneras* son estructuras visibles que se encuentran en la piel de los animales o que sobresalen de ella. Las uñas y pelos de los seres humanos, y las uñas, cuernos, pelos, pezuñas, etc, en los animales, serían algunas de estas estructuras.



Las proteínas animales son resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos y en determinadas condiciones a algunos ácidos inorgánicos, como el ácido sulfúrico. Por el contrario, son muy sensibles a los álcalis, de forma que una base fuerte, como el hidróxido de sodio, podría llegar a disolverlas por completo. También agentes oxidantes, como el cloro o los hipocloritos presentes en productos blanqueadores, las pueden alterar. Arden lentamente, desprendiendo un olor a cuerno quemado.

Las dos proteínas que forman parte de la estructura de estas fibras son la *queratina* presente en la lana y el pelo, y la *fibroína* presente en la seda, ambas de carácter fibroso. La queratina es una proteína rica en azufre, en la que los aminoácidos más abundantes son ácido glutámico (16,0%), cistina (11,8%), leucina (9,7%) y serina (9,5%), mientras que la fibroína, contiene en su estructura gran proporción de glicina.

Seda

La seda pura, ya sea salvaje o cultivada, está formada por un 75% de fibroína y un 25% de sericina, una proteína globular adhesiva que aglutina a la fibroína. La seda se obtiene a partir de los capullos que el gusano de la seda (*Bombyx mori*), fabrica para la fase de crisálida o pupa (figura 4.4). Para obtener la seda, estos capullos, antes de que finalice el ciclo biológico, se introducen en agua caliente para eliminar la sericina y luego se hilan, siendo los únicos filamentos de origen natural que alcanzan más de 1 Km de longitud. Si, por el contrario, el ciclo biológico se completa, la crisálida emerge rompiendo el capullo que queda destrozado. La seda que se recoge entonces suele ser de peor calidad, siendo la seda salvaje o seda Thussah, la más común de ellas.

La alta proporción de glicina, aminoácido presente en la estructura de la fibroína hace que las fibras de seda sean fuertes y resistentes a la tracción, más que el acero del mismo diámetro. La seda tiene escasa elasticidad y es sensible a la luz solar. Su baja conductividad hace que acumule



FIGURA 4.4. Capullos del gusano de la seda, principal especie cultivada para la producción comercial de seda.

cargas estáticas y al mismo tiempo permite que el aire caliente se mantenga cerca de la piel. Tiene gran capacidad para adsorber los colorantes y se usa fundamentalmente para fabricar prendas de vestir, alfombras, cortinas, sutura quirúrgica y como soporte para escribir.

Investigadores japoneses han desarrollado una seda híbrida la «Spider silk». Se trata de una seda muy resistente con aplicaciones en el sector textil y quirúrgico sobre todo, obtenida mediante ingeniería genética combinando genes de arañas y gusanos.

Pelo

Aunque en un sentido amplio todas las fibras animales que se utilizan en la industria textil, a excepción de la seda, se pueden denominar genéricamente como «pelo», se reserva el termino «lana» para hacer referencia al pelo de las ovejas. Dando un corte transversal al tallo del pelo es posible observar tres capas: la médula, que es la parte más interna y está formada por células queratinizadas, débilmente unidas. A continuación y rodeando la médula, se hallan las células del córtex o parte intermedia del pelo y, finalmente, la cutícula, capa escamosa más externa y fuertemente adherida al córtex. La presencia o no de médula, su forma (continua, discontinua o fragmentada), la relación diámetro médula/diámetro pelo (que se conoce como índice medular) y la forma o el número de capas que conforman la cutícula, son parámetros útiles a considerar en su identificación.

Las fibras de pelo más comunes son: lana (ovejas), angora (conejos de angora), mohair (cabra de angora o *Capra hircus aegagrus*) y cachemir (originalmente de la cabra asiática o *Capra hircus laniger*) (figura 4.5), camel (camellos o dromedarios), alpaca, llama y vicuña (mamíferos de la familia camelidae, domésticos los dos primeros y salvaje la vicuña. Estas fibras varían en cuanto a la longitud y el diámetro del pelo y algunas, como el mohair y la lana, carecen de médula. Poseen cierta resistencia al ataque de hongos y bacterias, aunque son vulnerables al ataque de insectos. Son excelentes aislantes térmicos y no acumulan electricidad estática.

Su uso es para tejidos, siendo el pelo de las ovejas uno de los más utilizados. El de la llama es resistente a la humedad y posee alta capacidad aislante, y el de vicuña es adquirido principalmente por las firmas de alta costura debido a su alto precio.



FIGURA 4.5. Conejo de angora, cabra de angora y cabra cachemira australiana.

El pelo de animales de compañía (perros, gatos), de granja (caballos, vacas) o el pelo humano son también en muchas ocasiones objeto de interés forense.

4.3.2. Fibras de origen vegetal

Proceden de las plantas, siendo sus principales constituyentes la celulosa, un polisacárido formado exclusivamente por unidades de β -glucosa (figura 4.6), y la lignina, el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal después de los polisacáridos. Otros componentes son: hemicelulosa (heteropolisacárido formado por xilosa y otros monosacáridos), pectina, compuestos hidrosolubles, grasas y ceras. El diferente contenido de celulosa/lignina en una fibra es uno de los parámetros utilizados en su identificación.

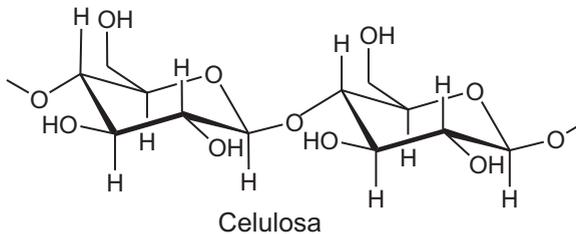


FIGURA 4.6. Uno de los componentes de las fibras vegetales.

Al igual que las fibras animales, estas fibras son resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos y sensibles a los ácidos inorgánicos fuertes y a los productos blanqueadores. Son, sin embargo, y a diferencia de las anteriores, resistentes a los álcalis. Arden rápidamente y desprenden un olor a papel quemado.

Teniendo en cuenta la parte de la planta de la que proceden, se subdividen en tres grupos: fibras de los frutos o semillas, fibras de los tallos y fibras de las hojas.

Fibras de frutos o semillas

Algodón. Se obtiene de la semilla de varias especies del género *Gossypum* original de la India. Tiene estructura cristalina y su contenido en celulosa es aproximadamente del 92%. Sus fibras están formadas por células tubulares con una serie de convoluciones o dobleces en forma de cinta que la caracterizan (figura 4.2). Se tiñe fácilmente con colorantes azoicos, complejos metálicos, etc. Su uso en la industria es para fines textiles. Tiene la ventaja de no acumular electricidad estática, ser fresca en verano y con alta resistencia al rasgado. Sin embargo, es relativamente rígida y no se recupera bien de la deformación, por lo que tiende a arrugarse con facilidad y también es vulnerable a hongos y bacterias.

Otras fibras incluidas en este grupo son las de *Kapoc o mirahuano*, obtenidas de las vainas de las semillas de un árbol de la familia de los baobah (figura 4.7). Es ligera, repele el agua y se utiliza en rellenos de tapicería, chalecos salvavidas y material aislante.

Fibras de los tallos

Cáñamo. Fibra fuerte y de gran resistencia utilizada en la fabricación de tejidos bastos, cuerdas y lonas para velas. (figura 4.7).

Yute. Su contenido del 13% en hemicelulosa hace que aumente su sensibilidad a los ácidos y álcalis. Se utiliza en tejidos para embalaje, sacos, cordonería y esteras. Se tiñe fácilmente con colorantes derivados del alquitrán de hulla (colorantes azoicos, antraquinonas, quinolinas etc.). (figura 4.7).

Lino. Tiene mucho menor contenido en celulosa que el algodón (70%). Al microscopio presenta una superficie característica, lisa e interrumpida por nudos a intervalos regulares (figura 4.2). Fácil de teñir, no acumula electricidad estática, es resistente al calor y la humedad y agradable al tacto (1-1,5% de ceras). Presenta, sin embargo, fuerte tendencia a arrugarse al ser una fibra poco elástica y flexible. Sus usos principales son para ropa de cama, telas para velas, manteles y prendas de vestir.



FIGURA 4.7. Semilla de Kapok (*Ceiba pentandra*), Cáñamo (tallo de *Cannabis sativa*) y planta del yute (*Corchorus capsularis*).

Fibras de las hojas

Esparto o **atocha**. Se obtiene de la *Stipa tenacissima*, planta de la familia de las gramíneas que se recolecta en verano. Se utiliza en cordelería, para la fabricación de esteras, cestas, estopas para escayolas y para la industria del papel.

Sisal. Se obtiene de la *Agave sisalana*, planta originaria de Yucatán, aunque actualmente Brasil es el mayor exportador mundial. Se destina a la producción de sogas, cuerdas y sacos, siendo su producción anual como agrofibra la más importante después del algodón.

Cáñamo de manila o **abacá**. Producido por la planta *Musa textiles* nativa de Filipinas y de la misma familia que el plátano, pero de frutos no comestibles. Fibras de gran resistencia y durabilidad que se destinan a la elaboración de tejidos las más finas y las más bastas para fabricación de cuerdas.

4.3.3. Fibras de origen mineral

Son de origen inorgánico y se obtienen de minerales de estructura fibrosa, cuya presencia en la naturaleza es pequeña. Entre ellas, las zeolitas, sepiolitas y wollastonitas, aunque las más frecuentes y conocidas son las fibras de asbesto. La palabra asbesto que viene del griego, significa incombustible y con ella se designa a un grupo de seis minerales diferentes, de los cuales la crisolita es la forma más importante (90% de la producción total). Los otros cinco tipos, agrupados bajo la denominación de anfíboles son:

crocidolita, amosita, actinolita, tremolita y antofilita. Formados todos ellos por silicatos, sus fibras son largas, finas, flexibles y resistentes a las altas temperaturas por lo que fueron muy utilizados en materiales de construcción y textiles ignífugos y aislantes. Desde 2005 y debido a su clasificación como producto cancerígeno, su uso está prohibido en casi todos los países.

4.4. FIBRAS MANUFACTURADAS: TIPOS Y PROPIEDADES

Las fibras procedentes de animales y vegetales fueron las únicas empleadas por el hombre, desde tiempos remotos y durante mucho tiempo para la elaboración de ropa y adornos, adquiriendo con ello cierta destreza en los procesos de hilado y teñido. A principios del siglo XIX comenzó en Europa el desarrollo de las fibras manufacturadas, también denominadas de origen químico, con la fabricación del rayón (una fibra artificial, conocida y vendida hasta 1924 como «seda artificial») y posteriormente continuó con la de las fibras de acetato de celulosa. La gran demanda de estas fibras, muchas veces con propiedades muy concretas, unido a la escasez de algodón como consecuencia de la guerra de secesión americana, hizo que a finales del siglo XIX su desarrollo y producción se disparase. En 1927 aparece la primera fibra sintética, el nailon, aunque no fue hasta terminada la Segunda Guerra Mundial cuando comienza su producción a gran escala.

En la categoría de las fibras manufacturadas se distinguen tres grupos: *fibras artificiales*, *fibras sintéticas* y «*otras fibras*», grupo denominado así porque, a diferencia de los dos primeros, las fuentes de estas fibras no son realmente polímeros.

4.4.1. Fibras artificiales

Se obtienen a partir de polímeros naturales como la celulosa, la caseína, o de algas marinas, con el objetivo de introducir mejoras respecto a las fibras naturales o bien conseguir productos más económicos. Son las fibras «regeneradas». Su obtención, a grandes rasgos, conlleva la extracción del polímero, seguida de la coagulación de la fibra, generalmente en medio ácido. Cronológicamente hablando, ocupan la distancia entre los biopolímeros y los polímeros sintéticos.



Fibras de celulosa regenerada

Su componente es la celulosa de la madera procedente de árboles, como el pino, la picea y el eucalipto, cuyo contenido en celulosa es aproximadamente de un 50% de su peso. Finalizado el proceso de regeneración se obtienen fibras de celulosa, como la viscosa, modal, o la cuproamoniaca que resulta de la combinación de celulosa con cobre y amoníaco. También fibras de derivados de celulosa, como acetato y triacetato denominadas «Esteres de celulosa».

Aunque las propiedades de estas fibras varían de unas a otras presentan, en general una superficie estriada y una sección transversal irregular, excepto las fibras cupro y modal cuya sección es redonda. Dentro de este grupo la *viscosa o Rayón normal* es la de mayor producción y aunque sus propiedades son inferiores a las del algodón, presenta un menor coste. El Rayón se utiliza en la fabricación de textiles, para decoración y en la industria (material quirúrgico y armazón de neumáticos), mezclada a menudo con algodón, nailon, lana o poliéster.

La fibra de *Lyocell*, también denominada Tencel, es una forma de rayón comercializada en 1991, resultado de un programa de investigación encaminado a obtener fibras con mejores propiedades que las de las ya existentes, utilizando para ello un proceso libre de productos intermedios. Son fibras fuertes, blandas, biodegradables, resistentes a la humedad, que no se arrugan y que se utilizan en la confección de pantalones, vestidos y *jeans*.

Fibras de proteína regenerada

Se obtienen de las proteínas de la leche (caseína), del cacahuete, de la soja etc. El proceso conlleva la extracción de la correspondiente proteína con una disolución alcalina y posterior coagulación de la misma en medio ácido. Estas fibras actualmente están en desuso.

Alginatos

Son polímeros orgánicos derivados del ácido algínico. Se obtienen de las algas marinas de distintas especies entre ellas las *Laminarias* en forma de alginato de calcio (figura 4.8). Son fibras solubles en carbonato de sodio, no inflamables y cuya principal aplicación es para material quirúrgico, aun-

que tiene otras también importantes en la industria alimentaria, como por ejemplo, espesante en cremas.

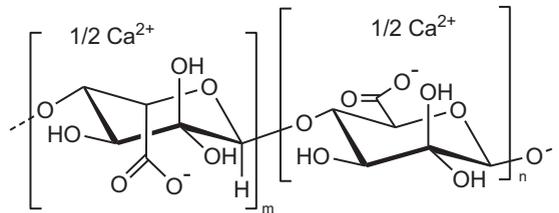


FIGURA 4.8. Alginato de calcio.

4.4.2. Fibras sintéticas

Son polímeros orgánicos, es decir macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas o *monómeros*. El polímero, puede estar formado de un único tipo de monómero y se denomina *homopolímero* o de varios tipos, hablando entonces de *copolímero* o *heteropolímero*. La reacción de formación de un polímero a partir de sus monómeros es la *reacción de polimerización* y, en función del tipo de reacción, podemos distinguir entre:

Polímeros de adición. Son el resultado de la reacción entre monómeros que contienen dobles enlaces (figura 4.9), siendo la masa molar del polímero un múltiplo exacto de la masa molar de los monómeros. El grado de polimerización alcanzado en estos compuestos es generalmente más alto que el alcanzado por los polímeros de condensación, siendo también más estables debido a la fortaleza de los enlaces C-C a lo largo de la cadena. Entre ellos se incluyen los derivados poliolefinicos y polivinílicos.

Polímeros de condensación. Se obtienen por reacción entre monómeros con dos grupos funcionales (figura 4.10). En la reacción de condensación se pierde una molécula pequeña (H_2O en los casos del nailon 6,6 y el Kevlar, y CH_3OH en el del Dacrón) por lo que la masa molar del polímero no es necesariamente un múltiplo de la masa molar del monómero. En este grupo se incluyen poliamidas, poliuretanos y poliésteres. Las unidades que se repiten se encuentran unidas mediante enlaces tipo, amida, éster y uretano ($-NH-COO-$). Son fibras susceptibles a la hidrólisis en medio ácido y básico, resultando más fácilmente degradables que los polímeros de adición.



Monómero	Unidad del polímero	Nombre
$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Polietileno
$\text{CH}_2=\text{CHCl}$	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$	Policloruro de vinilo (PVC)
$\text{CF}_2=\text{CF}_2$	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	Politetrafluoroetileno (Teflón)
$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{C}\equiv\text{N} \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{C}\equiv\text{N} \end{array}$	Poliacrilonitrilo (Orlon, Acrilán)
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{COCH}_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\ \\ \text{CHOCH}_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	Polimetacrilato de metilo (Plexiglas, Lucite)

FIGURA 4.9. Algunos polímeros de adición.

Monómeros		Unidad repetitiva
$\text{HOCO}(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$ Ácido adípico	+ $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_6\text{NH}_2$ 1,6-Hexanodiamina	$-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-$ Nailon 6,6
$\text{HOOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOH}$ Ácido 1,4-bencenodicarboxílico	+ $\text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}$ 1,4-Diaminobenceno	$-\text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$ Kevlar
$\text{H}_3\text{COOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOCH}_3$ Tereftalato de dimetilo	+ $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ Etilenglicol	$-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$ Dacrón

FIGURA 4.10. Algunos polímeros de condensación.

Los polímeros pueden ser lineales, formados por una única cadena de monómeros, presentar ramificaciones de mayor o menor tamaño o, incluso, presentar entrecruzamientos. En el caso de los copolímeros los diferentes monómeros A y B pueden disponerse al azar (A-B-B-B-A-A-B-A-), en bloques (A-A-A-B-B-B), de forma alternada (A-B-A-B), etc.

De todo lo anteriormente expuesto, es decir, de las propiedades químicas de los monómeros, de su forma de unión y del tipo de organización, dependerán las propiedades físicas y químicas del polímero.

A continuación se hará una breve referencia a aquellas fibras sintéticas más comunes.

Fibras de Poliamida

Entre ellas, el *nailon 6* (polímero del ácido 6-aminohexanoico) y el *nailon 6,6* (figura 4.10). La proximidad entre las cadenas del polímero debido a los enlaces de hidrógeno entre grupos amida, unido a la carencia de sustituyentes voluminosos, hace que esta fibra posea un alto grado de cristalinidad que se traduce en una gran elasticidad y resistencia a la tracción y a la abrasión. Relativamente estable a los álcalis, pero sensible a los ácidos fuertes (hidrolizan el enlace amida) y a la luz solar. Se usa para cepillos de dientes, calcetería, cuerdas y pesca.

El *kevlar*² es una aramida, una poliamida aromática resultado de condensar el ácido tereftálico y la *p*-fenilendiamina, que combina una gran resistencia tanto mecánica como al calor con una ligereza de peso. Tiene una amplia gama de aplicaciones en la fabricación de chalecos antibalas y contra ataques con arma blanca. También en neumáticos de alta gama e industria aeroespacial y en la construcción para dar mayor resistencia ante los tornados y las explosiones.

Fibras de Poliéster

Son polímeros lineales, resultantes de la condensación de un diol y un ácido dicarboxílico. El más conocido es el tereftalato de polietileno (TPE), cuyas cadenas están unidas entre sí por fuerzas de Van der Waals (debido al carácter débilmente polar del grupo carbonilo). De nombre comercial *Terlenka*, *Dacrón* o *Tergal* son fibras con alto grado de cristalinidad y que presentan gran resistencia a agentes químicos, biológicos y a la abrasión. Son también resistentes a los ácidos, pero sensibles a los álcalis (enlace éster). Son más inflamables que el nailón 6,6 pero más resistentes a la luz solar. Se usa en prendas de vestir y ropa de cama, a menudo mezclado con lana o algodón.

Fibras de Poliolefinas

Polímeros que contienen al menos un 85% en masa de una unidad de olefina. Entre ellas, el *polietileno* (PE), el *polipropileno* (PP), obtenidas de

² La química Stephanie Kwolek, fallecida en Junio de 2014, fue la inventora de la fibra kevlar en la década de 1960 cuando trabajaba para la empresa química Du Pont.



productos derivados del petróleo, eteno y propeno respectivamente. En función de las condiciones del proceso de polimerización es posible obtener dos tipos de polietileno, de baja densidad (LDPE) y de alta densidad (HDPE). El alto grado de polimerización y de empaquetamiento les confiere a estas fibras una gran tenacidad. Son cristalinas, hidrófobas y resistentes al ataque de agentes corrosivos. El polietileno se degrada fácilmente por acción de la luz solar por lo que tiene pocas aplicaciones textiles, utilizándose preferentemente para filtros químicos y material quirúrgico. Las fibras de polipropileno debido a su naturaleza hidrófoba lavan y secan fácilmente y son buenos aislantes térmicos, utilizándose en la manufactura de prendas de vestir, alfombras y cuerdas.

Fibras de poliuretano

Genéricamente denominadas «elastanos». Son polímeros complejos formados por combinación de segmentos flexibles que les aporta elasticidad (puede alargarse hasta tres veces su longitud) y segmentos rígidos que les confiere resistencia. «Licra» es el nombre comercial con el que la mayor compañía productora, la compañía Du Pont registró esta fibra. Son resistentes a agentes corrosivos y fácilmente atacables por álcalis, como las fibras de poliéster. Se destinan principalmente a la fabricación de ropa interior, ropa de deporte y de esport.

Derivados polivinílicos

Acrílicos y modacrílicos. En lo que a nivel de producción se refiere el poliacrilonitrilo, formado por unidades repetidas de acrilonitrilo ($-\text{CH}_2\text{CHCN}-$), es el polímero de adición más importante. En base al contenido en peso de unidades de acrilonitrilo, es posible distinguir entre: fibras acrílicas (al menos un 85%) y fibras modacrílicas (entre un 35 y un 85%). Los homopolímeros de acrilonitrilo suelen copolimerizarse con otros monómeros para facilitar su teñido. Aunque fácilmente inflamables son las fibras textiles más resistentes a la luz solar.

Clorofibras. La más común en la actualidad es el policloruro de vinilo o PVC. Su característica más sobresaliente y que determina sus aplicaciones como fibra, es su resistencia a la llama.

Fluorofibras. La más común es el politetrafluoroetileno (PTFE), de nombre comercial Teflón. Fibras con alta organización y empaquetamiento

por lo que presentan una gran densidad. El carácter inerte de los átomos de flúor y la gran simetría hace que resulte una fibra resistente a agentes químicos corrosivos y al calor. Se destinan a usos muy especializados como filtros de gases o líquidos a altas presiones y temperaturas o en condiciones de fuerte corrosión.

4.4.3. Otras fibras

La fibra de vidrio, compuesta de SiO_2 , Na_2CO_3 y Ca_2CO_3 , es la única fibra de origen mineral que se utiliza tejida a gran escala. Se destina a construcción y tuberías. Las de metales, cobre, oro y plata se emplean entretejidas con otras fibras para enriquecer tejidos.

4.5. INVESTIGACIÓN FORENSE DE FIBRAS

Haciendo referencia de nuevo a una frase de Locard «las evidencias físicas halladas en la escena de un suceso son testigos mudos de lo que allí sucedió y nunca se equivocan». En el caso concreto de las fibras su pequeño tamaño hace que sean difíciles de localizar y a la vez fáciles de perder. También son fácilmente transferibles, por lo que se pueden producir contaminaciones que pueden llegar a anular una sentencia o incluso a implicar a un inocente. Por lo tanto, de la correcta recuperación, conservación y posterior análisis en el laboratorio, de estas evidencias, dependerá el éxito de la investigación.

En este contexto, se entiende por «*contaminación*» la transferencia de fibras que se produce entre dos ítems, en un periodo de tiempo posterior a la transferencia producida en el propio suceso (ya sea en el escenario del mismo, en el transporte de pruebas, de sospechosos o en el propio laboratorio).

4.5.1. Búsqueda de pruebas

La longitud, grosor y color de las fibras influirán en su localización. Unas veces se localizarán a simple vista y otras veces será necesario hacer uso de fuentes de luz blanca, luz UV o láseres. En cualquier caso realizando



un barrido metódico de la escena del suceso y a la vez haciendo suposiciones acerca de lo que se busca y donde localizarlo. Así, las fibras adheridas a la ropa se van cayendo rápidamente, sin embargo en las costuras o en los bolsillos pueden permanecer más tiempo.

4.5.2. Recogida de pruebas

Existen diferentes procedimientos útiles para la recuperación de fibras y su elección, a juicio del personal especializado, vendrá determinada por el tipo y circunstancias del suceso. En el caso de existir un cadáver, las pruebas se recogen siempre antes de su levantamiento. A continuación citaremos una serie de procedimientos, los cuales, muchas veces, no se utilizan de forma aislada sino combinados.

Método de recuperación directo. Es el más sencillo y es el que se utiliza en el caso de fibras fácilmente visibles, como pueden ser las encontradas en una ventana rota, una alambrada, o en un arma. La búsqueda se realiza con ayuda de una lupa, unas pinzas y a veces una luz especial y el material encontrado se recoge, se coloca entre hojas de papel y se introduce en bolsas de plástico correctamente etiquetadas para su posterior análisis. Este método presenta la ventaja de que los restos contenidos en las bolsas generalmente no tienen que separarse de otros, pudiendo realizarse el análisis directo de los mismos. En el caso de fragmentos más pequeños, será necesario recurrir a otros procedimientos.

Uso de cintas adhesivas transparentes. Fue propuesto en 1951 por Freisulzer y al contrario que en el caso de fragmentos de pinturas, es muy útil para la recogida de este tipo de indicios ya que permite recuperar fibras en diferentes superficies. En el caso de superficies con fibras propias será necesario utilizar cintas con baja adhesividad. Finalizado el proceso de recogida, se coloca todo el conjunto sobre una lámina de plástico y se empaqueta para su traslado al laboratorio. Allí y con la ayuda de un estereomicroscopio se marcan las zonas de la cinta donde se encuentran las fibras, se cortan esas áreas con un escalpelo y se libera la fibra con un disolvente adecuado. Aunque no es un procedimiento recomendado para el caso de superficies grandes ni irregulares y tampoco mojadas o fuertemente contaminadas, es un método muy utilizado y seguramente el de elección en la recuperación de fibras, mejorado por el reciente desarrollo de sistemas automáticos.

Utilización de vacío. Esta técnica utiliza un equipo que funciona a vacío y que lleva una serie de filtros incorporados. Es útil para la búsqueda de partículas de pintura, cristal o suelos en zonas de difícil acceso y, en el caso de fibras, para rastrear superficies grandes. Su eficacia depende de la máquina utilizada, aunque presenta la desventaja de su poca selectividad y posible contaminación si no se limpia bien después de cada uso.

Peinado. Se realiza con un peine en el que se introduce algodón entre los dientes y se utiliza para extraer fibras del pelo. Una vez utilizado, este dispositivo se examina con un estereomicroscopio recuperándose las fibras encontradas y colocándolas en un portaobjetos. El color blanco del algodón contribuye a la visualización de las fibras.

4.5.3. Cómo minimizar el impacto de las contaminaciones

Esto se lograría siguiendo una serie de medidas, entre ellas:

- Mantener separados a la víctima y al sospechoso hasta que todas las pruebas se hayan recogido.
- Destinar distinto personal para revisar la vestimenta de la víctima y del sospechoso.
- Empaquetar y sellar en el lugar del suceso cualquier prueba encontrada, siempre que sea posible.
- Utilizar kits y materiales diferentes para el tratamiento de la víctima y del sospechoso.
- Empaquetar y sellar el material perteneciente a la víctima y el sospechoso de forma que no pueda existir ningún contacto entre ellos.
- Equipar al personal encargado de recoger pruebas con guantes y ropa de protección adecuados.

4.6. IDENTIFICACIÓN Y COMPARACIÓN DE FIBRAS

Antes de comenzar en el laboratorio el análisis de las muestras recogidas, es muy útil para el investigador disponer de los detalles relativos al tipo de suceso y a la escena donde se ha producido el mismo. La identificación



del tipo de fibra perteneciente a la víctima y la comparación con la de un posible sospechoso es una forma valiosa de demostrar una asociación entre personas y/o lugares. Esto se realiza sometiendo las muestras a diferentes ensayos, de forma que se pueda obtener información acerca de la clase genérica a la que pertenecen las fibras o del tipo específico de que se trata.

Existen diferentes métodos de análisis que se pueden emplear en la identificación y comparación de fibras. En el protocolo a seguir, y como muestra la figura 4.11, se tendrá en cuenta, en primer lugar, si la fibra es natural o manufacturada, siendo para estas últimas, más adecuados los ensayos relacionados con su estructura química que con su forma física.

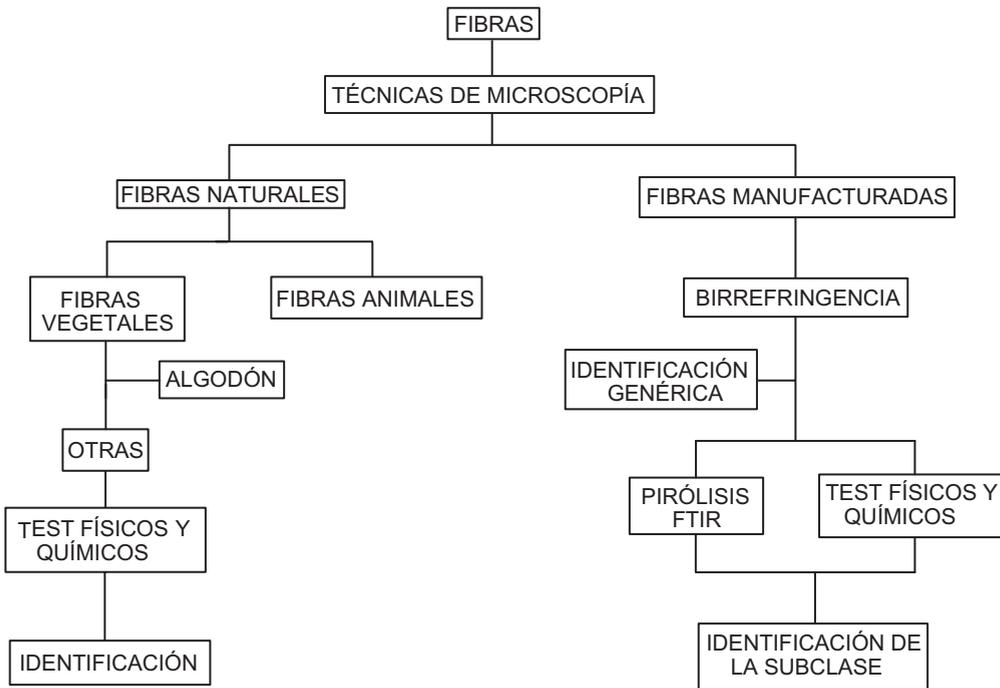


FIGURA 4.11. Esquema de análisis para la identificación de una fibra.

También se ha de considerar el tipo de material de partida: si se trata de un manojo de fibras, o de una pieza de tela, si es material adherido a cinta adhesiva, o si se ha recogido a vacío, así como la cantidad de muestra disponible y el carácter destructivo o no de la técnica.

4.6.1. Técnicas de microscopía

En general, y cuando una fibra llega al laboratorio el primer paso consiste en observar sus características con un microscopio. Los más utilizados para este tipo de indicio son:

Estéreomicroscopio. Es un microscopio de luz (ver tema 2) que proporciona información acerca de la vista longitudinal y la sección transversal de una fibra y que permite caracterizar fácilmente fibras naturales como la lana, la seda, el pelo o el algodón, mientras que para otras como el cáñamo, yute o sisal es necesario además recurrir a otros tests (físicos o químicos) complementarios. Cuando se trata de fibras manufacturadas, como es el caso del nailon, poliéster o acrílicas, este método aporta algunos datos sobre ellas, aunque no suficientes para averiguar su composición.

Microscopio de luz polarizada. Está basado en el comportamiento que tienen ciertos materiales al ser observados con luz polarizada. Esta técnica, permite determinar la birrefringencia en materiales anisótropos, caso de las fibras manufacturadas. Cuando sobre un material anisótropo incide un rayo de luz polarizada, este se separa en dos rayos denominados rayo ordinario y rayo extraordinario (birrefringencia), polarizados en direcciones perpendiculares entre sí y que se propagan con distinta velocidad como si el material tuviera dos índices de refracción diferentes n_e y n_o . La diferencia de recorrido o retardo, Δn , que se produce entre el rayo rápido y el lento, es función de la birrefringencia ($n_e - n_o$) y del diámetro, d , de la fibra y viene cuantificada por la relación:

$$\Delta n = d (n_e - n_o)$$

La combinación de las diferentes longitudes de onda que atraviesan la muestra da lugar al «*color de interferencia*» que para una muestra dada es un valor del retardo. Identificado este color, y utilizando la tabla de colores de interferencia de Michel-Levy se determina la birrefringencia.

El valor de la birrefringencia permite determinar la *clase* a la que pertenece la fibra. Ejemplos: birrefringencia aproximada para: Viscosa = 0,025 (muy alta); Poliester = 0,195 (extrema).

Microscopio electrónico de barrido o SEM. Utiliza un haz de electrones para formar una imagen en lugar de un haz de luz, como en el caso del estereomicroscopio. Tiene una gran resolución, lo que facilita la percepción de detalles que han podido pasar inadvertidos en el microscopio óptico, y también una gran profundidad de campo, por lo que puede enfocar a la vez una gran cantidad de muestra. Permite obtener imágenes ampliadas y en tres dimensiones y por tanto observar los detalles y modificaciones de la superficie, la urdimbre y la fractografía (figura 4.12) de fibras rotas.



FIGURA 4.12. Fibras de algodón, alpaca y lana vistas al microscopio SEM.

Microscopio de fluorescencia. Este microscopio hace uso de la fluorescencia, propiedad que tienen ciertos grupos funcionales, denominados fluoróforos o fluorocromos de absorber luz de una longitud de onda determinada y luego emitir otra luz de una mayor longitud de onda. La fluorescencia no es una característica intrínseca a la naturaleza de la fibra, sino que se debe a determinados compuestos presentes, como tintes, deslustrantes, detergentes etc, por lo que esta técnica será útil siempre que exista una muestra con la que comparar.

4.6.2. Técnicas espectroscópicas

Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). Se trata de una técnica muy precisa para la que se requieren cantidades de muestra muy pequeñas y que ha mostrado ser de gran utilidad en la determinación de los polímeros y copolímeros presentes en las fibras, lo que facilita su identificación. La información que proporciona junto con la obtenida sobre la forma de la sección transversal puede permitir identificar la marca y procedencia de la fibra. Esta técnica, junto con los ensayos de solubilidad, son los métodos preferidos para la caracterización de fibras manufacturadas.

Microespectrofotometría. Los microespectrofotómetros se pueden configurar para medir la transmitancia, absorbancia, fluorescencia, luminiscencia o luz polarizada (en el caso de fibras que presentan birrefringencia), en muestras de diámetro inferior a 1 μm , utilizando diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (visible, UV e infrarrojo cercano). Tiene la ventaja de no ser una técnica destructiva. Permite comparar espectros y colores «in situ» en base a parámetros matemáticos y de acuerdo a esos valores definir el color, ignorando el efecto de la intensidad percibida y salvar así la dificultad que entraña a veces separar colores en algunas fibras, como es el caso del algodón (uniones covalentes fuertes).

Microespectroscopia FTIR O FT Raman. Consiste en el acoplamiento de sistemas de microscopía óptica a los espectrómetros de infrarrojo o de Raman. Constituye un potente método analítico de sustancias poliméricas, permitiendo diferenciar subclases de fibras (acrílicas y poliamidas). Proporciona información sobre las especies químicas presentes en el compuesto y también sobre la ordenación de las cadenas poliméricas, tensión, grado de cristalinidad, orientación y homogeneidad de las fibras, etc. Es posible además seguir la evolución de estos parámetros después de someter a la muestra a tratamientos térmicos, tensiones, etc., efectos que se suelen producir en zonas muy pequeñas. Existen bases de datos con los espectros de los polímeros más frecuentes en las fibras, lo que facilita la identificación en ausencia de muestras con las que comparar.

4.6.3. Técnicas cromatográficas

Muy útiles para el análisis de los colorantes presentes en las fibras.

Cromatografía de capa fina (thin layer chromatography o TLC). Esta técnica se utiliza para analizar los colorantes de las fibras. En ella, la muestra disuelta en un disolvente orgánico de bajo punto de ebullición, se siembra en una placa cromatográfica, que a su vez se introduce en una cubeta con uno o una mezcla de eluyentes orgánicos apolares. A medida que el eluyente asciende por capilaridad, la muestra se distribuye entre la fase móvil, líquida, y la fase estacionaria, sólida. Cuando el frente del disolvente está a una distancia aproximada de 1 cm del final de la placa, esta se saca de la cubeta y se marca con un lápiz la posición alcanzada por el disolvente (figura 4.13) antes de que se evapore.

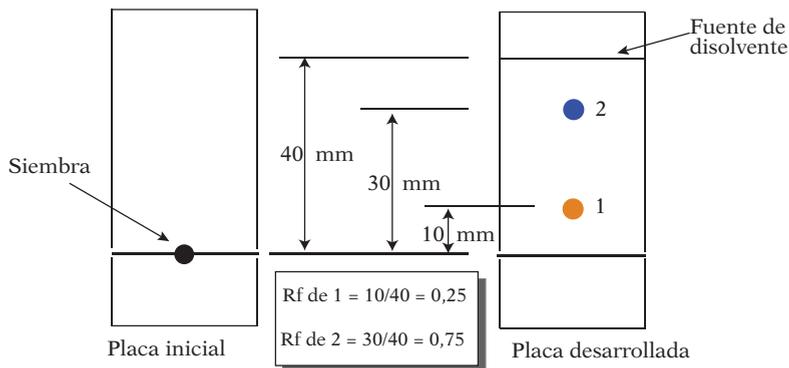


FIGURA 4.13. Determinación experimental del R_f .

Los componentes separados aparecerán (de forma natural si son coloreados o utilizando reveladores si no lo son) como manchas a lo largo de la placa. La posición de un compuesto sobre una placa se expresa mediante la constante R_f (Ratio of Front), que se define como:

$$R_f = \frac{\text{Distancia alcanzada por el compuesto}}{\text{Distancia alcanzada por el frente del disolvente}}$$

Un compuesto dado tendrá siempre un valor fijo y característico del R_f o tiempo de retención, siempre que el espesor de la placa, fase móvil, fase estacionaria y cantidad de muestra se mantengan constantes.

De esta forma el valor del R_f de una muestra problema puede compararse, en las mismas condiciones, con los valores de R_f de sustancias estándar. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- Si los R_f son diferentes, con toda seguridad no se trata del mismo compuesto.
- Si los R_f son iguales, los compuestos pueden ser iguales o no, y la muestra tiene que someterse a otras pruebas para confirmar su identidad.

Cromatografía líquida de alta resolución. (High performance liquid chromatography o HPLC). Utilizada también para la separación y comparación de los colorantes de las fibras. Es más sensible que la técnica anterior, pero

no suele usarse como rutina debido a su mayor coste y a que los disolventes orgánicos requeridos para la extracción de los colorantes no son muy compatibles con los que se usan en este tipo de columna.

4.6.4. Otras técnicas

Pirólisis. El empleo de hornos a alta temperatura y atmósfera inerte, conduce a la descomposición de las sustancias, proceso que se conoce como *pirólisis*. Los fragmentos moleculares que se producen se separan mediante cromatografía de gases (CG) y pueden analizarse a continuación mediante espectrometría de masas, espectroscopía infrarroja, espectroscopía Raman o detector de ionización de llama. Es una alternativa a la microscopia infrarroja aunque de naturaleza destructiva y que requiere gran cantidad de muestra. Particularmente útil para el análisis estructural de polímeros, resinas, cauchos y plásticos.

Ensayos de coloración. Este método consiste en observar a través de un microscopio las características de las fibras y el color cuando se tiñen con cloruro o yoduro de cinc o con ácido floroglucínico (ácido 2,4,6-trihidroxibenzoico). El yute se colorea de marrón cuando se utiliza cloruro o yoduro de cinc y de color magenta cuando se trata con ácido floroglucínico.

Comportamiento frente al calor (análisis térmico). Esta prueba permite conocer la composición química de una fibra, pero no identificar las mezclas. Se coloca la muestra en un microscopio y aplicando calor de forma progresiva se observará si las fibras se encogen, funden o arden, anotando las temperaturas.

Otra forma de diferenciarlas es observar su comportamiento al someterlas directamente a la llama, al apartarlas del fuego y también el aspecto de los residuos que dejan. Se anotará el tiempo que tardan en arder, si funden, si se queman, si se rizan, y si continúan o no ardiendo fuera de la llama, así como el color y olor del humo que se forma y el aspecto y color de los restos que quedan. Las fibras de celulosa, como el algodón, rayón o viscosa, huelen a papel quemado y no funden ni encogen; la seda y lana huelen a cuerno quemado y funden y se rizan, y las de acetato funden y huelen a vinagre. Las fibras pueden contener retardantes de llama y estar teñidas, lo que podría alterar el olor, el aspecto y el color de las cenizas.



Ensayos de solubilidad. Se determina la solubilidad o insolubilidad de las fibras en diferentes reactivos, observando si la fibra se disuelve completamente, se ablanda o permanece insoluble. Existen unos protocolos para el orden en que se deben ensayar los disolventes, eligiendo siempre en primer lugar los más específicos. Se observará su disolución total o parcial y las posibles alteraciones en el color y el aspecto. Esta prueba permite encuadrar en una clase genérica una fibra manufacturada e identificar las fibras naturales.

Punto de fusión. Consiste en determinar en caso de que el material funda la temperatura a la que comienza a perder su forma y licua. Después se consultará en las tablas el dato obtenido.

Determinación de la densidad. Se indicará el valor obtenido y el procedimiento utilizado en su determinación.

A modo de ejemplo, la tabla 4.1 muestra el comportamiento frente al calor y a distintos disolventes, así como los valores del índice de refracción, birrefringencia, densidad y punto de fusión de las fibras de nailon 6.

TABLA 4.1. Algunas propiedades físicas del nailon 6

Comportamiento Frente al calor	Funde y se encoge por acción del calor. Arde lentamente por acción de la llama y se derrite. Continúa quemándose al retirar la llama. El residuo son bolitas duras y de color gris. Olor característico a apio.
Solubilidad	Insoluble en: ácido acético, acetona, hipoclorito de sodio, 1,4-dioxano, m-xileno, ciclohexanona. Soluble en: ácido clorhídrico, ácido fórmico, ácido sulfúrico dimetilformamida, <i>m</i> -cresol.
Índice de refracción	Longitudinal-1,568 Transversal-1,515
Birrefringencia	0,053
Densidad (g.cm⁻³)	1,12-1,15
Punto de fusión (°C)	213-225

Como resumen, los métodos adecuados para el examen de fibras deberán ser:

- Aplicables a muestras de muy pequeño tamaño.
- Preferiblemente no destructivos si la cantidad de muestra es pequeña y
- Económicamente viables, es decir ser lo más rápido y potentes posible, con el mínimo coste.

4.7. IMPORTANCIA DE LAS FIBRAS COMO EVIDENCIA

A pesar del auge e importancia que está adquiriendo en las ciencias forenses la determinación del ADN, muchas veces no se encuentran rastros que permitan su análisis. Existen situaciones concretas donde el estudio de las fibras adquiere gran importancia en el éxito de la investigación. Así, en:

- Robos con armas o ataques terroristas, las fibras pueden relacionarse con vehículos, armas, máscaras, guantes o vestimentas
- Homicidios, existe la posibilidad de encontrar fibras en el cuerpo o en la ropa de la víctima.
- Agresiones sexuales donde no existan restos de fluidos pero si posibles fibras por transferencia.
- Robos de vehículos o accidentes de tráfico en los que es importante determinar quién era el conductor.
- Valoración de la autenticidad de obras de arte, donde el análisis de tejidos en pinturas permitirá determinar la antigüedad de las obras.



EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. El equipo de técnicos forenses se desplaza a la escena de un crimen ocurrido en un domicilio particular, con el fin de localizar pruebas. Hay un cadáver en el que es posible que se haya producido una transferencia de fibras entre el asesino y la víctima. A continuación se proponen dos procedimientos para la recuperación de pruebas:

Procedimiento I. Mediante el método de la superficie adhesiva. Pasar diferentes trozos de cinta adhesiva por distintas partes de la vestimenta y de la piel de la víctima e ir las empaquetando y etiquetando en diferentes contenedores destinados a tal fin. Enviar al laboratorio para su análisis posterior.

Procedimiento II. Retirar la ropa del cadáver y embalarla. Realizar posteriormente el análisis en el laboratorio, tanto de la víctima como de la ropa.

¿Cuál será el procedimiento correcto? ¿Por qué?

2. ¿Cree que existiría alguna otra especie en el reino animal, además del gusano del género *B. Mori* (gusano de la seda), capaz de proporcionar fibras de seda?

En caso afirmativo, ponga un ejemplo, indicando si se utiliza o no industrialmente esa seda y por qué.

NOTA: Para responder a esta pregunta consulte la bibliografía que considere oportuna.

3. Cuando un tejido llega a un laboratorio forense, el primer paso consiste en determinar el origen de las fibras que lo componen. Responda a las siguientes cuestiones:

¿Que es una fibra natural?, ¿cómo se clasifican las fibras naturales? Ponga un ejemplo de cada uno de los tipos, comentando su composición, características y utilidad.

4. Indique las características más importantes a determinar en el estudio de fibras que llegan al laboratorio, procedentes de la escena de un suceso.
5. En las dos columnas siguientes se encuentran consignados una serie de datos. En la columna de la izquierda el nombre de una serie de fibras y en la de la derecha una característica que las define. Establezca la correspondencia correcta en cada caso.

A. Asbesto

1. Poliamida

B. Rayón

2. Alto contenido en queratinas

- | | |
|-----------|--|
| C. Nailon | 3. Los silicatos forman parte de su estructura |
| D. Lana | 4. Fibra artificial |
| E. Yute | 5. Fibra natural con alto contenido en lignina |

Resolución

1. El procedimiento correcto sería el primero. Si se embala la ropa, de la misma forma que existe una transferencia entre víctima y asesino también existiría una transferencia entre las distintas zonas de la ropa durante el traslado. Esto impediría conocer de forma precisa la localización exacta de los restos encontrados y por tanto supondría no tener una idea certera de cómo se ha producido el incidente.

2. Diversos grupos de insectos son capaces de producir seda, aunque actualmente sólo la obtenida a partir de los capullos de la larva *Bombyx mori* se emplea en la fabricación industrial de textiles.

El gusano salvaje *Antherea pernyi*, originario del sudeste de China produce una seda salvaje, la seda Tussah. También algunos artrópodos del orden Hymenoptera, como abejas y hormigas, producen una secreción de seda que utilizan en la elaboración de nidos. Otros artrópodos, como son las arañas, también producen seda con una resistencia incluso mayor que la que procede de los gusanos de seda. Existe, no obstante, la dificultad de criar estos insectos ya que son depredadores que reciclan la seda, es decir, que la ingieren para aprovechar sus proteínas como nutrientes y elaborar seda nueva.

3. Son aquéllas que se encuentran en la naturaleza y que aunque sean sometidas a tratamientos con los que cambiar su apariencia, conservan una estructura propia que revela su origen.

Se clasifican en animales, vegetales y minerales.

De tipo animal, se elaboran a partir de pelo, por lo que en ellas se diferenciará la médula, corteza y la cutícula. Sus principales componentes son las proteínas. Por ejemplo la lana, utilizada para tejidos.

Las vegetales se obtienen a partir de las hojas, tallos o frutos de los vegetales. Están formadas de celulosa, hemicelulosa, peptinas, ligninas, compuestos hidrosolubles, grasas y ceras principalmente. Ejemplos: algodón, lino (de uso frecuente en la producción de tejidos) y cáñamo, y yute en la elaboración de cestas.

Las minerales. Las más conocidas y utilizadas son aquellas en las que su base es el asbesto. Todas ellas contienen una estructura formada por silicatos de cadena doble, que forman fibras largas y con una gran capacidad



de resistencia. Se utilizaron en materiales de construcción y también formando parte de productos textiles capaces de soportar altas temperaturas: envases, embalajes, aislantes, etc. Actualmente su uso está prohibido debido a su clasificación como producto cancerígeno...

4. Ante una fibra desconocida se procederá a determinar:

- Si es natural o manufacturada.
- En caso de ser natural, cuál es su procedencia, animal, vegetal o mineral, y en caso de ser manufacturada o de origen químico, cuáles son los polímeros que la componen.
- Sus características más importantes.

Para ello se procederá a preparar la muestra y, mediante técnicas de microscopía, determinar la longitud, grosor, aspecto de la superficie y forma de la sección transversal. Se puede obtener también el índice de refracción y la birrefringencia utilizando el microscopio de luz polarizada.

Determinar, en el caso de que la fibra sea manufacturada, los polímeros y copolímeros presentes mediante la técnica de espectroscopía IR o Raman.

Si es coloreada, determinar el color y analizar los colorantes. También, y si se dispone de cantidad de muestra, someterla a pirólisis, observar su comportamiento frente al calor, determinar su punto de fusión, densidad y solubilidad.

Finalmente, comparar los resultados obtenidos con los de las muestras de referencia y en caso de no disponer de estas últimas, utilizar bases de datos de los diferentes parámetros analizados.

5. A-3; B-4; C-1; D-2; E-5



LECTURA

«Pashmina y shahtoosh, dos tipos de lana muy apreciados»

La pashmina es una clase de lana de cachemir. Procede de las cabras changthangi o cabras pashmina (figura superior), que habitan grandes alturas del Himalaya en la India, Nepal y Pakistán. Las fibras de pashmina son finas y delicadas por lo que son ideales para la fabricación de prendas ligeras, como bufandas y chales. Las cabras mudan la lana en primavera, que es la estación en la que se recoge y se hila y la vuelven a recuperar en invierno. Una cabra proporciona entre 80 y 170 g de fibra, que debido a su pequeño diámetro ha de ser trabajada a mano. Son fibras que no toleran mucha tensión, por lo que se mezclan a veces con un 30-50% de seda. La denominación de pashmina se utiliza para referirse tanto a la fibra pura como a las mezclas con seda. No es un nombre aceptado y las etiquetas deben ir marcadas como 100% cachemir, 70% cachemir-30% seda, etc.



El chiru es un antílope que habita en estado salvaje los altiplanos del Tibet, un hábitat con condiciones climáticas muy duras. Para soportar los vientos gélidos y las bajas temperaturas, los chirus han desarrollado un manto de lana suave y delicada, el "shahtoosh", la reina de las lanas y la más codiciada en el mundo. La forma de probar su autenticidad consiste en enrollar un chal de 1m x 2m y hacerlo pasar a través de un anillo. Como no es posible criar a este antílope, para conseguir su lana y fabricar chales (figura inferior) por los que se pagan cifras muy altas, su caza de forma furtiva y descontrolada ha hecho que se encuentre en peligro de extinción. En la actualidad está prohibida la comercialización de esta lana sin licencia.

En abril de 1999, Bharati Ashok Assomull fue condenada en Hong Kong por el magistrado David John Duffton, a tres meses de prisión y a una multa de 40.000 dólares por el comercio ilícito de esta lana.

PRUEBAS QUÍMICAS APLICADAS A LA DETECCIÓN DE RESTOS DE ACELERADORES Y DE EXPLOSIVOS



**Incendios forestales, una agresión
continua al medio ambiente**

María del Pilar Cornago Ramírez

OBJETIVOS

General

El proceso químico implicado, tanto en un incendio como en una explosión, es una reacción de combustión. Por lo tanto, se estudiarán los fundamentos químicos de dicha reacción y se destacará también la importancia que tienen, tanto la búsqueda de evidencias como su posterior análisis en el laboratorio, en el esclarecimiento de estos sucesos.

Específicos

1. Describir la química que hay detrás de un fuego.
2. Reconocer los componentes que han de estar presentes para que se produzca un fuego.
3. Definir los parámetros que caracterizan un combustible en relación con las reacciones de combustión.
4. Enumerar algunas de las pruebas que se pueden encontrar en un incendio y que dan una idea acerca del origen y causas del mismo.
5. Definir explosivo químico.
6. Clasificar los distintos explosivos, de acuerdo con el criterio más utilizado en química forense.
7. Describir los distintos tipos de explosión, en función del tipo de explosivo utilizado.
8. Ilustrar los procedimientos que se utilizan en la detección de explosivos.
9. Analizar el trabajo del químico forense en el laboratorio.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para comprender los contenidos del tema sería conveniente revisar las reacciones de oxidación reducción, especialmente los aspectos referentes a la termoquímica y cinética de las reacciones de combustión.

Tema 5. Pruebas químicas aplicadas a la detección de restos de aceleradores y de explosivos

- 5.1. Introducción
 - 5.2. Reacciones de combustión
 - 5.3. Química de un fuego
 - 5.4. Búsqueda de evidencias en la investigación forense de incendios
 - 5.5. Identificación en el laboratorio
 - 5.6. En la escena de una explosión
 - 5.7. Detección de explosivos
 - 5.8. Investigación forense de una explosión
- Ejercicios y soluciones
Lectura: «Desarrollando una pista»

5.1. INTRODUCCIÓN

Tanto la investigación de incendios como la investigación de explosivos, debido a la magnitud de los daños y el sufrimiento que conllevan, son una de las áreas de trabajo más importantes en química forense.

El fuego provocado y las explosiones, en muchas ocasiones resultado de ataques terroristas, son fenómenos a los que hoy día deben enfrentarse la mayoría de los gobiernos y que suponen un problema tanto social como económico debido al coste de vidas y de bienes materiales y a las serias agresiones que ocasionan frecuentemente, al medio ambiente. Ambos tipos de sucesos dan lugar a escenas de destrucción en las que la búsqueda de pruebas es difícil y muchas veces se reduce a tratar de encontrar restos que permitan identificar la presencia de compuestos aceleradores o de explosivos. Por eso, en su investigación resultan muy importantes y de gran ayuda para su esclarecimiento los datos aportados por testigos y por personal especializado que acude a la escena del suceso.

En el tema se describirán, en primer lugar, los fundamentos de las reacciones de combustión, responsables de fenómenos diferentes entre sí, como son la producción de un incendio o de una detonación. También se tratará de como será la velocidad de esta reacción de combustión y su grado de confinamiento, lo que marcará la diferencia entre un incendio y una explosión. Asimismo, se abordará el estudio de la química del fuego y de los combustibles, de los tipos de explosión y de explosivos, así como de todo lo relacionado con la investigación forense de ambos tipos de sucesos.

5.2. REACCIONES DE COMBUSTIÓN

Se denomina *reacción de combustión* a una reacción de descomposición en la que una sustancia (combustible) reacciona con oxígeno (oxidante). Las reacciones de combustión son reacciones de oxidación-reducción. En función de la cantidad de oxígeno la combustión puede ser completa o incompleta, siendo en este caso los productos que se obtienen función del material combustible de que se trate. Así y tomando como ejemplo al tolueno, si la combustión es completa, se produce la siguiente reacción:



Mientras que cuando la combustión es incompleta (falta de oxígeno) la reacción transcurriría de la siguiente forma:



Las reacciones de combustión son reacciones exotérmicas en las que se desprende calor y a veces energía en forma de luz (llama) y/o energía sonora. La energía térmica liberada en esta reacción, es el *calor de combustión* (tabla 5.1).

La *llama* se debe a la emisión de energía electrónica de los átomos de algunas partículas que se encuentran en los gases de combustión, al ser excitados por el intenso calor generado en estas reacciones. El *calor* es una forma de transmisión de energía debida a una diferencia de temperatura.

TABLA 5.1. Calor de combustión de algunos combustibles frecuentes desde el punto de vista de la investigación forense

Sustancia	Calor de combustión (kJ.g ⁻¹)
Madera de pino	18
Antracita	31
Gas natural	49
Gasolina	48
Diesel	47
Hidrógeno	142

En estas reacciones de combustión los reactivos se transforman entre otras cosas en productos gaseosos que se calientan y expanden. La expansión de estos gases cuando se trata de un fuego (por ejemplo, un incendio) generará columnas de humo, mientras que si se producen en el interior de un arma de fuego (ver tema 6) actuarán como propelentes de la munición, y en el caso de los explosivos, los cuales se mantienen confinados el mayor tiempo posible, su función será generar una onda destructiva.

La combustión de una mezcla puede ser casi instantánea sin propagación de llama, como en la autoinflamación, o con propagación de llama, donde y en función de la velocidad, podemos distinguir entre:

Deflagración. Combustión subsónica, que se propaga a velocidades comprendidas entre 1 m.s⁻¹ y 331 m.s⁻¹ (velocidad del sonido). La mayoría de los fuegos relacionados con la vida diaria son deflagraciones y en ellos el frente de llama avanza por fenómenos de difusión térmica. Ejemplos de deflagración son, entre otros, las mezclas pirotécnicas de los fuegos artificiales o la combustión de la pólvora en un arma de fuego.

Detonación. Combustión supersónica (velocidad de propagación > 331 m.s⁻¹), que implica la existencia de una onda expansiva.

5.2.1. Termoquímica de la combustión

Como ya se ha comentado, en las reacciones de combustión se produce calor —se trata de un *proceso exotérmico*— pero, al mismo tiempo, se

trata de reacciones que requieren de un aporte inicial de calor, el cual es necesario:

- Para que el combustible, ya sea sólido o líquido, pase a estado vapor antes de que ocurra la combustión y
- Para iniciar la reacción entre los vapores del combustible y el oxígeno (gas). Esta energía necesaria para iniciar la reacción es la *energía de activación*, que se emplea en romper los enlaces en ambos reactivos (oxígeno y combustible). Dado que la energía para romper el enlace O-O es constante, la energía requerida para iniciar cualquier reacción de combustión dependerá del combustible presente en la misma.

Los combustibles líquidos se *vaporizan*, siendo la energía necesaria para ello el *calor de vaporización* (tabla 5.2), mientras que la combustión de un sólido generalmente es más compleja. Así, en algunos casos, como ocurre con las velas, la cera primero funde y luego se vaporiza. En otros materiales, como la madera puede ocurrir un proceso de degradación térmica, denominado *pirólisis* (descomposición por calor en ausencia de oxígeno). En este proceso el calor de las llamas puede penetrar en capas profundas de la madera, capas sin oxígeno, formándose moléculas más pequeñas (CO e hidrocarburos, monómeros, dímeros...), que posteriormente, y al tratarse de gases inflamables, reaccionarán con el oxígeno. También es posible una *combustión sin llama* o *combustión latente* («glowing combustion», «smoldering»), proceso que ocurre en la superficie de un sólido y que se propaga al interior de materiales porosos, como cigarrillos, brasas de carbón, algodón, madera en descomposición, etc. Aquí la temperatura y el calor liberado son mas bajos que en una combustión con llama (~ 600 °C frente a ~ 1500 °C)

TABLA 5.2. Calor de vaporización de algunos líquidos

Sustancia	Calor de vaporización (J.g ⁻¹)
Diesel	233
Queroseno	250
Aguarrás	293
Gasolina	349
Etanol	921
Agua	2258

Una vez aportada la energía inicial requerida en cada caso, se libera la suficiente energía para mantener la reacción y permitir que el proceso transcurra de forma exotérmica.

5.2.2. Cinética de la combustión

La cinética de una reacción es el estudio de la velocidad y de los mecanismos por los que transcurre dicha reacción. La mayoría de las reacciones de combustión, son reacciones en cadena y suelen implicar radicales libres. Por tanto, se trata de reacciones que incluyen muchas etapas y que dan lugar a mezclas complejas de productos, difíciles de predecir en muchas ocasiones. La etapa más lenta, es decir, la de mayor energía de activación, será la que determine la velocidad de reacción, y se conoce como *etapa limitante de la velocidad de reacción*.

Afortunadamente, y en lo que al trabajo de un químico forense se refiere, lo importante no es el estudio de estos complejos mecanismos ni la deducción de qué es lo que se forma en la reacción. Su interés radica en la identificación de materiales combustibles y, en ocasiones, en el análisis de algún producto de reacción formado.

5.3. QUÍMICA DEL FUEGO

Para que un fuego se produzca será necesaria la presencia simultánea de los tres componentes, que se representan mediante lo que se denomina «*triángulo del fuego*» (figura 5.1):

- un combustible que pueda ser oxidado.
- un oxidante, generalmente oxígeno y
- una fuente de calor para iniciar la reacción.

La eliminación de al menos uno de los tres componentes anteriormente citados, permitirá extinguir un fuego,

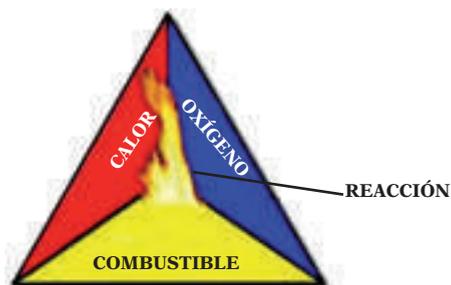


FIGURA 5.1. Triángulo del fuego.

siendo éste el principio en el que basan los materiales resistentes a las llamas, así como los métodos empleados en su extinción.

Los materiales resistentes a las llamas son materiales que al arder producen *hollín*, el cuál actúa como barrera y como aislante al mismo tiempo, impidiendo que el oxígeno y el calor alcancen el combustible.

La denominación de *hollín* incluye partículas sólidas de tamaño muy pequeño (100 nm – 5 μ), resultantes de la combustión incompleta de materiales como el carbón o la madera, y compuestas en su mayoría por carbono impuro de color negro.

Como procedimientos empleados en la extinción de un fuego, se encuentran:

- La eliminación del combustible
- La adición de espumas o de gas inerte que reducen el oxígeno: *sofocación*.
- La disminución del calor utilizando agua: *enfriamiento*.

Conocer la química y la física que se esconde detrás de un fuego es importante para:

- Poder investigar su origen y sus causas.
- Tener la capacidad, a la vista de un informe pericial, de decidir si las conclusiones presentadas en el mismo son concluyentes o no.

5.3.1. Parámetros característicos de las sustancias combustibles

Se denomina *combustible* a cualquier material sólido, líquido o gaseoso capaz, cuando se oxida, de liberar energía. A continuación se explicarán y definirán una serie de parámetros, característicos de las sustancias combustibles.

Temperatura de autoignición. Se denomina temperatura de autoignición o autoinflamación a la temperatura mínima, a presión de 1 atmósfera, a la que la materia combustible, en contacto con el aire, arde espontáneamente y la llama se mantiene sin ayuda de una fuente de ignición externa. Este parámetro recibe también el nombre de temperatura de autoencendido o

temperatura de ignición espontánea. La tabla 5.3, muestra los valores de las temperaturas de autoignición de algunas sustancias combustibles.

TABLA 5.3. Temperaturas de autoignición de algunos combustibles, a presión de 1 atmósfera

Combustible	Temperatura (°C)
Hidrógeno	500
Propano (comercial)	493-604
Butano (comercial)	482-538
Gas natural (alto contenido en CH ₄)	482-632
Gasolina	456
Etanol	363
Madera blanda	320-350
Madera dura	313-393

La temperatura de autoignición puede disminuir sustancialmente ante la presencia de catalizadores, atmósferas ricas en oxígeno o presiones elevadas. Para los hidrocarburos en el aire se observa que esta temperatura disminuye a medida que aumenta su masa molar. Así, para el metano, CH₄, es de 537 °C para el *n*-butano, C₄H₁₀ 405 °C y para el *n*-decano C₁₀H₂₂ 208 °C.

Se puede producir autoignición en incendios confinados (incendios que se desarrollan en espacios cerrados). Esto es así porque en el transcurso del incendio se forma una capa caliente de humo y de gases en la parte superior del recinto, que va aumentando de temperatura y espesor a medida que el fuego continúa. Este calor que no puede disiparse, irradia hacia abajo y va calentando todos los materiales combustibles que aún no se hayan quemado, y que empiezan a oxidarse desprendiendo más calor. A su vez, la temperatura sigue aumentando y se alcanza la temperatura de autoignición, momento en el que de forma repentina todas las superficies combustibles que hasta entonces no estaban implicadas en el incendio, comienzan a arder como consecuencia de las llamas que recorren la parte superior del recinto. Este fenómeno se conoce como *combustión súbita* o «flashover».

También y cuando se almacenan en gran cantidad sustancias sólidas combustibles apiladas, se puede producir la autoignición debido al aumento de temperatura que se produce en el interior de las pilas a causa del calor generado en el proceso de oxidación de estas sustancias y que no tiene facilidad para disiparse.

Temperatura de inflamación o destello («flash point» en inglés) de un material volátil (tabla 5.4), es la temperatura más baja a la cual dicho material desprende vapores en cantidad suficiente para formar una mezcla inflamable con el aire que rodea su superficie o que se encuentra en el interior del recipiente que lo contiene, en presencia de una fuente de ignición o de calor externa. Si alcanzada esta temperatura la fuente de ignición externa se retira de las cercanías del material combustible, la llama se retrae y se apaga.

Estos valores de temperatura, que se determinan normalmente a nivel del mar, varían con la presión, de forma que en zonas de mayor altitud la concentración inflamable se alcanza con mayor facilidad.

TABLA 5.4. Temperatura de inflamación (*) y rango de inflamabilidad de algunos combustibles

Sustancia	Flash point (°C)	Rango de inflamabilidad en aire (% en volumen)
Éter etílico	-49,0	1,9-36,0
Gasolina	-43,0	1,5-7,6
Éter de petróleo	-40,0	0,8-6,0
Etanol	12,7	3,3-19,0
Benceno	-10,0	1,3-7,1

(*) La gasolina y el éter de petróleo son mezclas y por tanto el valor del punto de inflamación puede variar en función de la composición de la misma.

Límites de inflamabilidad, son parámetros que definen las concentraciones mínimas y máximas del vapor o gas de un combustible en mezcla con el aire, en las que son inflamables. Se expresa como porcentaje en volumen (% de vapor de combustible en 100 de mezcla, vapor combustible-aire) (figura 5.2). A veces recibe también el nombre de *límites de explosividad* porque

en función de las condiciones de confinamiento, cantidad, intensidad de la fuente de ignición, etc., varía la velocidad de combustión y se pueden producir explosiones.



FIGURA 5.2. Límites de inflamabilidad.

Así, y de acuerdo con la definición anterior, el *límite inferior de inflamabilidad*, *L.I.I.* (L.E.L. en inglés) será la concentración mínima de vapor o gas en mezcla con el aire por debajo de la cual no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con la fuente de ignición. Por otra parte, el *límite superior de inflamabilidad*, *L.S.I.* (U.E.L. en inglés), por el contrario, será la cantidad máxima por encima de la cual no tiene lugar la propagación de la llama.

La tabla 5.4 muestra los valores del rango de inflamabilidad (intervalo entre el L.I.I. y el L.S.I.) de algunos combustibles.

Este parámetro se utiliza no sólo para describir las características de líquidos combustibles, sino también para determinar el riesgo de incendio, es decir, su peligrosidad. Así, se puede distinguir entre:

- Líquidos *inflamables*, que son los que liberan vapores en cantidad suficiente para producir una combustión a temperaturas inferiores a 37,8 °C (por ejemplo, la gasolina).
- Líquidos *combustibles*, los que necesitan temperaturas superiores a 37,8 °C para que la concentración de vapores sea suficiente para que se produzca la combustión (como ocurre con el queroseno).

El motivo de elegir esta temperatura de 37,8 °C, que en principio podría parecer un número curioso o arbitrario, es debido a la equivalencia con la escala Fahrenheit de temperatura (punto de congelación y ebullición del agua, 32 °F y 212 °F, respectivamente), en la que 37,8 °C son 100 °F.

En un incendio originado en un espacio cerrado y poco ventilado, se puede acumular gran cantidad de humo concentrado en productos volátiles inflamables. Estos productos, resultado de la *combustión incompleta* de los combustibles a causa de la escasez o falta de oxígeno, no arden debido a que su concentración respecto al comburente es muy superior (se sitúan por arriba del límite de inflamabilidad). Sin embargo, una entrada brusca de oxígeno (apertura o rotura de puertas o ventanas) ocasiona una fuerte explosión, *explosión súbita*, «flashback» o «smoke explosión», en inglés.

5.4. BÚSQUEDA DE EVIDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN FORENSE DE INCENDIOS

La investigación en este tipo de sucesos se centra en la búsqueda de pruebas que permitan averiguar si se trata de un fuego accidental o provocado. En este último caso se utilizarán *aceleradores*, es decir, cualquier sustancia colocada de forma intencionada que sea fácilmente combustible como (gasolina, queroseno, papel, madera, gas natural, propano, etc) y asegure que el fuego no se apague. Por ello será de suma importancia la búsqueda, empaquetado y transporte de indicios en la escena del suceso.

En la búsqueda de indicios, se pueden diferenciar dos etapas.

5.4.1. Evidencias observadas durante el desarrollo del incendio

El relato de los testigos y las evidencias observadas inicialmente por el personal especializado (bomberos, policía) pueden dar pistas acerca de cuál fue la situación en los primeros momentos del incendio. Una vez que el fuego se propaga o se extingue, esos indicios pueden desaparecer o sufrir modificaciones y perder su utilidad. Por tanto, los datos aportados acerca de la altura y color de las llamas o del color del humo que se produce, serán muy importantes en la investigación.

Llamas

Cuando la combustión de un material se produce en una atmósfera con una concentración normal de oxígeno, suele ir acompañada por la emisión

de una radiación luminosa o llama. Las llamas son gases incandescentes visibles alrededor del material que arde.

La altura de las llamas está relacionada con el grado de ventilación, es decir, con el aporte de oxígeno a través del aire.

El color de la llama puede ser un indicador del tipo de combustible que está ardiendo, aunque también hay que saber que un mismo combustible puede arder con llamas de distinto color, dependiendo del proceso de combustión. Así,

- El color azul se debe a la combustión completa del carbono, produciéndose dióxido de carbono. El color amarillo, a una combustión incompleta en la que se produce monóxido de carbono, debiéndose las diferentes tonalidades observadas a la distinta proporción entre combustión completa (CO_2) e incompleta (CO). Por eso, en un fuego confinado las llamas de color anaranjado son el resultado de la acumulación de pequeñas partículas de carbono (combustión incompleta), que brillan cuando se calientan en la propia llama.
- Los vapores de ciertos elementos metálicos imparten un color característico a la llama, propiedad que es usada en su identificación (figura 5.3).

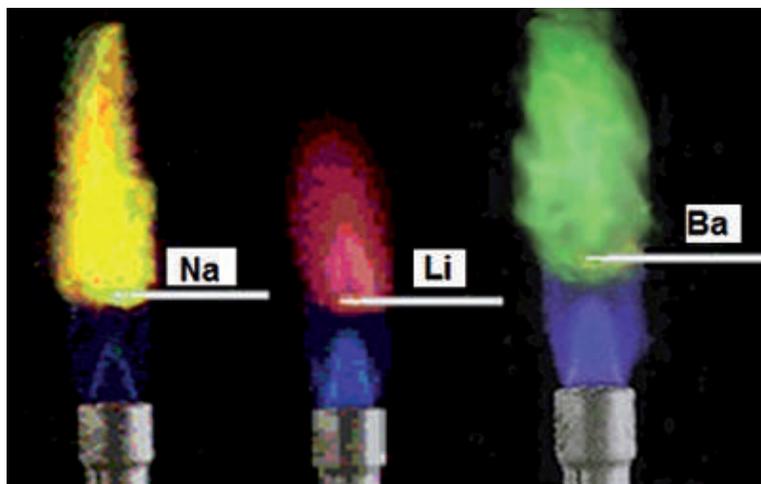


FIGURA 5.3. Color de llama producida por la presencia de Na, Li y Ba respectivamente.

Humo

Es una suspensión en el aire de pequeñas partículas sólidas o líquidas, fruto de una combustión incompleta. El tipo de gases y partículas producidas variarán de acuerdo con el material quemado, siendo los más comunes: monóxido de carbono, dióxido de carbono, partículas finas de carbón, nitrógeno, vapor de agua y otros. En relación con los humos producidos, cantidad, densidad y color, se puede distinguir entre:

- *Humo negro* (hollín): indicio en principio de una *combustión incompleta* de sustancias ricas en carbono (plásticos, cauchos, sustancias orgánicas...). Si además va acompañado por llamas de considerable magnitud y de color rojo-anaranjado, se puede pensar en la presencia de líquidos altamente combustibles, como el queroseno o la nafta.
- *Humo blanco-gris*: indicativo de una *combustión casi completa* y debido a la condensación de vapor de agua sobre pequeñas partículas de polvo y hollín. Sería típico de sustancias ricas en agua, bien por su composición química o por la humedad que poseen.
- *Humos de color pardo*: pueden indicar la presencia de productos procedentes de la descomposición de sustancias nitrosas, tales como el celuloide o algunas lacas y textiles.

Es posible detectar a veces la presencia de combustibles líquidos, como alcohol o disolventes industriales, debido al olor que se percibe durante el incendio y que persiste después.

Gases de combustión

Permanecen en el aire cuando se alcanzan de nuevo temperaturas normales. La mayor parte de los combustibles contienen carbono, por lo que se formará dióxido de carbono o monóxido de carbono, dependiendo de si la combustión es completa o incompleta. Además de estos gases que son los más abundantes, en función de la composición química de los materiales combustibles, de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, se pueden formar otros gases como:

- Cloruro de hidrógeno (HCl). Se origina en la combustión del policloruro de vinilo que forma parte, entre otros, de los aislantes de las conducciones eléctricas.

- Dióxido de azufre (SO_2). Se produce cuando se queman materiales como lana o goma que contienen azufre. Produce acción irritante en ojos y vías respiratorias.
- Acroleína (Prop-2-enal). Es un gas tóxico e irritante, resultado de la combustión de productos derivados del petróleo y de la grasa.
- Amoníaco (NH_3). Resultado de la combustión de materias que contienen nitrógeno en su estructura como la lana, seda, plásticos, etc. Irritante para ojos, garganta y nariz.
- Fosgeno (dicloruro de carbonilo CCl_2O). Gas muy tóxico, procedente de la combustión de productos clorados como plásticos o disolventes.
- Cianuro de hidrógeno (HCN). Gas muy tóxico, resulta de la combustión de lana, seda y acrílicos.
- Dióxido de nitrógeno (NO_2). También muy tóxico, y se origina, por ejemplo, en la combustión del nitrato de celulosa.

5.4.2. Evidencias de utilidad una vez extinguido el fuego

Un fuego deja una serie de evidencias en el lugar donde se ha producido. Estos datos, manejados por personal especializado (técnico en materiales, ingeniero mecánico, ingeniero eléctrico, químico, experto en seguros...), son de enorme valor en la investigación. Veremos algunos de ellos:

- El daño que producen las llamas sobre los objetos o sobre la superficie de los materiales presentes, ayuda a determinar la temperatura a la que dicha superficie fue expuesta y a su vez será indicativo del posible uso de sustancias aceleradoras. Para llegar a conclusiones válidas será necesario disponer de datos previos (obtenidos de forma experimental) acerca de la resistencia y evolución de diferentes objetos sometidos a los efectos del calor. Así y a modo de ejemplos:
 - Los metales, a diferencia de otros materiales combustibles ordinarios, ofrecen una mayor resistencia al fuego, y la magnitud de los daños sufridos serán pistas valiosas. Si están fundidos o no puede ser indicativo, no solo de las temperaturas alcanzadas, sino también de las zonas donde se han alcanzado. Por ejemplo, el cobre

(p.f. = 1082 °C), que se utiliza en fontanería y en cables eléctricos, puede por su trazado indicar en que lugares la temperatura ha excedido ese valor. Otros metales que se pueden encontrar en la escena de un incendio son latas de aluminio (p.f. = 660 °C) y piezas de acero del mobiliario (p.f. = 1100-1600 °C), por ejemplo.

- La presencia de hollín depositado, que presenta características diferentes en función de la fuente de procedencia. Por ejemplo, si es de textura pegajosa o aceitosa, podría indicar la combustión de materiales plásticos.
- Punto o puntos de origen del fuego. En muchas ocasiones el daño causado es demasiado grande y puede resultar difícil encontrar el origen del mismo. Buscar un *patrón en «V»*, es una de las señales de que el punto de origen podría estar cerca, ya que el fuego tiende a elevarse y expandirse. El punto de origen también podría encontrarse en el lugar donde el fuego ardió con más intensidad, siempre que no existan señales de aceleradores que puedan alterar el camino normal del fuego. El hallazgo de más de un punto de origen sería indicativo de fuego provocado. También el vidrio de las bombillas, que a una determinada temperatura se abomban hacia afuera en la dirección de un calor intenso, indicarían la dirección del origen.
- Los aceleradores gaseosos no dejan residuos químicos, pero sí evidencia física, tal como los contenedores donde se encontraban alojados. Los residuos de sustancias aceleradoras líquidas son a veces fáciles de detectar, pues son absorbidos inicialmente por superficies porosas (como suelos de madera, paredes, techos, alfombras, moquetas, almohadones, etc.).

Para seleccionar correctamente las muestras se recurrirá a los distintos procedimientos existentes, que se enumeran a continuación:

Olfato humano. Procedimiento sencillo y económico aunque subjetivo, debido a los efectos negativos causados por factores como el clima o el propio cansancio del investigador.

Perros entrenados. Mayor sensibilidad y objetividad, además de la posibilidad de su entrenamiento en la detección de una sustancia en concreto. Al igual que el ser humano, experimentan también fatiga olfativa y es un procedimiento costoso.

Narices electrónicas o *sniffers*. Para ello se utilizan sensores de gas, que son elementos cuyas propiedades se alteran al entrar en contacto con un determinado compuesto. Los cambios producidos se registran, se procesan y se traducen en forma de datos que conforman la “huella” característica de cada integrante de la muestra sometida a análisis. Presentan muchas ventajas en relación a los anteriores, pero tienen un problema y es su falta de especificidad a la hora de diferenciar entre residuos procedentes de aceleradores y los que se forman como producto de la pirolisis de diversos materiales.

Detectores de gases por fotoionización. Sistemas muy sensibles, pero con el mismo problema que los anteriores, es decir, falta de especificidad.

Cromatógrafos de gases portátiles con ionización de llama. Mayor capacidad de discriminación que los anteriores, pero de baja sensibilidad y alto coste.

Cromatógrafos de gases-espectrómetros de masas portátiles. Elevado coste y algo más complicado de manejo.

Test químicos. Se trata de “tiras reactivas” comerciales que permiten detectar la presencia de hidrocarburos derivados del petróleo, aunque no diferenciar entre compuestos con distintos orígenes y además son costosos.

5.5. IDENTIFICACIÓN EN EL LABORATORIO FORENSE

Las muestras recogidas en el lugar del incendio, convenientemente empaquetadas, serán trasladadas al laboratorio. Para determinar de qué tipo de acelerante se trata será necesario conocer qué sustancias lo integran y compararlos con patrones estándar. En este proceso de identificación se pueden distinguir las siguientes etapas:

5.5.1. Preparación de la muestra

El objetivo es aislar los componentes volátiles, seleccionando el procedimiento más conveniente que garantice alto rendimiento y evite la posible contaminación de la muestra.

Destilación por arrastre de vapor. Los restos del incendio, ligeramente húmedos, se colocan en un aparato de destilación. Los vapores que alcanzan

la columna de destilación se enfrían, condensan y se recogen. Esta técnica es efectiva para separar y concentrar aceleradores, aunque favorece la recuperación de los componentes con mayor punto de ebullición. Requiere mucho tiempo y grandes cantidades de muestra, pero es menos sensible a la contaminación.

Extracción con disolventes. Se trata de someter los restos del incendio a una extracción con disolventes no polares. Se utilizan entre otros, n-pentano y sulfuro de carbono (CS₂). Ambos tienen una limitación común, que es la baja sensibilidad. Además, el primero es muy volátil y podrían perderse, como en el caso anterior, componentes con bajos puntos de ebullición. En cuanto al segundo, tiene una cierta toxicidad y muy mal olor. Es una técnica actualmente en desuso debido a su baja especificidad y que únicamente se recomienda cuando se trabaja con restos de tamaño muy pequeño o cuando no es factible utilizar otros métodos, como es el caso de muestras carbonizadas. Como alternativa a los disolventes orgánicos tradicionales se utilizan fluidos supercríticos (ver tema 2), principalmente CO₂ supercrítico. Es un procedimiento mucho más efectivo, que además evita el calentamiento de la muestra.

Tanto en la destilación como en la extracción, las muestras líquidas obtenidas se concentran y se identifican por cromatografía de gases (GC) acoplado a un detector de ionización de llama (GC-FID) o a un espectrómetro de masas (GC-MS).

Estas técnicas fueron las primeras utilizadas, pero han sido sustituidas actualmente por técnicas de recuperación «headspace» con calor, sin calor, activas o dinámicas «Dynamic Headspace» (DHS) y pasivas.

Las *técnicas de muestreo del espacio de cabeza* o adsorción headspace son técnicas sencillas, rápidas y muy sensibles. Su fundamento, consiste en la formación de gases a partir de la muestra y su posterior adsorción. La fase sólida que se utiliza como adsorbente, en el caso del análisis de restos de aceleradores, suele ser de carbón activo o «Tenax GC» (óxido de 2,6-difenil-*p*-fenileno). El Tenax, muestra gran afinidad para los hidrocarburos, es muy hidrofóbico y capaz de soportar altas temperaturas sin alterarse. Es también soluble en disulfuro de carbono, por lo que deberá evitarse el uso de este disolvente en el proceso de desorción. En la figura 5.4. A y B, se puede ver de forma esquematizada el fundamento de dichas técnicas y en C, la de «microextracción en fase sólida (MEFS)» o «solid phase microex-

traction» (SPME), técnica muy sensible y versátil, ya que permite utilizar una matriz acuosa en aquellos casos en los que las muestras están inundadas de agua y, además, requiere poca cantidad de muestra.

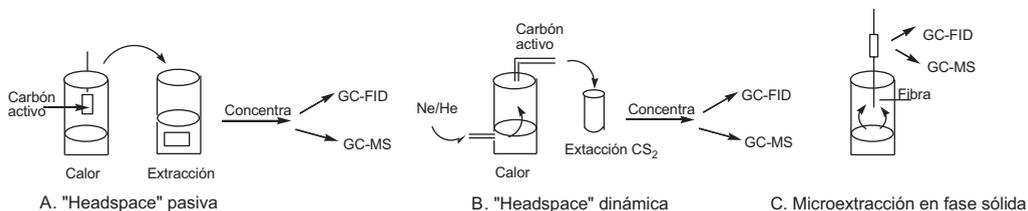


FIGURA 5.4. Técnicas de "Headspace" (A y B) y microextracción en fase sólida, C.

Estos métodos presentan algunos inconvenientes, entre ellos,

- Su alta sensibilidad, lo que incrementa el potencial de contaminación, haciendo difícil establecer la cantidad total de líquido inflamable presente en la muestra.
- Al estar diseñados para detectar un amplio espectro de componentes, no están optimizados para ninguno en concreto.
- El calentamiento agresivo puede dar lugar a pérdidas de componentes muy volátiles, por lo que el rango de temperaturas está limitado aproximadamente a 70 °C. Favorecen la recuperación de aquellos componentes con menores puntos de ebullición.
- La eficacia de la extracción dependerá de la polaridad de los solutos y del disolvente, por lo que en una mezcla compleja algunos compuestos serán desorbidos de forma más eficaz que otros.
- No todos los componentes de una mezcla se adsorberán igual en la lámina de carbono activo o en otros materiales utilizados como adsorbentes.

5.5.2. Técnicas de análisis

Con independencia de la forma de preparar la muestra, el método instrumental más utilizado para separar los distintos componentes de una muestra conteniendo restos de aceleradores es la cromatografía de gases acoplada a un detector de ionización de llama (GC-FID) o a un espectrómetro de

masas (GC-MS). El objetivo, más que identificar compuestos específicos, es reconocer patrones de composición, compararlos con muestras control y tratar de identificar grupos de compuestos significativos, como alcanos o compuestos aromáticos. No hay que olvidar que en este tipo de muestras los factores ambientales pueden originar cambios, que afectarán sobre todo a los componentes más volátiles. Es también muy importante realizar análisis de la matriz o soporte que contiene el acelerador, debido a que muchos materiales presentes en la escena del suceso pueden dar patrones similares a los de los propios aceleradores. Entre las técnicas de análisis se encuentran:

Microscopía/ microscopía electrónica de barrido (SEM). Son técnicas que se aplican en el análisis de dispositivos de incendios. El SEM (ver tema 2) tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra, y se utiliza en muchas ocasiones para localizar materiales que requieren un análisis posterior. Por ejemplo, la detección de estroncio, puede ser indicativo de la presencia de material pirotécnico.

Cromatografía de gases (GC). Es un método muy común en el análisis de estas muestras y se basa en la separación de los distintos componentes en base a su volatilidad. El resultado es una «huella dactilar» del producto, que se compara con patrones estándar para su identificación. En esta comparación se tiene en cuenta el tiempo de retención, la altura de los picos y la proporción relativa de los mismos. A veces, y debido a la complejidad de la muestra o a la presencia de contaminantes, se produce la elución simultánea de distintos componentes.

Muchos de los combustibles utilizados como aceleradores provienen del procesado del petróleo, y son mezclas homogéneas. La gasolina (fracción C₅-C₁₂) tiene componentes con puntos de ebullición ente 40-220 °C, mientras que los puntos de ebullición de los componentes del queroseno (fracción C₁₂-C₁₆) que son diferentes a los de la gasolina y cualquier otra fracción obtenida del petróleo, se encuentran entre 175 y 270 °C.

Para evitar ese problema se utilizan estas técnicas:

Cromatografía de gases bidimensional (GC-GC). Se trata de combinar dos columnas de cromatografía: la primera haría una separación en base a un

parámetro (como la volatilidad) y a continuación, aquellos constituyentes que interesan pasarían a la segunda columna, donde se realizaría de nuevo una separación atendiendo a otra propiedad distinta (polaridad), logrando así una mayor resolución.

Cromatografía de gases-masas (CG-MS). Los elementos de la muestra, una vez separados en el cromatógrafo, pasarán a una cámara de ionización donde se obtienen iones característicos. A continuación, son separados los fragmentos de acuerdo a su relación carga/masa, detectados midiendo la producción de una señal eléctrica, con lo que se compararán con una biblioteca de compuestos estándar existentes para su posterior identificación. Suele ser el procedimiento elegido por los laboratorios forenses.

Cromatografía de gases con espectrometría de masas en tándem (GC-MS/MS). Consiste en acoplar dos espectrómetros de masas que trabajan uno a continuación de otro. Detecta cantidades muy pequeñas de restos y tiene alto poder de resolución.

Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Es una técnica de análisis instrumental para muestras líquidas. El espectro obtenido refleja los enlaces de las moléculas, proporcionando información acerca de la estructura de la sustancia desconocida. Es un método rápido que se puede utilizar para el análisis de cantidades muy pequeñas aunque, y debido a que refleja todos los grupos presentes, hay que cuidar que las muestras no estén contaminadas.

5.5.3. Interpretación de resultados

Es la fase final del proceso en la que hay que ser muy prudente con los datos obtenidos, tanto si son negativos como en caso contrario, positivos. Cuando el resultado es positivo habrá que comprobar y descartar que no se trate de un falso positivo. Si es negativo, además de la posibilidad de que no se hayan utilizado aceleradores en el incendio, habría que manejar otros argumentos, como que:

- Se hayan utilizado pero se hayan consumido.
- No se haya elegido la muestra adecuada.
- Su concentración sea tan baja que no se detecten.

Además, y como ya se ha dicho anteriormente, la información procedente del laboratorio deberá ser estudiada y valorada conjuntamente con todos los demás datos existentes antes de proceder a la elaboración del informe.

5.6. EN LA ESCENA DE UNA EXPLOSIÓN

Los explosivos utilizados en la mayoría de los ataques terroristas, son de fabricación casera y su diseño depende de la imaginación del que los fabrica. Ello dará lugar a una gran variedad de explosivos y de formas de fabricarlos.

La tarea de un químico forense consistirá en tratar de detectar e identificar en el laboratorio tanto los explosivos químicos como los mecanismos de detonación, partiendo de muestras recuperadas y empaquetadas en la escena del suceso por personal especialmente entrenado en ello; siendo obvia, como en el caso de la investigación de un incendio, la dificultad que entraña la obtención de pruebas de un escenario de destrucción como el que nos ocupa.

Trabajar con este tipo de pruebas conlleva poseer un conocimiento acerca de diversos aspectos, como son: qué se entiende por explosión y explosivo, cuál es la química de una explosión, qué tipos de explosiones se producen y cuáles son los explosivos más frecuentes así como los métodos más utilizados en su detección y análisis.

5.6.1. Explosión y explosivo

De forma general, una *explosión* es un proceso en el que se produce la liberación simultánea de energía calórica, lumínica y sonora, en un intervalo de tiempo muy pequeño y se genera además una onda de presión en los alrededores donde se produce, como consecuencia de un súbito incremento de volumen. Aunque existen distintos tipos de explosiones, en este tema se hará referencia solamente a las explosiones de origen químico, así como a los explosivos implicados en ellas. En este contexto, y para que un compuesto o una mezcla se puedan considerar un *explosivo*, han de cumplir los siguientes requisitos:

- Ser capaces de liberar gran cantidad de energía. Esta energía se libera en forma de energía térmica y de energía cinética (la de los objetos que salen despedidos).

- Que su combustión sea muy rápida. Esta segunda premisa marca la diferencia entre las sustancias consideradas explosivos y aquellas otras que produciendo la misma o incluso más cantidad de energía, no lo son (por ejemplo el carbón).

En resumen: un *explosivo químico* es una sustancia o mezcla de sustancias que, convenientemente iniciadas, liberan de forma instantánea gran cantidad de energía y materia más estable, en su mayor parte productos gaseosos, a alta presión y temperatura.

Una medida de la efectividad de un explosivo es la velocidad de detonación, que es la velocidad (expresada en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) con la que se mueven los gases producidos desde el punto de la detonación. Estos valores para algunos explosivos son: pólvora negra (400), nitroglicerina (4.600), fulminato de mercurio (5000), HMX (9000), C4 (8.000) (Sección 5.6.4).

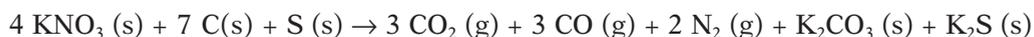
La velocidad de detonación es proporcional a la *potencia explosiva* o «explosive power», que es función, a su vez, de la cantidad de calor que se libera [$Q = -(\Delta H^\circ \text{reacción})$] y del volumen de los gases que se producen (V) en la explosión en un intervalo de tiempo, y que se expresa como el producto de ambas magnitudes ($Q \times V$). Una forma de expresar la potencia relativa de un explosivo en relación con otro es a través del IP (*power index*), en el que se toma como referencia el del ácido pícrico.

$$\text{IP} = \text{QV (explosivo)} / \text{QV (ácido pícrico)}$$

5.6.2. Química de una explosión

Ambos sucesos, una explosión y un fuego, son reacciones de combustión (sección 5.2), es decir reacciones de oxidación-reducción, aunque con un matiz diferente. Para que se produzca un fuego se requiere la presencia del oxígeno del aire, mientras que los explosivos han de contener oxígeno en su estructura (proceso de oxidación-reducción interna), ya que el oxígeno atmosférico es insuficiente para que se alcance la velocidad requerida en la combustión. Como ejemplos veremos a continuación las reacciones que tienen lugar en tres de ellos, la pólvora (mezcla de nitrato de potasio, carbón y azufre), el 1,2,3-trinitroxipropano o nitroglicerina y el 2,4,6-trinitrotolueno (TNT) respectivamente.

Pólvora

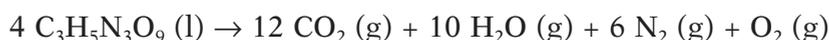


Fuente combustible

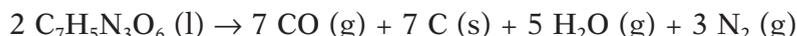
de oxígeno

Todos los componentes de la pólvora se encuentran en estado sólido, por lo que para que el contacto entre ellos sea lo mayor posible han de estar en forma de polvo finamente divididos.

Nitroglicerina o 1,2,3-trinitroxipropano



2,4,6-trinitrotolueno o TNT (también denominado trilita)



Estas dos últimas reacciones presentan una similitud, y es que en ambas la fuente de oxígeno (grupo NO_2) y la del combustible (átomos de C y O) se encuentran formando parte de la misma molécula, lo que aumenta la eficacia de la explosión. Pero también son diferentes, ya que en la primera de ellas se observa la aparición de oxígeno (g) como producto de la reacción, a diferencia de lo que ocurre en la del TNT que no aparece.

En referencia a los explosivos, existe un parámetro que es el *balance de oxígeno* (OB), que valora la suficiencia o no de oxígeno en la molécula de explosivo para lograr la oxidación completa. Se habla de *balance negativo* (caso del TNT) cuando la molécula no contiene suficiente cantidad de oxígeno para que se produzca una oxidación completa, y de *balance positivo* cuando hay oxígeno sobrante (caso de la nitroglicerina). Que el valor del *balance de oxígeno* sea próximo a cero, significa que una sustancia o mezcla de sustancias puede realizar la oxidación completa sin suministro de oxígeno, dando lugar a productos totalmente oxidados y sin restos de agente oxidante. A continuación se muestra cómo determinar el balance de oxígeno de un explosivo.

La fuerza y potencia destructora de un explosivo aumentan con el valor del balance de oxígeno.

El *balance de oxígeno* se define como:

Masa de oxígeno liberado o consumido/masa de explosivo x 100.

Veamos en el siguiente ejercicio un ejemplo de la determinación del balance de oxígeno:

Ejercicio:

Para el explosivo TNT, determinar cómo es el balance de oxígeno. Suponer que la reacción de combustión transcurre de forma total y que se forma H_2O , N_2 y CO o CO_2

Solución:

Según la reacción arriba indicada y partiendo de la fórmula molecular del TNT, que es $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$, vamos a comparar el oxígeno presente en la molécula con el que se necesitaría para la reacción de combustión. Así,

5 átomos de H darían lugar a $5/2$ moléculas de H_2O , lo que requiere $5/2$ átomos de O
 3 átomos de N darían lugar a $3/2$ moléculas de N_2 , lo que requiere 0 átomos de O
 7 átomos de C darían lugar, si así fuera, a 7 moléculas de CO_2 , lo que requiere 14 átomos de O

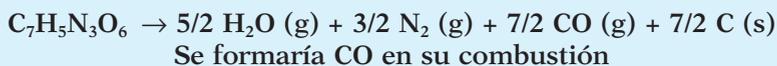
Total de átomos de O requeridos = 16,5

Como el TNT contiene en su molécula sólo 6 átomos de oxígeno, tendrá un balance negativo de 10,5 átomos de oxígeno por molécula de TNT, que representaría un porcentaje en peso de -74,0%, según:

$$-10,5 \times (16) / 227 \times 100 = -74,0 \quad \text{es decir } -74,0\%$$

Siendo 16 la masa atómica del oxígeno y 227 la masa molecular del TNT

Como existe déficit de oxígeno se forma CO en la combustión en lugar de CO_2



Multiplicando por 2 para obtener coeficientes enteros



Para un compuesto de fórmula general $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$, este cálculo puede simplificarse, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Balance de átomos de oxígeno} = (d - 2a - 1/2b)$$

Que en el caso del ejemplo anterior, el TNT, sería

$$6 - (2 \times 7) - 1/2 (5) = -10,5$$

Resulta así, un déficit de 10,5 átomos de oxígeno por molécula de TNT, coincidiendo con el cálculo realizado en el ejercicio. La tabla 5.5 muestra los datos del balance de oxígeno para algunos componentes de explosivos.

TABLA 5.5. Balance de oxígeno, expresado como porcentaje en oxígeno, de algunos explosivos

Sustancia	Balance de oxígeno (%)
Nitrato de amonio	+ 20,0
Nitroglicerina (NG)	+ 3,5
Clorato de potasio	+ 39,2
2,4,6-Trinitrotolueno (TNT)	- 74,0
Ácido pícrico	- 45,4
1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinano (RDX)	- 21,6

La utilización de explosivos con balance de oxígeno negativo en espacios cerrados, como es la minería, exige tomar precauciones especiales debido a la posibilidad de envenenamiento por el monóxido de carbono que se produce.

5.6.3. Tipos de explosión

Es posible diferenciar dos categorías de explosión, en función de la velocidad de las ondas de presión generadas en la misma (sección 5.2).

Los daños producidos se deben básicamente:

- A la fuerza de compresión debida a la onda de presión generada por los explosivos y
- A los fragmentos que se originan por ruptura de los contenedores en los que se encuentran o que se han introducido expresamente junto con el explosivo (metralla) y que salen disparados, provistos de una gran energía cinética ($1/2 mv^2$).

Atendiendo al tipo de compuesto implicado en la explosión, se distingue entre:

- Explosión *concentrada* o *condensada*. Causada por compuestos sólidos o líquidos en forma compacta.
- Explosión *dispersa* o *difusa*. Producida por gases o polvo, generalmente por deflagración.

Cada una de ellas lleva asociada un tipo de daños característicos, que sirven de ayuda a los especialistas en la caracterización del tipo de explosivo utilizado.

5.6.4. Tipos de explosivos

Existen distintos criterios para clasificar los explosivos, entre otros: por su estructura química, su estado físico (sólidos, líquidos, gases, pulverulentos o plásticos), su empleo (iniciadores, detonantes, deflagrantes o explosivos de pirotecnia) o su seguridad en el transporte. La figura 5.5, recoge la clasificación más utilizada en los escenarios forenses, que es la de fuertes y débiles, mientras que en la figura 5.6, se representan, a modo de información, algunas de sus estructuras.

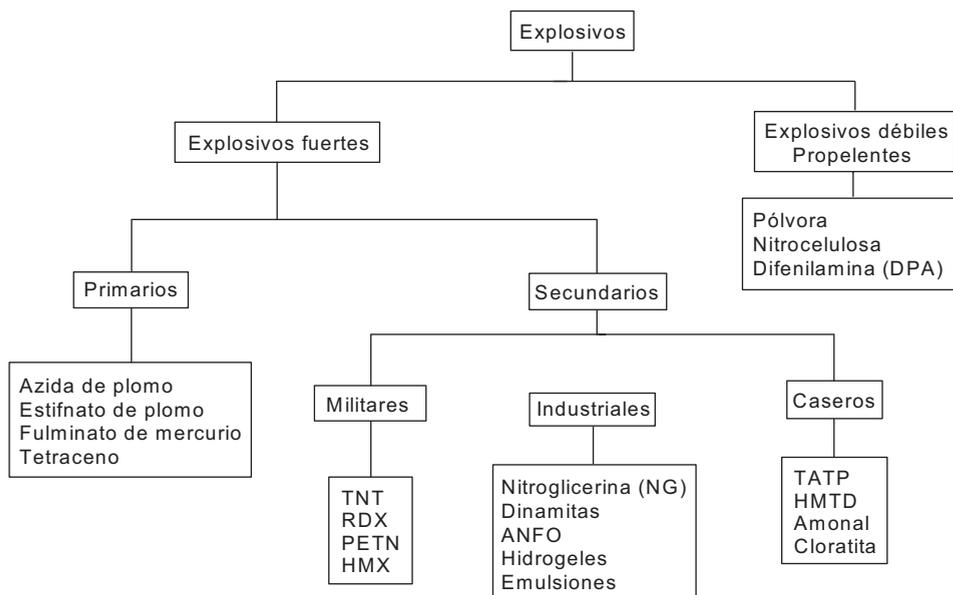


FIGURA 5.5. Clasificación de explosivos y algunos ejemplos.

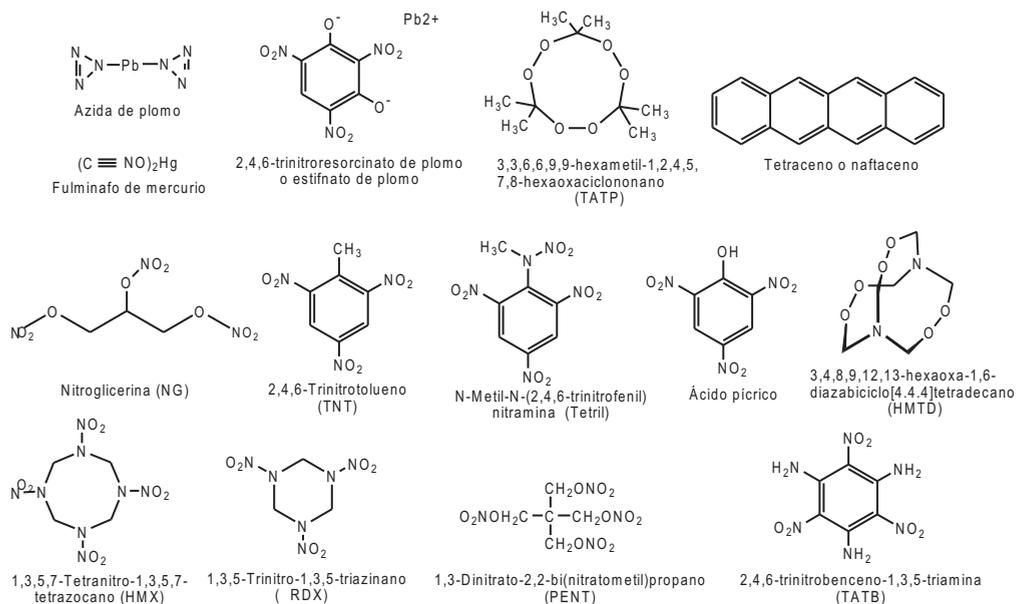


FIGURA 5.6. Estructura molecular de diferentes explosivos.

Explosivos débiles. Compuestos o mezclas que para que exploten deben estar dentro de un contenedor, ya que si se utilizan en espacios abiertos simplemente arden con un efecto pequeño (deflagran) y el daño que causan se debe al calor y las llamas. Generalmente, es una llama el desencadenante de la reacción que transcurre en milésimas de segundo. Uno de los usos de estos explosivos es servir como propulsores de la munición en armas y artillería (ver tema 6), también en fuegos artificiales y espoletas de seguridad, (así, el primero de ellos fue la pólvora negra). En general, todos ellos requieren un agente oxidante (KNO_3 , $KClO_4$, $KClO_3$, $Ba(NO_3)_2$) y uno o más agentes reductores (S, C, serrín, P, hilos de Mg).

En este tipo de explosivos si se hallan confinados en un espacio pequeño (volumen constante), la generación de grandes cantidades de productos gaseosos a altas temperaturas hace que se produzca un gran aumento en la presión (*Ley de Gay-Lussac*). Esta explosión, cuando ocurre en la cámara de un arma, es la que hace que la bala salga propulsada para permitir que los gases se expandan (*Ley de Boyle*).

Explosivos fuertes. Explosivos que detonan y en los que la reacción transcurre en millonésimas de segundo. Se puede distinguir entre explosivos primarios y explosivos secundarios

- *Explosivos primarios.* Explosivos muy sensibles, que generalmente detonan con cualquier estímulo o fuente de ignición (chispa, llama, impacto o fricción), por lo que son peligrosos de manejar. Debido a su inestabilidad, se usan a menudo para detonar los explosivos secundarios.
- *Explosivos secundarios.* Explosivos fuertes bastante más estables que los primarios, cuya detonación suele iniciarse utilizando un explosivo primario. Dentro de estos:
 - Los *militares*, suelen ser de manipulación muy segura y se utilizan con fines bélicos.
 - Los *industriales*, fabricados por la industria civil, menos potentes y seguros que los militares.
 - De *fabricación casera*, no requieren ni procesos ni instalaciones sofisticadas ni materias primas difíciles de adquirir. Son los fabricados por los terroristas, siendo, en general, muy peligroso su manejo.

A veces se emplean mezclas de algunos de estos compuestos explosivos, con el fin de aprovechar las propiedades de cada uno. Así:

- Se utilizan mezclas de explosivos con distinto grado de estabilidad, siendo el menos estable el que se almacena en un detonador, en cantidades muy pequeñas (inferiores a 0,5 g) y que es el que acciona la carga del explosivo principal, por ejemplo la azida de plomo.
- En otras ocasiones se mezclan con sustancias químicas, como el nitrato de amonio (NH_4NO_3), que no se consideran explosivos pero que junto con otras sustancias orgánicas pueden dar lugar a mezclas que si lo sean. Como ejemplo tenemos:
 - El explosivo denominado **ANFO**: nitrato de amonio + un combustible + nitrometano.
 - El **amatol**, nitrato de amonio (baja velocidad de detonación, bajo rendimiento, fácil de fabricar y barato y balance de oxígeno positivo) + TNT (velocidad de detonación alta, buen rendimiento, coste elevado complejo de fabricar y con balance de oxígeno negativo). El amatol con balance de oxígeno cero fue muy utilizado en la Primera Guerra Mundial y tuvo

su importancia para esta guerra, al permitir reducir la cantidad de TNT necesaria en las bombas y que las fábricas no eran capaces de producir en cantidad suficiente. Fue sustituido por el Torpex y el Tritonal.

- Otro ejemplo de mezclas lo constituyen los explosivos plásticos. Este es un tipo especial de material explosivo, insensible al roce y al choque, suave y fácilmente maleable, incluso con las manos y que presenta la ventaja de poder utilizarse en un intervalo más amplio de temperaturas, aunque su potencia generalmente es menor que cuando se utilizan puros. El siguiente cuadro recoge algunos de los explosivos plásticos más utilizados en la actualidad.

C-4. Compuesto por RDX (91% en peso) y materiales como caucho o aceites. **Danubit.** Se puede utilizar bajo el agua y también para voladura de rocas. **PENO.** (86% de PETN). Aplicaciones mineras y subacuáticas. **Semtex.** Utilizado en demoliciones y usos militares. Muy popular entre grupos terroristas.

5.7. DETECCIÓN DE EXPLOSIVOS

En función de la parte del explosivo a detectar, existen diferentes tecnologías a utilizar en su localización. Así, para la

Detección de los mecanismos de armado y disparo. Se utilizan tecnologías que detectan el artefacto a través de sus emisiones electromagnéticas, como la espectroscopia Raman. Otras como los rayos X, o los rayos γ , proveen imágenes o revelan diferencias en la materia respecto a su entorno (detectan presencia).

Detección de la carga explosiva. Analizando el rastro que dejan (en manos, ropas, bolsas...) en forma de partículas en su manipulación o, en el caso de sustancias orgánicas con unos determinados valores de presión de vapor por los vapores que generan. En estas tecnologías se incluyen: el olfato de animales, las «narices electrónicas», la espectrometría de masas, la de movilidad iónica (IMS), o la cromatografía de gases con detección de captura electrónica (GC-ECD).

El intervalo de presión de vapor de los explosivos fuertes es variable (\sim de 10^{-8} para nitroglicerina y de $\sim 10^{-13}$ para PETN, a 25 °C y 1 atm), pero a menudo insuficiente como para ser fácilmente detectables. Por ello, algu-

nos explosivos se fabrican adicionándoles pequeñas cantidades (del 0,1% a 1%), de *compuestos marcadores*, compuestos con una elevada presión de vapor (entre 10000 veces y 1 billón de veces más altas que las de los explosivos) (figura 5.7). Su utilización, de momento, está limitada a los explosivos plásticos fabricados sólo en algunos países.

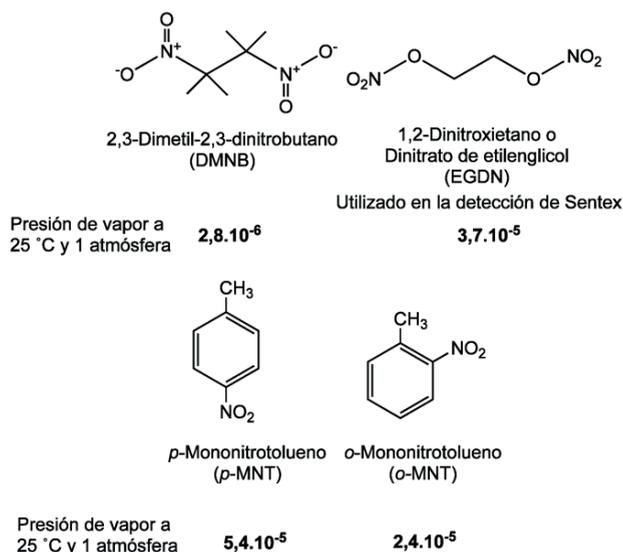


FIGURA 5.7. Compuestos marcadores de explosivos.

5.8. INVESTIGACIÓN FORENSE DE UNA EXPLOSIÓN

El trabajo del químico forense transcurre generalmente en el laboratorio. No obstante, todos aquellos datos recogidos por personal especializado, así como la selección, toma y envasado de muestras en los escenarios del suceso, supondrán una gran ayuda a la hora de elaborar un informe y responder a cuestiones tales como, ¿dónde y cómo se originó la explosión?, ¿qué tipo de explosivo la ha causado?, ¿se trata de un hecho accidental, o provocado?

5.8.1. Dónde y como se originó la explosión

Que exista o no un foco, dependerá del tipo de sustancia utilizada. Cuando se trata de una explosión condensada se produce un cráter (foco de la explosión), cuyas dimensiones dependerán del tipo y cantidad del explosivo utiliza-

do. La presión de los gases se produce desde un punto de inicio, extendiéndose en todas direcciones y distorsionando los objetos que encuentra en su camino. También se observa que la magnitud de los daños disminuye con la distancia al origen. En una explosión difusa, por el contrario, no existe un punto de origen y los daños se distribuyen de forma uniforme.

Determinar cómo se originó la explosión, supone la correcta recogida de indicios, físicos y químicos procedentes de los explosivos que permitan posteriormente llegar a unos resultados correctos. Las evidencias físicas, fragmentos de los contenedores del explosivo, temporizadores, circuitos electrónicos, baterías, etc, ayudarán a averiguar el origen del explosivo. Se recogerán fragmentos alojados en objetos blandos (maderas, ruedas y asientos de vehículos, cuerpos de las víctimas...), restos de metales y muestras de superficies, tanto impermeables como porosas (para explosivos volátiles). También etiquetas o «taggants».

Las *etiquetas* se preparan con plásticos de colores o chips magnéticos o fluorescentes, más fáciles de recuperar tras una explosión. Debido a que no contienen una fuente de oxígeno, solo se pueden destruir por completo con el oxígeno de la atmósfera, siendo razonable esperar que sobrevivan en número suficiente para su identificación. Las etiquetas, añadidas al explosivo actúan como códigos de barras y facilitan, después de la explosión, la identificación del fabricante, la fecha de fabricación y el número del lote del explosivo.

No existe todavía una regulación por parte de los gobiernos en cuanto a la obligatoriedad de adición de etiquetas identificativas a los explosivos. No obstante, hay que ser precavidos con la información que proporcionan, ya que entre los escombros formados puede haber materiales como el granito o el cemento, que se han originado en la explosión y que también podrían contener ya esas etiquetas.

La búsqueda de restos de explosivos se realizará con perros entrenados, o dispositivos electrónicos, capaces de detectar trazas de explosivos, como espectrómetros de masas o espectrómetros de movilidad iónica (IMS) portátiles y kits de ensayo comerciales (disponibles para distintos explosivos, TNT, PETN, RDX, etc., y también para mezclas).

Se tomarán también muestras de ropa, bolsas o envoltorios y de manos, piel, mucosas, pelo o heridas de las víctimas y de los sospechosos si los hubiera.

5.8.2. Trabajo en el laboratorio forense

Cuando llegan muestras de explosivos al laboratorio los procedimientos a seguir son distintos según se trate de explosivos intactos (sin explotar) o de restos procedentes de una explosión.

Análisis de explosivos intactos

- En caso de disponer de suficiente cantidad de explosivo, se realizará un test de ignición (por ejemplo el «Test de Lidstone»), para estudiar su comportamiento y compararlo con el de otros explosivos conocidos.
- Se realizarán tests químicos o tests de color, siendo los tres reactivos mas utilizados:
 - *Test de Griess* (ver tema 3). Está formado por los reactivos: Sulfanilamida en medio ácido, *N*-(1-naftil) etilendiamina en metanol y polvo de zinc (El Zn reduce nitratos a nitritos). Este test se utiliza para la detección, entre otros, de iones nitrito (NO_2^-). En la reacción entre los nitritos y la sulfanilamida se originan sales de diazonio, que posteriormente al reaccionar con la amina dan lugar a un compuesto de color rojo (figura 5.8).

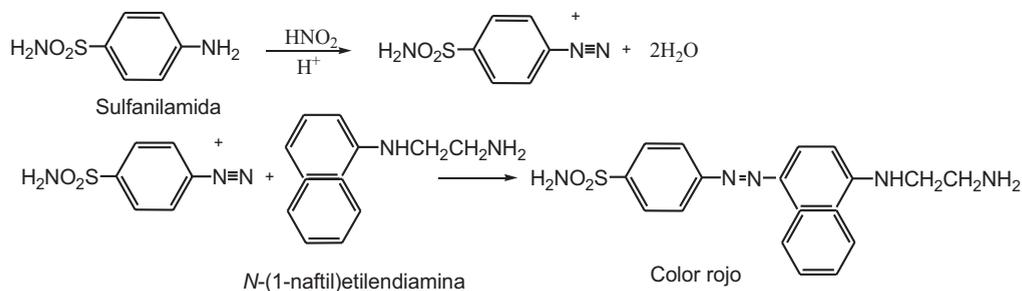


FIGURA 5.8. Reacción de Griess.

- *Test de la difenilamina* disuelta en ácido sulfúrico concentrado.
- *Test de la solución alcohólica de hidróxido de potasio* (hidróxido de potasio disuelto en etanol absoluto).

La tabla 5.6 muestra los colores que producen algunos explosivos en contacto con los reactivos mencionados.

TABLA 5.6. Test de color para diferentes explosivos

Sustancia	Griess	Difenilamina	Disolución alcohólica de KOH
Cloratos	-----	Azul	-----
Nitratos	Rosa-rojo	Azul	-----
Nitrocelulosa	Rosa	Azul oscuro	-----
Nitroglicerina	Rosa-rojo	Azul	-----
PETN	Rosa-rojo	Azul	-----
RDX	Rosa-rojo	Azul	-----
TNT	-----	-----	Rojo
2,4-DNT	-----	-----	Amarillo
Tetril	Rosa-rojo	Azul	Rojo-violeta

Existen otros muchos test de color, como por ejemplo el de Nessler, utilizado para el reconocimiento de catión amonio, observándose en caso positivo la aparición de una mancha o anillo amarillo o anaranjado rojizo:



Reactivo de Nessler

amarillo-anaranjado

Estos tests, aunque indican presencia de determinados compuestos, no tienen valor para identificación.

— **Uso de biosensores para la detección de TATP y HMTD.**

Los biosensores son dispositivos analíticos, con una alta especificidad y selectividad, que se usan en la detección de diferentes sustancias. Suelen estar formados por un componente de naturaleza biológica (enzima, anticuerpo, ácidos nucleicos, productos naturales, etc.) un detector físicoquímico que puede ser magnético, óptico, electroquímico... y un transductor que acopla estos dos elementos y traduce la señal que emite el sensor biológico.

Los explosivos, TATP¹ y HMDT mencionados anteriormente, son explosivos líquidos, de tipo peróxido y de uso militar y comercial poco frecuente pero fáciles de sintetizar y por tanto factibles de fabricarse de forma clandestina y que fueron utilizados en atentados como el del metro de Londres (2005). Todo ello, dio lugar a la normativa actual de prohibición en lo que a cantidades de líquidos permitidos en el transporte aéreo se refiere. Para el análisis de este tipo de explosivo, existen diferentes métodos basados, todos ellos, en la detección de H₂O₂ residual, un potente agente oxidante capaz de producir color o fluorescencia en su reacción con un sustrato adecuado. Uno de estos métodos, consistiría en extraer, con un ácido orgánico, el H₂O₂ de la muestra del explosivo y adicionar a continuación una peroxidasa (enzima) y un sustrato de características reductoras. El H₂O₂ oxidaría al sustrato (reacción que es catalizada por el enzima) y se observaría un cambio de color.

- **Métodos de separación.** Casi todos son métodos cromatográficos, como cromatografía en capa fina o cromatografía de gases acoplada a diferentes detectores: de masas, quimioluminiscentes, etc y también la electroforesis capilar (EC). Se utilizan en separación de mezclas y también, como un primer paso, en la identificación del explosivo. En el caso de la CG aunque es muy utilizada en el análisis forense, tiene en el caso de explosivos muchas limitaciones, impuestas por la elevada masa molecular, poca volatilidad y descomposición térmica de las muestras.
- **Métodos espectroscópicos.** Entre los más utilizados se encuentran: espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier, espectroscopía Raman, difracción de rayos X, espectrometría de masas y SEM/EDX (**S**canning **E**lectron **M**icroscope/**E**nergy **D**ispersive **X**-ray spectroscopy). Esta última técnica es apropiada para la identificación de metales en explosivos primarios y también para los que contienen nitrógeno, aunque es cara y su manejo algo más complicado. También la resonancia magnética nuclear (RMN) permite la elucidación de muestras desconocidas, aunque también es una técnica cara y por ello no suele usarse para rutina.

¹ Conocido también como «la madre de satán» el TATP ha sido utilizado de nuevo en el atentado de París (2015).

Análisis de explosivos «Post-explosión»

Es más complicado que en el caso de explosivos intactos (no destruidos) y generalmente está basado bien en la identificación de trazas de explosivos que han «sobrevivido» a la explosión, o bien en el análisis de los productos de descomposición que se han formado (por ejemplo, de iones tiocianato, SCN^- , característicos de la combustión de la pólvora negra).

Existe un protocolo de actuación, que incluye:

- Examen visual para separar restos.
- Examen al microscopio para localizar restos de explosivo.
- Adsorción de vapores en resinas adecuadas, y posterior elución y análisis. Útil para explosivos volátiles, con elevada presión de vapor, caso del TATP y del TNT.
- Extracción con disolventes de distintos tipos. *Agua* (para explosivos inorgánicos, nitratos, cloratos, percloratos, explosivos débiles e hidrogeles), que presenta el inconveniente de su lenta evaporación. *Metanol* (con él se extraen nitratos orgánicos $-\text{RONO}_2$, nitraminas $-\text{RNNO}_2$ y nitroaromáticos), es poco volátil. *Éter dietílico* (para nitroglicerina y explosivos orgánicos, en general), es volátil aunque muy inflamable y *Acetona* (que disuelve la mayoría de los explosivos orgánicos, especialmente nitrocelulosa) y que además se evapora fácilmente, aunque deja un residuo acuoso a no ser que se seque. También se usan ácidos orgánicos, como en el caso de los explosivos TATP y HMTD, para liberar H_2O_2 . Una vez extraídos los restos de explosivo, se concentrarán los extractos para proceder a su identificación.
- Análisis de las muestras, que incluye técnicas de «screening» o «detección» (TLC y HPLC) y métodos de confirmación como GC/MS. No suelen ser apropiadas ni la espectroscopia infrarroja, debido a las interferencias producidas por posibles contaminantes, ni la resonancia magnética nuclear debido a su baja sensibilidad para estos casos.

5.8.3. Accidente o intencionalidad

El hallazgo de restos de artefactos explosivos es un indicio claro de intencionalidad, mientras que, en general, las explosiones difusas se consi-

deran accidentales. Ambas premisas son válidas, aunque existen situaciones en las que es difícil y a veces imposible llegar a una conclusión; tal sería el ejemplo de una explosión de gas en una vivienda (explosión difusa) o explosiones en lugares con presencia de materiales susceptibles de explotar.

5.8.4. Quién causó la explosión

Llegar a determinar quién ha sido el autor no es sencillo y para ello serán de gran utilidad los resultados de los análisis procedentes de otro u otros indicios encontrados. También son importantes los restos del artefacto explosivo utilizado, ya que los materiales que se emplean y la forma de montarlos suelen ser característicos de determinadas personas o grupos, como sucede en el caso de atentados terroristas, o pueden conducir al lugar donde han sido adquiridos.

Finalmente, a la hora de elaborar el informe pericial no habrá que perder de vista que, aunque no se demuestre intencionalidad, puede existir una responsabilidad por negligencia o imprudencia.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. Defina que se entiende por «flashover».

2. Completar los siguientes huecos:

I El valor de la potencia explosiva o IP de un explosivo se encuentra referido al del..... **II**. En la pólvora, mezcla de nitrato de potasio, carbón y azufre, la fuente de combustible es **III** La nitroglicerina es un ejemplo de explosivo **IV**. Una detonación es..... **V**. Un ejemplo de líquido inflamable esporque

3. Cuál sería la composición (%) de un explosivo formado por una mezcla de nitrato de bario y estafnato de plomo, diseñado para que su balance de oxígeno sea cero.

Datos: Balance de oxígeno: Nitrato de bario = + 31%; Estafnato de plomo = - 19%

4. Los pirómanos cometen con frecuencia el error de suponer que un líquido inflamable utilizado para empezar un fuego se consumirá completamente en el incendio resultante. Explique **por qué** esto no es correcto.

Resolución

1. **Flashover.** Es el aumento repentino de la velocidad de propagación de un incendio confinado, debido a la súbita combustión de los gases acumulados bajo el techo y a la inflamación generalizada de los materiales combustibles del recinto, como consecuencia de la radiación emitida por esta capa de gases caliente.

2. **I.** Ácido pícrico; **II.** El carbono sólido **III.** Fuerte, secundario y de tipo industrial; **IV.** Una combustión supersónica y que implica una onda expansiva. **V.** La gasolina porque libera vapores en cantidad suficiente para que se produzca la combustión a temperaturas inferiores a 37,5 °C.

3. A partir del dato del balance de oxígeno para los explosivos nitrato de bario (positivo) y estafnato de plomo (negativo), se calculará la composición que habría de tener un explosivo formado por una mezcla de ambos para que su BO sea igual a cero de la siguiente manera:

X = fracción de nitrato de bario y $1 - X$ = fracción de estafnato de plomo

$31X - 19(1-X) = 0$ $X = 0,038$ es decir, 38% de BaNO_3 y 62% de estafnato

4. Aunque la temperatura de un fuego supere los 1000° C, es posible encontrar componentes de la gasolina, incluso, con puntos de ebullición entre 40 y 200°C. Esto es así porque: **1.** los líquidos empapan rápidamente los materiales presentes (como moquetas, madera, muebles, telas, cemento....). **2.** La temperatura por debajo de la llama es mucho más baja que por encima, y **3.** Como el fuego arde hacia arriba, los escombros y las cenizas que caen hacia abajo tienden a sofocar las llamas, preservando estos restos para futuros análisis.

LECTURA

«Desarrollando una pista...»

En un almacén de productos textiles se declara un incendio. Una vez extinguido, los investigadores encuentran entre los restos una bombona de gas butano de 12,5 Kg dentro de una pequeña dependencia anexa, de dimensiones: 6m x 6m x 2,5m.

Este hallazgo, podría hacer pensar en la posible intencionalidad del fuego. Por tanto, se comienza realizando unos sencillos cálculos que permitan determinar si la relación volumen de gas butano/volumen de aire se encuentra dentro del rango de inflamabilidad de dicho gas, que es 1,9%-8,5% en volumen.

Las dimensiones de dicha dependencia permitirán determinar el volumen de la nave (volumen de aire) que será:

$$6,0 \times 6,0 \times 2,5 = 90 \text{ m}^3 = 90,0 \cdot 10^3 \text{ L}$$

Conociendo los límites de inflamabilidad del gas (% en volumen), se calcula este rango en litros.

$$0,019 \times 90,0 \cdot 10^3 \text{ L} = 1,71 \cdot 10^3 \text{ L} \quad \text{Límite inferior de inflamabilidad}$$

$$0,085 \times 90,0 \cdot 10^3 \text{ L} = 7,65 \cdot 10^3 \text{ L} \quad \text{Límite superior de inflamabilidad}$$

Y a partir de la ley de los gases ideales $P V = n R T$ y suponiendo una temperatura de 25 °C y presión de 1 atmósfera, la equivalencia entre litros y moles.

$$1,0 \text{ atm} \times 1,71 \cdot 10^3 \text{ L} / 0,082 \text{ atm L K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 298 \text{ K} = 70,0 \text{ moles} \quad \text{L.I.I}$$

$$1,0 \text{ atm} \times 7,65 \cdot 10^3 \text{ L} / 0,082 \text{ atm L K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 298 = 313,1 \text{ moles} \quad \text{L.S.I}$$

Como la masa molar del butano C_4H_{12} es 60,0 g mol⁻¹, los 12,5 Kg de gas butano, son

$$12,5 \times 10^3 / 60 = 208,3 \text{ moles de gas butano contenidos en la bombona}$$

De acuerdo a los cálculos realizados, los moles de gas butano contenidos y liberados de la botella encontrada (208,3 moles), se hallan dentro del rango de inflamabilidad (70,0–313,1), por lo que este gas podría haber mantenido la combustión. No obstante hay que tener en cuenta que se trata de una estimación que permite contemplar la posibilidad de intencionalidad, pero siendo conscientes de las aproximaciones que se han hecho, entre ellas:

- El valor de la T y la P son estimados y
- Considerar que la nave es cerrada y no se ha escapado nada de gas

Por tanto, esta prueba proporciona información, pero por si sola no permite concluir si ha existido o no intencionalidad. **Es necesario seguir investigando otras pruebas.**

BALÍSTICA FORENSE. DETECCIÓN DE RESIDUOS DE DISPARO



En el recuadro, calibre 9x19 mm Parabellum, de uso muy extendido y popular en el mundo de las armas

María del Pilar Cornago Ramírez

OBJETIVOS

General

El objetivo general del tema será ofrecer una visión acerca de las armas y municiones como base para el estudio de todas aquellas pistas que es posible encontrar allí donde se ha producido un incidente con armas de fuego, como son: proyectiles, casquillos y restos de pólvora parcialmente quemada.

Específicos

1. Describir las características más importantes de las armas de fuego y de la munición.
2. Distinguir entre balística interior, balística exterior y balística de efecto.
3. Reconocer el valor forense del examen de las armas de fuego y evidencias relacionadas con ellas.
4. Diferenciar el tipo de información que es posible obtener a partir del examen de armas y municiones.
5. Establecer las técnicas de análisis más importantes para detectar restos de disparos.
6. Indicar el protocolo correcto a seguir, para una adecuada recolección de pruebas, en la escena de un suceso.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Será conveniente revisar de nuevo los fundamentos de las reacciones de oxidación-reducción que ya aparecen en el tema anterior, y además y con especial atención otros tipos de reacciones químicas como son las de precipitación o las de ácido-base implicadas en el estudio de residuos de disparo.

Tema 6. Balística forense. Detección de residuos de disparo

6.1. Introducción

6.2. Balística forense

6.3. Balística instrumental

6.4. Balística interior

6.5. Balística exterior

6.6. Balística de efectos o balística terminal

6.7. Trabajo de investigación forense

6.8. Investigadores forenses en los tribunales de justicia

Ejercicios y soluciones

Lectura. «Números de serie: su importancia y recuperación en caso de borrado»

6.1. INTRODUCCIÓN

Los chinos inventan la pólvora en el siglo IX de nuestra era para fabricar fuegos artificiales y armas, y son los bizantinos y los árabes los que la introducen en Europa alrededor del 1200. Esta pólvora tradicional o «pólvora negra», ha sido sustituida progresivamente por la denominada «pólvora sin humo», base, hoy día de los propulsores usados en las armas de fuego.

Actualmente, un porcentaje elevado de los delitos que se cometen guardan relación con las armas de fuego. Afortunadamente para la policía y los investigadores forenses, un proyectil y el arma que lo ha disparado ofrecen unas características especiales que permiten determinar si existe o no una relación entre ambos. El cañón de un arma deja en el proyectil unas marcas que son únicas; no hay dos cañones que dejen marcas iguales como no hay dos personas que tengan la misma huella dactilar (tema 7). Estas marcas se deben, por un lado, a la propia fabricación del arma y, por otro, al uso de la misma. El proyectil procedente de un arma estriada presentará unas caracte-

terísticas propias del tipo de cañón, un conjunto de elevaciones o *campos* y de depresiones o *surcos* que variaran en ángulo, anchura o profundidad y cuyo estudio permitirá conocer el tipo y modelo de arma utilizada.

La aparición en 1925 del microscopio de comparación, que permite visualizar y comparar dos proyectiles de forma simultánea, marcó el punto de inflexión en la consideración de la balística como rama de la Ciencia Forense. A Calvin Goddard (1891-1955), de nacionalidad americana y médico de profesión, se le considera un investigador pionero en este campo, siendo famosas sus intervenciones en el esclarecimiento de casos, como el de Sacco-Vanzetti (1920) y la masacre de San Valentín (1929).

Por otra parte, el disparo con arma de fuego origina unos residuos que se depositan en las proximidades del arma. La detección y análisis de los mismos relaciona al individuo con la escena del suceso.

6.2. BALÍSTICA FORENSE

La Balística (del latín *Ballistan*, lanzar), y de acuerdo con la definición del diccionario de la RAE es «la ciencia que estudia la trayectoria de los proyectiles», es decir, su alcance y dirección. Aunque de la propia definición, se desprende que esta ciencia se ocupa del movimiento de proyectiles en general, en el tema se hará referencia únicamente a los proyectiles procedentes de armas de fuego.

La *balística forense* es la rama de la criminalística que, con la participación de otras distintas ciencias, se encarga de resolver aquellos hechos delictivos en los que intervienen armas de fuego. Sus objetivos son:

- Estudio de las características de las armas de fuego y sus municiones: balística instrumental.
- Estudio de los fenómenos que ocurren en el interior del arma: balística interior
- Estudio de los fenómenos que ocurren en la trayectoria del proyectil, desde que abandona el arma hasta que alcanza su objetivo: balística exterior
- Estudio de los efectos que produce el proyectil en el objetivo alcanzado: balística de efectos.



Se trata pues de un campo de estudio amplio y complejo que abarca todos los aspectos arriba mencionados. Pero el trabajo de los investigadores forenses no acaba aquí, sino que además habrán de elaborar informes y si la situación lo requiere prestar apoyo en los tribunales de justicia.

6.3. BALÍSTICA INSTRUMENTAL

Un *arma de fuego* es un instrumento sólido cuyo funcionamiento en esencia es similar para todas ellas. El disparo comienza con la presión que el dedo del tirador ejerce sobre el gatillo, que hace que la aguja percutora golpee sobre la parte posterior del cartucho —culote— provocando el encendido del fulminante. La llama producida hace detonar la pólvora y la presión de los gases que se producen en la reacción propulsa uno o varios proyectiles (caso este de las escopetas perdigones) a gran velocidad, capaces de originar lesiones de distinta consideración e, incluso, la muerte.

Existen, atendiendo a diferentes criterios, distintas formas de clasificar las armas de fuego. En cuanto a la forma interior del cañón o *ánima*, es posible diferenciar entre:

1. Armas de ánima lisa. En ellas la pared interna del cañón forma una circunferencia de superficie lisa donde no existe ningún tipo de marca. Son armas de menor alcance que las de ánima estriada y en las que el interés forense radica en el estudio de los perdigones o postas, que es la munición que disparan estas armas. En este grupo se incluye la mayoría de las escopetas, aunque en el mundo de la caza se utilizan también escopetas de cañón estriado que disparan balas denominadas subcalibradas o enfundadas.

Las *balas subcalibradas*, son balas con menor peso que las balas convencionales lo que les proporciona velocidades iniciales muy altas. Suelen llevar una envuelta parcial de plástico o «sabot» que protege a la bala del roce con las paredes mientras circula por el cañón. La bala gira dentro del cañón unida al “sabot” que es el que toma las estrías del arma. Finalmente, este “sabot” se separa de la bala cuando abandona el cañón, no afectando para nada el vuelo de la bala.

2. Armas de ánima poligonal. El interior del cañón presenta «caras» que giran helicoidalmente a lo largo del cañón (figura 6.1).

3. Armas de ánima rayada o estriada (figura 6.1). Es el tipo de ánima más utilizado y en ella la pared interior presenta un rayado formado por surcos y crestas que gira helicoidalmente a lo largo del tubo hacia la derecha o la izquierda, dando lugar al estriado. Las marcas se realizan por procedimientos mecánicos con el objetivo de generar en el proyectil un movimiento de giro sobre su propio eje, que contribuye a su estabilización mientras describe una trayectoria. En este grupo se encuentran la pistola, el revólver o el fusil. El estriado es muy importante cuando se procede a identificar un arma.



FIGURA 6.1. Diferentes tipos de ánimas.

En el estriado, y como se representa en la figura 6.2, se distinguen las siguientes partes:

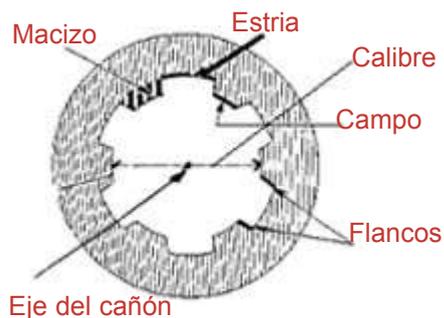


FIGURA 6.2. Partes del estriado de un cañón y representación del calibre.

- **Estría, fondo, surco o «groove»**, hendidura en el ánima del cañón y parte más externa del conducto desde el eje del cañón.
- **Macizo**, volumen de la estría
- **Campo, cresta o «land»**, parte superior del macizo.
- **Flancos**, paredes de la estría o partes laterales del macizo.

6.3.1. Características de las armas de fuego

Aunque a la hora de realizar el estudio forense de un arma de fuego es necesario determinar una serie de características, como son el tipo de arma, lugar de fabricación, modelo, marca, calibre, longitud del cañón, número de serie o tipo de material de la empuñadora, entre otros, en este tema haremos referencia únicamente al calibre, una de las características más relevantes de las armas de fuego que utilizan un cañón para proyectar la munición. Así,

Calibre es el diámetro interno del cañón en un arma de fuego o diámetro del ánima, medido utilizando un procedimiento adecuado. El calibre se puede referenciar como calibre real y calibre nominal.

Calibre real sería el diámetro interno del ánima del cañón. En las armas de ánima rayada, esta distancia se mide entre dos campos (land diameter LD), (figura 6.2) y se correspondería con el diámetro del proyectil disparado medido de estría a estría. Esta medida, si se utiliza el Sistema Decimal de medida se expresa en milímetros (9 mm) y en centésimas o milésimas de pulgada cuando el sistema utilizado es el Sistema Anglosajón (en el que el número con que se representa lleva delante un punto, por ejemplo .42), siendo la equivalencia entre ambos sistemas:

$$1 \text{ pulgada} < > \text{ a } 25,4 \text{ mm}$$

Calibre nominal, es una norma antigua que se utilizaba cuando las armas cargaban por la boca del cañón (denominada de avancarga), y que se define como la cantidad de balas de forma esférica que se pueden fabricar a partir de una libra inglesa de plomo (453,59 gramos). Así si se obtenían 12 esferas se decía que el calibre era 12. En la actualidad, este calibre es de uso habitual en las armas de caza menor y siguiendo con el mismo ejemplo para el calibre 12, el diámetro interior del cañón serían 20 mm (diámetro de una de las 12 esferas). Las medidas del calibre nominal no guardan una relación directa con el diámetro real del ánima, aunque lo que si es cierto es que un mayor calibre se corresponde con un diámetro de cañón más pequeño como se puede ver en la tabla 6.1.

TABLA 6.1. Calibres de escopeta y su correspondencia con el diámetro del ánima

Calibre de la escopeta	Diámetro del ánima
12	18,5 mm
16	16,925 mm
18	15,875 mm
20	10,375 mm

6.3.2. Características de la munición

En la escena de un crimen donde se ha hecho uso de un arma de fuego es posible encontrar vainas y/o proyectiles, dos elementos diferentes e integrados ambos en el cartucho.

Diferenciar las partes que componen la munición y conocer su nomenclatura es importante, ya que a veces se nombran indistintamente y por tanto de forma errónea algunos de estos elementos, caso de vaina y cartucho o bala y proyectil. Así:

Cartucho: cuerpo compacto que contiene todos los elementos que son necesarios para realizar un disparo con un arma de fuego y *bala* uno de esos elementos. Se dice que un cartucho sin bala es un *cartucho de fogeo*. Podemos diferenciar entre *cartuchos metálicos* y *cartuchos semimetálicos* o de escopeta, compuestos por una parte metálica (culote) y por otros materiales, como cartón o plástico. La mayoría de los cartuchos actuales son metálicos y sus componentes son: bala, vaina o casquillo, pólvora o carga de proyección y capsula iniciadora o capsula del fulminante (figura 6.3).

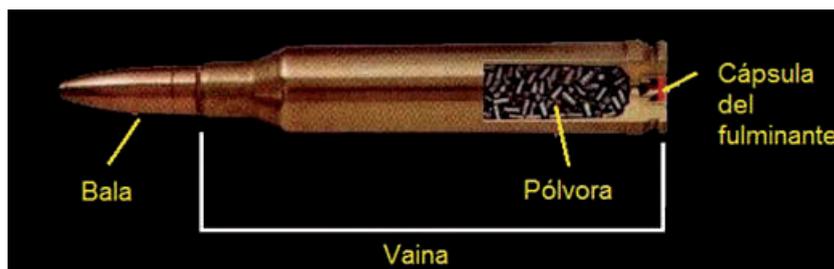


FIGURA 6.3. Partes de un cartucho metálico.

Los cartuchos de escopeta llevan un componente adicional que es el *taco*, cuya misión es proteger a los perdigones del rozamiento con las paredes del cañón evitando que se deformen y además proporcionar un sellado interno del cartucho que permite aprovechar al máximo los gases de la combustión.

Bala: elemento principal de la munición, que es proyectada desde el arma de fuego para alcanzar un objetivo y ocasionar un efecto. Todas las balas, excepto las esféricas, tienen tres partes: la base, el cuerpo y la punta. Esta última puede modificarse con el fin de obtener una mayor efectividad (efecto expansivo, incendiario etc.). El *calibre* de la munición se refiere al diámetro de la bala.

En lo que respecta a cartuchos de rifle, la nomenclatura europea lo define con dos números expresados ambos en mm y separados por un aspa; el primero indicativo del diámetro de la bala y el segundo de la longitud de la vaina. Así una munición de 9 x 19 mm, significaría que se trata de una bala de 9 mm de diámetro alojada en un casquillo de 19 mm de longitud. Los anglosajones, por otro lado, nomenclaturan sus cartuchos mediante un punto seguido de la fracción de pulgada correspondiente y a continuación el nombre del inventor o fabricante, por ejemplo .38 S&W (correspondiente al revólver Smith and Wesson de calibre 38). A veces se añaden también otras siglas, como BP (black power) o MAGNUM (proyectil que sobrepasa los 762 m.s⁻¹ de velocidad). En lo que se refiere a cartuchos de pistola, los europeos indican el calibre con una cifra en mm seguida del fabricante o nombre del arma que lo dispara (9 mm Parabellum o 9 x 19 mm).

En las balas esféricas de los cartuchos semimetálicos se distingue entre postas cuando el diámetro está entre 6,1 y 9,1 mm y perdigones cuando el diámetro es inferior a 5 mm.

Es importante utilizar de forma correcta los términos bala y proyectil. Aunque se trata del mismo elemento (figura 6.3), se le denomina *bala* cuando forma parte del cartucho y *proyectil* cuando ha sido disparado por el arma. Es entonces el proyectil y no la bala el que adquiere las características del arma que lo dispara.

Vaina: receptáculo metálico que contiene la pólvora y que reúne todos los elementos del cartucho con excepción de la bala. Sus formas pueden ser cilíndricas o tronco-cónicas y dependiendo del material con el que se

fabrican metálicas o semimetálicas. En España las metálicas son de latón con una composición de 72% de Cu y 28% de Zn, mientras que las semimetálicas suelen ser de plástico.

Pólvora: agente propulsor, cuya misión es impulsar a la bala en su trayectoria.

Cápsula fulminante o *detonante*: sirve de obturador de la vaina y es la parte del cartucho donde se aloja la materia explosiva, el *fulminante*, que es un compuesto químico sensible a los impactos y situado en la culote. Entre los fulminantes, el fulminato de mercurio fue muy utilizado hasta mediados del siglo XX y que a causa de su toxicidad y potencial corrosivo para el cañón, se ha sustituido poco a poco por otros, como la azida de sodio o el estifnato de plomo (sección 5.5.4).

6.4. BALÍSTICA INTERIOR

Es la parte de la balística que se ocupa del estudio de los fenómenos que ocurren desde que el percutor del arma golpea el fulminante del cartucho hasta que el proyectil abandona el arma. Este período, que no suele mayor que una centésima de segundo, se inicia con la bala en reposo y en él se producen una serie de fenómenos físicos y químicos, como son la ignición del fulminante y la combustión de la pólvora así como el entallado y giro del proyectil alrededor de su eje como consecuencia del rayado del arma (figura 6.4). También es aquí donde el proyectil, además de las estrías del ánima del cañón, adquirirá cualquier marca o imperfección que esté presente en aquél y ***que tendrá una gran importancia en el momento de la identificación.***

6.4.1. La deflagración

Una sustancia *deflagra* cuando arde súbitamente con llama y sin explosión. Para que se produzca este proceso, el percutor de un arma de fuego debe accionar sobre la cápsula detonante, situada en el centro o en el borde de un cartucho de bala o de munición múltiple, que contiene el fulminante. Se produce así el encendido de dicho fulminante o *ignición*, que se propaga al interior de la vaina o cápsula, lo que origina a su vez la combustión de la pólvora, que es la carga impulsora.

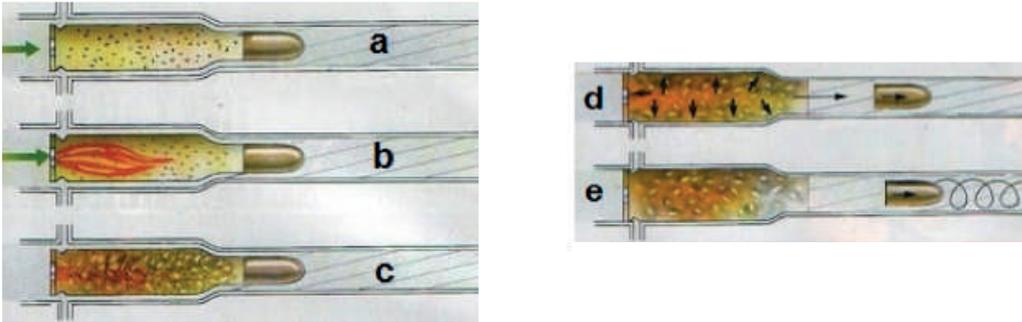


FIGURA 6.4. Fases de la balística interior. a. Bala en reposo. b. Encendido del fulminante. c. Combustión de la pólvora. d. Formación de gases y separación de la bala del cartucho. e. Giro y movimiento del proyectil hacia el exterior del ánima.

En la reacción de combustión (proceso químico), la pólvora se descompone originando un gran volumen de productos gaseosos, cuya presión hace que la bala se desprenda del resto del cartucho y sea expulsada al exterior. En este proceso se libera gran cantidad de calor que se transforma en energía cinética, que a su vez se consume, en forzar la expulsión de los gases producidos, vencer el rozamiento del proyectil con las paredes del cañón e impulsar el proyectil, entre otras cosas.

El diámetro de las balas suele ser ligeramente mayor (entre tan solo 1 y 3 décimas de milímetro) que el diámetro de la boca del cañón para evitar que los gases originados en la reacción de combustión escapen del tubo del fusil y permitir a la bala adquirir el impulso de salida adecuado.

El proyectil obtiene así la energía de propulsión dentro del cañón siendo en la boca de salida del mismo donde adquiere su máxima velocidad.

6.4.2. Velocidad de salida de los proyectiles

La velocidad de la munición en armas ligeras puede ser: *subsónica*, cuando es inferior o ligeramente superior a la velocidad del sonido ($343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en la atmósfera terrestre), como es el caso de las balas de pistola y revólver, que suelen ser ineficaces contra chalecos antibalas, o *supersónica*

cuando superan de forma amplia la velocidad del sonido (entre 600 y 1000 m.s⁻¹), como es el caso de la munición de fusiles y ametralladoras, capaces de atravesar varios chalecos antibalas colocados paralelamente unos a otros y con una cierta separación.

La velocidad de salida de un proyectil en las armas convencionales es función, principalmente, de la cantidad y calidad del propelente, de la masa del proyectil y de la longitud del cañón.

Una misma cantidad de propelente si se consume lentamente, necesitará un cañón más largo para quemarse de forma total y también será capaz de impulsar proyectiles más pesados, mientras que si se consume de forma más rápida, será capaz de imprimir velocidades mayores a proyectiles más ligeros.

En lo que se refiere a la longitud del cañón; cuanto mayor sea éste mayor será también el tiempo disponible para que la bala adquiriera la fuerza impulsora, desarrollando velocidades de salida más grandes. Sin embargo, la presión de los gases originados que impulsan la bala, va disminuyendo con la longitud del cañón al tiempo que aumenta también la fricción entre la bala y el cañón, de forma que si la longitud llegara a ser demasiado grande podría perderse velocidad.

6.4.3. Mezclas deflagrantes

Como carga impulsora de proyectiles en armas de fuego se emplean dos clases de mezclas deflagrantes, pólvora negra y pólvoras sin humo.

Pólvora negra: es una mezcla de nitrato de potasio, un agente oxidante que suministra el oxígeno y por tanto es el comburente, y carbón de leña y azufre, que son fácilmente inflamables. Una fuente de calor inicia esta reacción de oxidación, en la que se libera calor, gases (CO, CO₂, N₂, H₂S, H₂ y CH₄), luz y distintos productos sólidos (S, C, K₂CO₃, K₂S, (NH₄)₂CO₃, K₂SO₄) procedentes de la combustión. La pólvora negra al arder deja un residuo espeso que es higroscópico y que va causando la corrosión del cañón. Se utiliza en pirotecnia, habiendo quedado reducido su uso como propelente sólo de armas antiguas.

Pólvoras sin humo o *pólvoras blancas.* En este tipo de pólvoras los productos de combustión son fundamentalmente gaseosos a diferencia de lo que ocurría en el caso de la pólvora negra en la que el 50% de los productos de combustión eran sólidos. Los pocos residuos que deja no son higroscópi-

cos, lo que posibilita su uso en armas automáticas que son más complejas. Son además más estables y por tanto más fáciles de fabricar y almacenar y también más potentes que la anterior.

Entre ellas se encuentran las pólvoras de nitrocelulosa de base simple o coloidales, las de base doble, formadas por 1,2,3-trinitroxipropano (nitroglicerina), nitrato de celulosa (nitrocelulosa) y otras sustancias como moderadores (bajan la velocidad de combustión), estabilizadores, etc., y las de base triple que contienen nitrocelulosa, nitroglicerina, y una cantidad sustancial de nitroguanidina (figura 6.5), que fueron desarrolladas en la década de 1930 y destinadas principalmente para la munición de gran calibre como la que se usa en artillería y tanques.

La pólvora blanca es un «**explosivo propulsor**» en el que la reacción exotérmica se propaga a velocidades entre 10^{-2} y 2 m.s^{-1} a diferencia de los denominados «**explosivos detonadores**» como la dinamita que lo hacen a velocidades entre 2 y 10^3 m.s^{-1} .

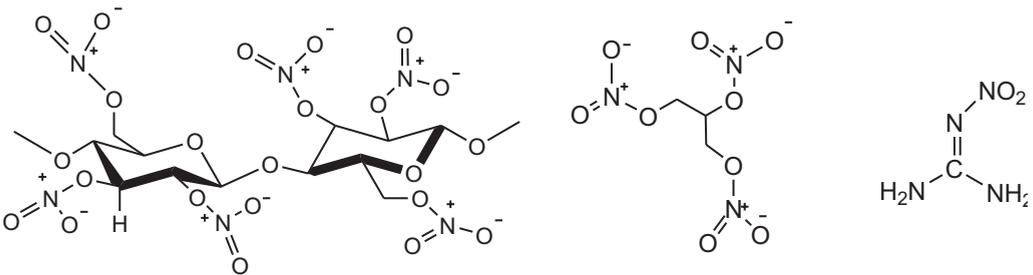


FIGURA 6.5. Nitrato de celulosa, 1,2,3-Trinitroxipropano y 1-Nitroguanidina

La pólvora se incluye en la clase 1 “materias y objetos explosivos” del protocolo de recomendaciones para el transporte de mercancías peligrosas, y se señala con la etiqueta representada en la figura 6.6.



FIGURA 6.6. Etiqueta con la que se señalizan las mercancías peligrosas de clase 1.

6.5. BALÍSTICA EXTERIOR

Esta parte de la balística forense se ocupa del estudio de los fenómenos que acontecen al proyectil desde que sale del cañón del arma, rotando sobre su eje, hasta que se detiene o alcanza un blanco. Es decir, que estudia la trayectoria del proyectil, la cuál y debido a fenómenos asociados con la pérdida de la fuerza impulsora, como la resistencia del aire y la atracción de la fuerza de la gravedad, será una curva parabólica que nace en la boca del cañón y finaliza en el blanco. Estos tres tipos de fuerzas mencionados son independientes entre sí, por lo que cuánto mayor sea la fuerza que impulsa al proyectil mayor será la distancia que pueda recorrer antes de caer al suelo.

Desde el punto de vista forense, determinar la trayectoria tendrá su importancia para, conocido el punto de impacto del disparo, tratar de determinar el punto de origen del mismo. Para ello el investigador forense deberá tener en cuenta todos aquellos elementos de interés encontrados en la escena, tales como ubicación de armas y casquillos, posición de la víctima si la hubiera, impactos, orificios de entrada de los proyectiles y sus características (forma y ángulo de incidencia), manchas de sangre y mecanismos de formación de las mismas (proyección, caída libre, etc.).

Existen una serie de parámetros que influyen en la trayectoria seguida por el proyectil y que será necesario tener en cuenta. Unos son inherentes al arma y la munición, como son el calibre, la forma de la parte delantera y trasera del proyectil u ojiva y la velocidad del proyectil, tanto de salida como posteriormente en el aire. La velocidad de un proyectil y la resistencia del aire guardan relación directa, de forma que si la velocidad es pequeña también lo será la resistencia. Existe, sin embargo un valor de velocidad que coincide con la velocidad del sonido, en el que la resistencia del aire se eleva de manera más significativa.

La velocidad en proyectiles denominados de alta velocidad se suele expresar en términos relativos a la velocidad del sonido. Así, se dice que un proyectil tiene una velocidad de 3 «mach» cuando su velocidad es tres veces la del sonido.

Otros parámetros, como el ángulo de disparo, las condiciones atmosféricas de presión y temperatura, la densidad del medio en el que se mueve el



proyectil y la dirección y velocidad del viento existente, son ajenos al arma y a la munición utilizada. Por ejemplo, el viento frontal hará que disminuya el alcance del proyectil, mientras que si sopla desde atrás aumentará dicho alcance y si lo hace lateralmente afectará a la trayectoria. En lo que se refiere a la densidad del medio, cuanto mayor sea ésta más se frenará el proyectil, caso del agua, metal o un cuerpo con el que impacte.

En los estudios conducentes a determinar la trayectoria de los proyectiles se considerará también la posibilidad de rebotes, que son consecuencia de choques entre el proyectil y objetos estáticos o dinámicos como son los vehículos en movimiento que se encuentren en su camino. Determinar la modificación de la trayectoria del proyectil a causa de estos rebotes, permitirá en algunas ocasiones (y, sobre todo, si se trata de sucesos en espacios cerrados) inferir la intencionalidad o accidentalidad de un disparo. Recordar también que la trayectoria de un proyectil dentro del cuerpo de una víctima no tiene por qué estar relacionada necesariamente con su trayectoria fuera del mismo.

6.6. BALÍSTICA DE EFECTOS O BALÍSTICA TERMINAL

Es la parte de la balística que estudia el comportamiento del proyectil cuando alcanza el blanco, es decir desde que impacta en él hasta que detiene su movimiento. Los efectos producidos por el impacto de los proyectiles serán función de factores tales como, geometría, diseño, composición y velocidad del proyectil, ángulo de impacto, distancia de disparo y resistencia y masa del blanco.

Uno de los campos de la balística de efectos es el estudio de las heridas producidas, terreno que compete totalmente al médico forense y que aportará datos acerca de la distancia a la que se ha producido el disparo. Se puede distinguir entre: contacto directo (hasta 2 cm), contacto próximo (entre 2 y 60 cm) y disparos a distancia (por encima de 60 cm), en función del aspecto de las mismas. También la presencia, distribución, forma y densidad de los depósitos de restos de pólvora, restos metálicos y restos del fulminante (sección 6.7.2), alrededor del orificio de entrada del proyectil ayudarán a determinar dicha distancia.

En función del efecto que producen los proyectiles cuando impactan en el blanco, podemos distinguir entre balas convencionales, que son la mayoría, balas expansivas y balas frangibles.

Balas expansivas. Aquellas que una vez alcanzado el blanco abren su punta, se deforman y expanden, causando daños muy elevados. Generalmente, y debido al efecto de expansión, se quedan alojadas en el interior del blanco y no rebotan. Esta munición de la que existen muchos tipos diferentes, tiene su origen en el siglo XIX, en una factoría de la región de «Dum Dum» en la India y su uso, fue prohibido en el Convenio de La Haya en junio de 1899, aunque esta restricción sólo se aplica a usos militares. (figura 6.7).

Balas frangibles. Aquellas capaces de penetrar y dañar tejidos blandos, pero que se fragmentan en partículas muy pequeñas, como un polvo fino, cuando impactan con superficies duras. No rebotan y tienen un poder de penetración pequeño, por lo que no traspasan el blanco. Es un tipo de munición que se fabrica para calibres cortos y su composición suele ser una mezcla de cobre, estaño y una sustancia aglomerante como nilón o poliuretano. Su objetivo como el de las anteriores es causar más daño que una bala convencional (figura 6.7).



FIGURA 6.7. Balas expansivas y balas frangibles.
Aspecto, de ambas una vez que impactan.

6.7. TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORENSE

Se desarrolla a veces en la escena del suceso y posteriormente en el laboratorio, aunque en ocasiones, su labor se prolonga a los tribunales de justicia.



6.7.1. Trabajo en la escena del suceso

El lugar donde se han producido disparos está repleto de pruebas. Tales son: las balas o perdigones, las fundas o vainas que contenían las balas, que normalmente son expulsadas por las armas y que se localizan en los alrededores, o también tacos presentes en los cartuchos de escopetas, los restos de pólvora quemada que sale a través del cañón y de otros orificios del mecanismo y carcasa del arma, el sonido que generalmente acompaña al disparo y que si ha sido escuchado por algún testigo, es también una evidencia importante que ayudará a situar la hora en que el suceso tuvo lugar, y la naturaleza del daño producido, que permite descartar algunos tipos de armas como responsables del disparo.

El examen de la escena del tiroteo requiere seguir un protocolo adecuado para poder reconstruir con éxito lo que allí sucedió. Este protocolo incluye los siguientes pasos:

1. En primer lugar proceder a *realizar fotografías*, de forma exhaustiva, de todo el perímetro establecido. (ver en tema 1).
2. *Recuento de los disparos realizados*, bien interrogando a los testigos, buscando y marcando la posición de los casquillos o, en el caso de que se encuentre el arma, revisando la munición que queda sin disparar. Los restos de casquillo pueden orientar acerca de la posición del o de los tiradores.
3. *Toma de muestras en la víctima* alrededor de la herida y en los sospechosos, si los hubiera, con el fin de localizar distintos tipos de residuos en sus manos y ropa: restos de pólvora quemada, de fulminante, de metales procedentes de la munición o de aceite provenientes de los mecanismos del arma.
4. *Búsqueda de proyectiles*. Pueden encontrarse alojados en el cuerpo de una víctima (material blando) y brindarían información valiosa acerca del tipo de arma que las disparó. Si además se encontrara el arma y existiera coincidencia entre las marcas de ambas sería una prueba concluyente de la relación arma-proyectiles. Cuando los proyectiles están incrustados en superficies duras sufren deformaciones, por lo que no pueden tener valor identificativo en lo que al arma se refiere, pero aportan otro tipo de información también valiosa a la hora de reconstruir las trayectorias.

5. *Búsqueda de casquillos*. Los casquillos ayudan por un lado a identificar el arma como consecuencia de las marcas originadas por las armas en el disparo. Por otro lado, si se realizan disparos de prueba con munición del mismo tipo se puede conocer la distancia a la que los casquillos salen proyectados y, por tanto, tener una idea de la posición o posiciones de los tiradores.

Sobre la posición de balas y casquillos encontrados, y teniendo en cuenta el medio de difusión (aire, agua, etc.) el personal investigador allí presente tratará de determinar la trayectoria de los proyectiles. El láser, como hemos visto en las series del CSI, será en ocasiones una herramienta valiosa.

6.7.2. Trabajo en el laboratorio

Como siempre, una vez fotografiada la escena, todas las pruebas encontradas se recogen, se embalan y etiquetan y se envían al laboratorio para su análisis.

Examen de proyectiles y casquillos

Un proyectil que ha pasado por el cañón de un arma, y como consecuencia de las fuerzas de rozamiento ocasionadas por su desplazamiento, muestra unas características que son únicas y propias de dicho cañón, como son las estrías y los campos entre ellas y otras marcas o muescas producidas, bien durante el rayado del arma, bien por la acción de otras balas, durante la limpieza del cañón o por corrosión del mismo. De esta forma, el dibujo que presentan el ánima de un cañón y la bala una vez disparada es comparable al de una fotografía y su negativo y es el que permitirá, de forma comparativa, identificar el cañón utilizado. Es decir que las marcas observadas en el proyectil permiten *identificar* (situar el arma en un grupo o una clase) e *individualizar* (determinar una única arma dentro de ese grupo) el arma involucrada en un hecho delictivo. Los proyectiles, además, podrán contener huellas dactilares, restos de diferentes materiales que han atravesado en su recorrido, como fibras, vidrios, madera o pintura, y en el caso que haya víctimas, sangre, pelo o huesos. O también marcas del material contra el que han impactado, como, cemento, arena o chalecos antibalas (figura 6.8).



FIGURA 6.8. Marcas del impacto con un chaleco antibalas.

La vaina, igual que el proyectil, presentará una serie de huellas impresas que permitirán identificar e individualizar un arma. Así, existirán

- *Huellas propias*, impresas por el fabricante en la cabeza del cartucho y que le caracterizan.
- Posibles *huellas dactilares* de la persona que los ha manipulado.
- *Huellas de percusión*. Piezas como la aguja percutora deja marcas geométricas cuando choca con la cápsula del fulminante.
- *Huellas de extracción*. La pieza de extracción, cuya función es sujetar la vaina durante su retroceso, deja huellas impresas al arañar la garganta o parte superior de la vaina antes de ser expulsada.
- *Huellas de eyección*. Se encuentran alrededor de la base del culote o parte inferior de la vaina y se producen cuando la vaina es liberada de la pieza de extracción y expulsada a través de la ventana de eyección.

El procedimiento para individualizar un arma requiere:

- En *primer lugar*, examinar la posible existencia de huellas dactilares o de otro tipo que podrían perderse fácilmente. También determinar la forma y tipo de proyectil, casquillo y cartucho y el calibre del proyectil. A continuación, el análisis de las marcas impresas en proyectiles y vainas completarán la información.
- En *segundo lugar*, en caso de disponer del arma, proceder a la comparación de las marcas existentes en los proyectiles y vainas recuperados con las que se produzcan en proyectiles y vainas obtenidos por el experto utilizando el arma sospechosa para determinar su

coincidencia y por tanto la posible implicación del arma en el hecho delictivo. Con el fin de reproducir esas marcas se utilizan balas de las colecciones disponibles en los laboratorios y se realizan pruebas de tiro utilizando grandes contenedores llenos de un material deformable, como agua o gel, que permiten recuperar los proyectiles sin ningún daño.

- *Finalmente*, realizar el examen y comparar las marcas así obtenidas con las existentes en las balas y casquillos encontrados, utilizando para ello un microscopio de comparación que consta de un ocular y dos objetivos unidos por un puente óptico que permite al operador observar en el campo del objetivo dos objetos diferentes (ver tema 2). La concordancia obtenida en la comparación hace posible afirmar que ambas balas y también ambas vainas producidas en los disparos proceden de la misma arma.

En el examen y estudio de la munición (proyectiles y vainas) hay que tener presente que: **1.** Una misma arma puede disparar diferentes tipos de munición, **2.** Un mismo tipo de munición puede ser disparada por armas diferentes y **3.** Un arma puede modificarse para disparar munición que no es la suya habitual.

Es importante resaltar que los dictámenes basados en estos resultados de concordancia son de una gran certeza y no dejan lugar a dudas ni discrepancias.

Examen de armas

El tipo de examen a realizar, cuando al laboratorio llega un arma sospechosa, vendrá determinado por las circunstancias en que se haya producido el hecho delictivo. Existe, no obstante, un protocolo a seguir que incluye:

- Asegurarse que el arma esté descargada y realizar las fotografías necesarias para mostrar las condiciones en que se encuentra el arma.
- Comprobar la presencia en el arma de huellas dactilares o de ADN procedentes de células de la piel, sangre del agresor o de la víctima, de fibras textiles cuyo origen podrían ser guantes o alguna otra parte de la indumentaria del agresor, o restos de saliva encontrados en el cañón del arma, y que podrían ser indicativos de un posible caso de suicidio.



- Pasar un paño limpio por la parte exterior del cañón. La presencia de residuos de disparo indicaría que el arma ha sido disparada y la coincidencia entre estos restos y los hallados en un sospechoso podrían ser motivo de su incriminación como autor de los hechos.
- Determinar el tipo de arma (pistola, revolver, escopeta, etc.), número de cartuchos que puede disparar, modelo y fabricante, número de serie (si está intacto o ha sido borrado) y calibre.
- En el caso de que se trate de un arma de ánima rayada, el número de estrías y campos, y la dirección de giro en su interior, a la derecha o a la izquierda.
- Si se trata de escopetas habrá que determinar el “choke” de la misma, es decir como de abierta o cerrada está la parte delantera del cañón, su peso, la longitud total del arma y la del cañón.
- Revisar el interior del cañón en busca de posibles restos, antes de proceder a disparar el arma como parte del protocolo de examen.

6.7.3. Determinación de restos de disparo

Cuando se produce un disparo, la pólvora deflagra y hace que el proyectil salga impulsado hacia delante. Pero además del proyectil, tanto hacia adelante como hacia atrás, se proyectarán compuestos resultantes de la explosión de la pólvora y de la descomposición del detonante, o también procedentes del material del cañón, cartuchos y proyectiles.

Estos restos son una compleja mezcla heterogénea de componentes orgánicos que proceden principalmente del propelente y de componentes inorgánicos, cuyo origen es el fulminante y la bala, y que en forma de partículas finamente divididas se depositarán en superficies próximas a la fuente del disparo: cañón del arma, cartuchos, ropa, manos y cara del tirador y también, si se encuentra suficientemente próximo, sobre el blanco.

Existen laboratorios forenses que de forma rutinaria realizan determinaciones, tanto de la parte inorgánica como orgánica, de los residuos de disparo, mientras que otros laboratorios sólo realizan análisis para la determinación de la parte orgánica cuando el análisis inorgánico ha dado positivo.

Recogida de muestras

Sea cual sea el procedimiento elegido para la toma de muestras, ésta se realizará lo mas rápidamente posible y siempre extremando las precauciones para evitar posibles pérdidas y contaminaciones.

El primer método utilizado para la recogida de residuos de disparo en zonas próximas al arma utilizada fue el denominado «*Test de la parafina*», consistente en recubrir las manos del sospechoso con una película de parafina calentada a temperatura adecuada. El calor produce una dilatación de los poros de la piel y provoca la transferencia de residuos, que se adhieren y retienen en la parafina una vez solidificada.

Actualmente existen diferentes técnicas, como el uso de cintas adhesivas que suelen tener un tamaño de 1,5 cm de ancho y de 6 a 10 cm de largo. Los denominados «*kits de residuos de disparo*», formados por pequeños cilindros de plástico rígido o también unos dispositivos en forma de cono truncado, fabricados en aluminio y cubiertos en uno de los lados por una sustancia pegajosa y conductora de la corriente eléctrica y que presentan la ventaja de poder ser colocados directamente en el equipo SEM-EDX sin ningún tratamiento previo.

Cuando se trata de detectar restos presentes en el ánima del cañón de un arma, la recogida se realiza utilizando un hisopo de algodón que se introduce con ayuda de una varilla y se someten a observación en el microscopio y posterior análisis.

Análisis de restos de disparos

Cuando al laboratorio llegan prendas de ropa procedentes de la escena de un suceso, el primer paso será el examen al microscopio de las características físicas de los residuos que pudieran estar presentes, ya que los análisis químicos posteriores modificarán los restos existentes.

Para el análisis de estos restos se utilizan una serie de «test químicos», así como distintas técnicas de instrumentación analítica que permiten la detección y a veces la cuantificación de sustancias relacionadas con un disparo, principalmente nitratos, nitritos, y restos de metales, en concreto plomo, antimonio y bario procedentes del fulminante. Entre los test químicos, hay que destacar la:

Determinación de nitratos. Se utiliza para ello una disolución de difenilamina en ácido sulfúrico. La presencia de restos de nitratos se pone de manifiesto mediante la formación de un color azul. Se trata de una prueba que además de requerir grandes cantidades de muestra es poco sensible y específica, ya que existen en el medio ambiente gran cantidad de sustancias que contienen nitratos, por lo que dejó de utilizarse para este fin.

Determinación de nitritos. Se evidencian mediante reacción con el «reactivo de Griess» (ver en tema 3), formado por un componente **A:** (diclorhidrato de *N*-(1-naftil) etilendiamina), y otro **B:** (ácido sulfanílico en ácido fósfórico al 5%) y se detectan cuantitativamente midiendo la absorbancia en un espectrofotómetro a 548 nm. Según se observa en la figura 6.9, el ácido sulfanílico por reacción con nitritos en medio ácido da lugar cuantitativamente a una sal de diazonio, la cual posteriormente y por reacción con *N*-(1-naftil) etilendiamina forma un azocompuesto de color rojo.

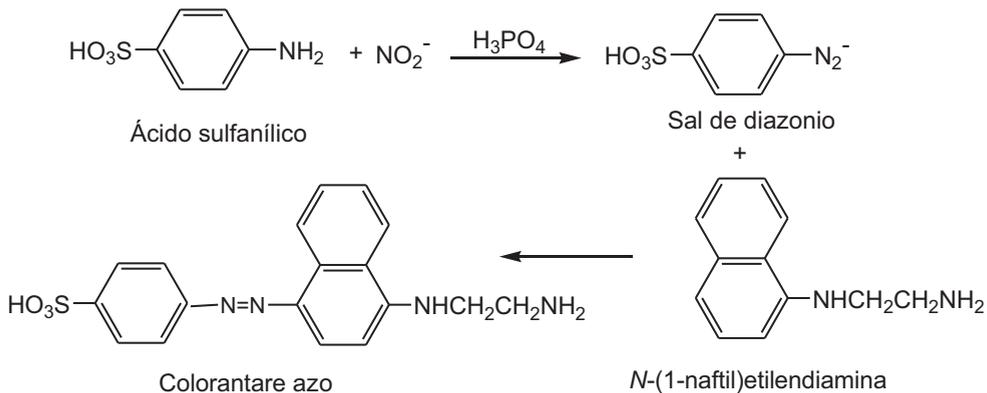


FIGURA 6.9. Reacción de Griess

Se trata de una reacción más específica que la anterior, ya que los nitritos no son comunes en nuestro medio. Si suelen estar, por el contrario, presentes en materia orgánica en putrefacción y por ello esta prueba no debe realizarse sobre cadáveres en estado de descomposición.

Determinación de plomo y bario. La presencia de ambos se detecta mediante el uso de una disolución acuosa diluida de rodizonato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_6\text{O}_6$). Si la prueba resulta positiva, se observa para el plomo, un punto

oscuro con un halo de color rojo escarlata, en medio ligeramente ácido, o azul-violeta, en medio alcalino o neutro. Un color rosa-marrón indica presencia de bario.



En la detección de plomo se utiliza también la reacción de *Holfmann-Leszczynski*. En ella el reactivo es el sulfuro de sodio (Na_2S) que en presencia de plomo forma un precipitado marrón-negro de sulfuro de plomo (PbS).

En 1964 comenzó a emplearse el *análisis por activación de neutrones* (AAN) para la detección de antimonio y bario en los residuos de disparo. Esta técnica aunque sigue vigente presenta desventajas, como son el requerir equipamiento caro (reactor nuclear), personal especializado y además presentar bajo nivel de detección para el plomo.

En el análisis por AAN la muestra situada en un reactor nuclear, es bombardeada con neutrones, de forma que los isótopos estables de antimonio, bario y plomo se convierten en isótopos radiactivos. A continuación, la radiación inducida que se mide en un espectrofotómetro de rayos γ , identifica el isótopo radiactivo presente en la muestra.

Existen diferentes técnicas, unas con más éxito que otras, como la *espectrometría de absorción atómica* (AA), muy usada en laboratorios forenses y que sustituyó con bastante éxito a la de activación neutrónica al permitir la detección de plomo a niveles muy bajos, la *resonancia de spin electrónico* (RES) o la *espectrometría de rayos X*. Estas técnicas, basadas en el análisis cuantitativo de metales, presentan la desventaja de falta de especificidad al no diferenciar la fuente de procedencia de los metales, no siendo, por tanto, los resultados obtenidos una prueba concluyente de presencia de restos de disparo.

Actualmente es muy importante la técnica **SEM/EDX** que ha permitido determinar la morfología así como identificar y cuantificar un grupo de pequeñas partículas, de tamaños entre 5 y 10 micras, presentes en el fulminante y denominadas «específicas» que solo aparecen en los residuos de disparo.

La similitud de los espectros obtenidos por *espectroscopia Raman*, para distintos tipos de pólvora presentes en la munición sin disparar y en los correspondientes residuos de disparo, permite establecer una relación entre



ambos¹. Se trata pues, de una potente técnica analítica, complementaria a la técnica SEM/EDX, en el análisis forense de restos de disparo. La espectroscopia Raman como técnica de análisis en ciencias forenses en general y, en particular, en el análisis de residuos de disparo es un procedimiento no destructivo y fácilmente acoplable a un microscopio, por lo que permite detectar y trabajar con muestras muy pequeñas.

En la detección de restos orgánicos se utilizan, con buenos resultados, las técnicas de, cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

6.7.4. Importancia de la determinación de restos de disparo

El hallazgo y caracterización de restos de disparo permitirá, en el curso de una investigación:

1. Relacionar a un posible sospechoso con el hecho acaecido, teniendo en cuenta una serie de consideraciones. Así, que la presencia de residuos permite asociar a un individuo con un arma de fuego, pero no permite identificar a dicha persona como autora del disparo. Esto es debido a que los residuos pueden depositarse en cualquier persona próxima al arma en el momento del disparo aunque sea efectuado por un tercero o también aparecer en las manos de una persona que no haya disparado pero si manipulado el arma disparada o los cartuchos. También que la no detección de residuos en la persona examinada no significa que no haya disparado el arma, ya que a veces no se depositan en suficiente cantidad o han podido ser eliminados mediante lavado.
2. Dilucidar si el arma encontrada ha sido disparada o no, así como el tiempo transcurrido desde el disparo.

El análisis de los componentes (restos de lubricante, óxido de hierro, etc.) depositados en el ánima de un arma que ha sido disparada permite obtener datos de interés forense. Estos residuos no permanecen inalterables y son los cambios observados en ellos los que permiten

¹ López-Lopez, M. *et al.* «Ammunition identification by means of the organic analysis of gunshot residues using Raman spectroscopy». *Anal. Chem.* 2012, 84, 3581-3585.

establecer, de forma aproximada, el tiempo transcurrido desde que se produjo el disparo.

3. Determinar la distancia entre la boca del cañón del arma y el blanco, lo que permitirá en ocasiones distinguir, por ejemplo, si la causa del disparo ha sido defensa propia, suicidio o muerte violenta. Los casos de suicidio casi siempre presentan restos dentro o alrededor del orificio de entrada del proyectil, así como heridas características de disparos a corta distancia, difícilmente superiores a 70 cm.

Cuando se dispone del arma y de la munición implicada la forma más precisa de establecer la distancia consiste en realizar disparos variando la posición, sobre un blanco, un trozo de ropa blanca similar a la de la víctima y comparar posteriormente la densidad y distribución de los residuos de disparo en ambas prendas, la perteneciente a la víctima y la utilizada como blanco. En caso de no existir arma sospechosa, el experto, utilizando su experiencia, sólo podrá determinar de forma aproximada un rango de distancias basándose en las características que presenta el orificio de entrada de la bala. El grado de exactitud requerido en un caso relacionado con disparos por arma de fuego, variará con las circunstancias del mismo.

6.7.5. Bases de datos como ayuda en la investigación forense

Lo mismo que ocurre, por ejemplo, con las pinturas o con las huellas dactilares (temas 3 y 7), la policía y agencias de investigación de todos los países disponen de bases de datos digitalizadas correspondientes a armas y municiones, de esta forma, los ordenadores conectados al microscopio posibilitan el realizar búsquedas de concordancia con el consiguiente ahorro de tiempo y, además, establecer conexiones con otros sucesos acaecidos en tiempo o en países diferentes.

6.8. INVESTIGADORES FORENSES EN LOS TRIBUNALES DE JUSTICIA

El trabajo de un investigador forense del área de “identificación de armas de fuego” consistirá en estudiar detenidamente las fotografías procedentes de la escena del crimen, analizar todas las pruebas recogidas en



ella y emitir un informe con el fin de poder esclarecer un suceso acaecido, así como prestar ayuda en los tribunales cuando le sea requerido. Deberá, en el grado que sea posible, establecer hechos como:

- La muerte es el resultado ¿de un homicidio, suicidio o accidente fortuito?
- Si se encontrara un arma ¿sería esta la causante de los disparos realizados?
- En caso de que el culpable alegue, como ocurre en ocasiones, la no intencionalidad del disparo, ¿podría demostrarse si el arma ha sido o no disparada de forma accidental?
- ¿Se pretende disfrazar una muerte intencionada bajo la apariencia de suicidio?
- ¿Se ha producido la muerte como consecuencia de la desviación o alteración de la trayectoria del proyectil, debida al choque con un obstáculo o a un rebote?

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

- Entre las armas de fuego convencionales, es decir aquéllas fabricadas por industrias reconocidas, se encuentran la pistola, el revólver y la escopeta, armas implicadas con frecuencia en hechos delictivos. Indique, utilizando otras fuentes bibliográficas, las diferencias más sobresalientes que existen entre ellas.

NOTA: Con esta actividad se pretende conocer algo más acerca de la clasificación de las armas de fuego (que no se ha recogido en el texto), atendiendo a parámetros como manipulación, carga (sencilla, múltiple), alimentación, forma de empleo, sistema de mecanismo (simple y doble acción) o secuencia de disparo.

- Personal especializado acude a un domicilio donde se han registrado disparos. Allí encuentran una víctima y en las proximidades la vaina correspondiente a un cartucho de bala. Sólo con estos datos, ¿cree que sería correcto afirmar que el arma utilizada en el crimen no ha sido una escopeta? **¿Por qué?**
- Una muerte por arma de fuego puede ser clasificada como homicidio, accidente o suicidio. El trabajo de los expertos en la escena del crimen y también en el laboratorio estará dirigido, en algunos casos, a intentar esclarecer la forma en que ocurrió el suceso. A continuación y en función de lo que se observa, analiza o deduce se van haciendo una serie de cuestiones (líneas de puntos) acerca de la escena en la que se encuentra un cadáver que presenta dos orificios de bala, uno de entrada y otro de salida. Complete dichas líneas.

Si el personal especializado al revisar la escena del suceso no encuentra ningún arma, significaría con bastante probabilidad, que se trata de una muerte por Si existe un arma y en el ánima del cañón se encuentran restos de metal procedentes del estriado, ese arma sería la responsable del disparo **¿por qué?** La presencia de restos de ADN de la víctima en el arma sería indicativa de muerte probable por ¿Sería importante determinar si el orificio de entrada se encuentra en el pecho o en la espalda? **¿por qué?** Se observa que uno de los orificios que presenta el cadáver tiene la forma del cañón del arma, lo que podría significar que

- La coincidencia observada en las marcas que presenta la bala recogida en la escena de un crimen y la bala utilizada en el test de fuego de comparación permiten concluir que ambas balas han sido disparadas por el mismo arma. Sin embargo también es posible encontrar diferencias entre las marcas de dos balas disparadas por la misma arma. Indique algunos motivos que expliquen este hecho.

Resolución

1. El *revólver* es un arma de tipo corto (largo de cañón inferior a 30 cm) de uso policial y civil. Es semiautomática, de carga sencilla (balas). De alimentación por tambor, posee un cilindro giratorio que alberga la munición entre 4 y 8 balas. Diseñada para utilizarse con una sola mano (de puño). En esta arma el martillo deba montarse previo al disparo (arma de simple acción).

La *pistola*, arma de tipo corto, de uso militar, policial y civil. Puede ser semiautomática o automática, de carga sencilla. Llevan un cargador en la empuñadura que puede contener hasta 30 balas. Diseñada también para utilizarse con una sola mano, es más rápida en cargar y disparar que el revólver. En ella el martillo se arma y libera en el disparo (arma de doble acción).

La *escopeta*, arma de tipo largo (longitud de cañón superior a 30 cm), de uso militar, policial y civil. Semiautomática de simple y doble acción, de carga y descarga manual (tiro a tiro). El ánima del cañón es completamente lisa y en su utilización se requiere usar ambas manos y el habitualmente el hombro. De carga múltiple (munición de perdigón).

A continuación se ofrece una definición acerca de lo que se entiende por arma semi o automática. Así,

Armas semiautomáticas son armas que utilizan los gases que se producen en el disparo para impulsar el proyectil y, para sacar la vaina de la recámara e introducir una nueva bala. Se produce una retroalimentación inmediata aunque se necesita accionar el disparador en cada disparo. *Armas automáticas*, funcionan con mayor rapidez que las anteriores aunque con el mismo sistema de retroalimentación. Manteniendo el disparador apretado pueden efectuar disparos en ráfagas. Poseen un selector de disparo que permite disparar en semi o en automático.

2. Las escopetas son armas de ánima lisa que disparan cartuchos de perdigones o postas. En principio, y al encontrar la vaina perteneciente a un cartucho de bala, podría descartarse la escopeta como arma responsable de los disparos. Sin embargo, hay que tener presente que los hechos no siempre son obvios. En este sentido, y con distintos objetivos las armas pueden ser modificadas y las escopetas adaptadas a disparar cartuchos de bala. Por eso, es importante analizar y de forma cuidadosa todos los indicios de que se dispone antes de emitir un juicio.

3. Homicidio

No. Los restos de metal procedentes del estriado y encontrados en el ánima del cañón, indicarían que el arma no se ha usado después de realizado el proceso de estriado y por tanto no se trataría del arma responsable.

Posible suicidio o accidente.

► Sí, porque permitiría diferenciar entre homicidio y suicidio o accidente.

El cañón del arma ha presionado la piel en ese punto, originando una quemadura con la forma de la boca del cañón y la posibilidad de muerte por accidente sería baja.

4. Existen motivos, como:

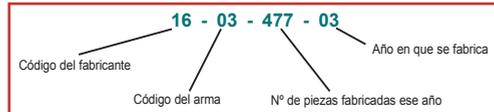
- El arma expuesta a la intemperie está oxidada cuando se recupera y los productos de la corrosión pueden alterar las estrías.
- El cañón ha sido dañado con el objetivo de inducir a error a los forenses que investigan el caso
- En el tiempo transcurrido entre el disparo de la bala recogida y el hallazgo del arma se puede haber sustituido el cañón por otro diferente.

LECTURA

«Números de serie: su importancia y recuperación»

Diferentes artículos, como teléfonos móviles, vehículos y armas de fuego, llevan impresos unos números de serie que se les adjudican durante el proceso de manufactura, bien mediante troqueles cuando se graban sobre metales, o por calor cuando las superficies son de plástico. Se trata de un código alfanumérico único que les identifica y que a veces brinda una información adicional, como ocurre en el arma de la figura abajo representada.

Este número en las armas de fuego suele estar grabado en una parte metálica de las mismas y debe registrarse cada vez que se realiza una transacción, por lo que se podría decir que proporciona o cuenta la historia del arma. Cuando un arma es robada y posteriormente recuperada esos números de serie suelen haber sido borrados, o al menos se ha intentado mediante el uso de limas, taladros o ácidos, con el fin de evitar o dificultar su identificación.



La superficie bajo los números durante el proceso de estampación sufre cambios y se hace más reactiva. De esta forma, y mediante la aplicación de reactivos adecuados se pueden recuperar los números. Entre ellos se encuentran los reactivos de Fry, Turner o David (mezclas de HCl y CuCl₂, CH₃CH₂OH y H₂O en diferentes proporciones) en superficies de hierro y acero, el de Vinela para aleaciones de aluminio (solución de glicerol, HF y HNO₃), el reactivo de Hume-Rothery (HCl, CuCl₂ y H₂O) en el caso de que en las aleaciones de aluminio haya silicón, y el ácido nítrico (solución de HNO₃ al 25%) para aluminio o el latón.

En el caso de superficies de hierro es aconsejable utilizar la restauración magnética, técnica no destructiva, antes de proceder con los reactivos químicos. Finalmente, y en el caso de plásticos, se utilizan lámparas de color para su revelado.

ESTUDIO FORENSE DE HUELLAS DACTILARES



Rastro de inestimable valor en la escena de un suceso

María del Pilar Cornago Ramírez

OBJETIVOS

General

Dado que el hallazgo de huellas dactilares es uno de los ítems de evidencia más importantes en la escena del crimen a la hora de esclarecer un delito, el objetivo de este tema es ofrecer una visión general de los aspectos más sobresalientes relacionados con este tipo de rastro en particular.

Específicos

1. Destacar los hitos históricos que han conducido al establecimiento de la dactiloscopia como ciencia dedicada al estudio de las huellas dactilares.
2. Diferenciar los conceptos de huella latente, huella dactilar e impresión dactilar.
3. Clasificar los distintos tipos de huellas dactilares.
4. Indicar qué es una fórmula dactiloscópica, como se determina y cuál es su utilidad.
5. Enumerar los principales métodos utilizados en el revelado de huellas.
6. Reconocer los agentes de revelado más comunes que permiten hacer visible una huella latente.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para el estudio del presente tema será conveniente tener presentes ciertos contenidos de bioquímica, tales como lípidos, aminoácidos o proteínas. Dentro de la química orgánica, es importante revisar la formulación así como los distintos grupos funcionales y tipos de reacción.

Tema 7. Estudio forense de huellas dactilares

- 7.1. Introducción
 - 7.2. Perspectiva histórica
 - 7.3. Piel de fricción. Morfología de las crestas papilares
 - 7.4. Lofoscopia y Dactiloscopia
 - 7.5. Tipos de huellas dactilares
 - 7.6. Búsqueda de huellas dactilares latentes
 - 7.7. Técnicas de revelado de huellas dactilares latentes
 - 7.8. Otras huellas como elementos de identificación
 - 7.9. Importancia de esta técnica
- Ejercicios y soluciones
- Lectura. «Huellas dactilares; sus comienzos en los tribunales de justicia»

7.1. INTRODUCCIÓN

Todo lo que hacemos deja una marca; mientras caminamos, trabajamos, conducimos o permanecemos sentados, nuestros zapatos, manos, herramientas o ropa dejan rastros reveladores al análisis de ojos expertos. Aunque todo tipo de huellas encontradas en la escena de un crimen son importantes para su resolución, en este capítulo nos centraremos en los aspectos relacionados directamente con las huellas dactilares.

La huella dactilar y el ADN (ver tema 8) son características propias de cada individuo y su desarrollo está determinado por procesos aleatorios, por eso, ni siquiera los gemelos monocigóticos presentan la misma huella. De esta forma, las huellas se utilizan, no sólo para identificar con seguridad a la víctima o al delincuente, sino también para probar o descartar la presencia de un sospechoso en el lugar del suceso de forma fiable y rápida.

Para que su aplicación como técnica de identificación sea operativa, es necesario comparar la huella encontrada y de identidad desconocida con las impresiones obtenidas a partir de una fuente de identidad conocida. El

reconocimiento de huella dactilar es, por tanto, el método de identificación biométrica por excelencia. La existencia de un gran volumen de datos en el *Sistema Automático de Identificación Dactilar* (SAID) y el intercambio de datos entre países ha hecho de la dactiloscopia una línea de investigación en continuo desarrollo a lo largo de los años.

7.2. PERSPECTIVA HISTÓRICA

Podemos hablar de tres periodos perfectamente diferenciables, Prehistórico, Empírico y Científico, a través de los cuáles se ilustra la progresión histórica del desarrollo de las huellas dactilares, desde su expresión como un mero sentimiento de fascinación en sus orígenes hasta su utilización hoy día como método de identificación

Período Prehistórico

La característica más sobresaliente de este período es sin duda la carencia total de documentación que permita conocer el uso o el significado de las marcas papilares, tanto digitales, como palmares o plantares encontradas en diferentes superficies. Se piensa en una posible simbología ornamental y/o ritual. Pertenecientes a esta época, son las impresiones encontradas en las pinturas rupestres de cuevas como las de Altamira en Santillana del Mar, España, (figura 7.1), descubiertas en el siglo XIX, o las de Aurignac en Francia, pertenecientes ambas al Paleolítico Superior (35.000-10.000 a.C.), siendo unas de las más famosas las encontradas en la isla de Gavrinis en las costas de Bretaña, restos del Neolítico (3.500 a. C).



FIGURA 7.1. Impresiones palmares halladas en la cueva de Altamira y réplica de losas decoradas de Gravinis (museo de los túmulos de Bougon).

Período Empírico

Es un período que se caracteriza por la utilización de las impresiones dactilares en documentos como forma de autoría o marca personal desconociendo aún su individualidad.

Ya en la antigua Babilonia, las huellas digitales fueron utilizadas en las tablas de arcilla como modo de sellar contratos y transacciones económicas. Una de estas tablillas, un documento del siglo III a. C., actualmente en el museo de Historia Natural Británico, lleva un sello con la impresión de un dedo pulgar. Por otra parte, los artistas griegos y romanos también dejaban su huella en materiales de construcción a modo de autoría. También en Asia, en el Japón de hace mil doscientos años se obligaba a los prisioneros a estampar el dedo pulgar sobre un registro carcelario y en la antigua China, según el libro de leyes de Yung-Hwui (650-655 d. C.), si un marido solicitaba el divorcio, fuera o no analfabeto, la ley indicaba que había de estampar la huella de su pulgar derecho en los documentos que redactaba.

Período Científico

Durante este periodo, caracterizado por el uso del método científico en la obtención de conocimientos, fue surgiendo de forma lenta y continua la dactiloscopia como ciencia. A continuación destacaremos ciertos hechos relevantes junto con los personajes que los protagonizaron. Entre ellos,

Marcello Malpighi (1628-94), anatomista y biólogo italiano, que en 1662 describe en su obra *«Epístolas anatómicas»*, el patrón de surcos en las yemas de los dedos. En reconocimiento a sus contribuciones, la capa de la piel localizada en la parte inferior de la epidermis se denominó «capa de Malpighi».

Nehemiah Grew (1641-1712), médico británico, publica en 1684 dibujos muy precisos de las huellas dactilares. Se le considera uno de los pioneros en estudiar y describir las crestas, surcos y poros.

Johannes Evangelista Purkinje (1787-1869), anatomista, fisiólogo y botánico checo, describe, en 1823, en su obra *«De Examine Physiologico Organi Visus et Sistematice Cutanei»* los tipos de huellas dactilares y los clasifica en nueve grupos principales para que puedan ser utilizados en la identificación personal.

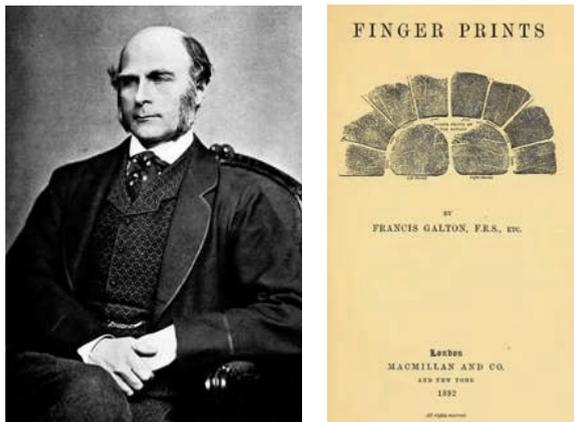


FIGURA 7.2. Sir Francis Galton y su texto de «*Fingerprints*», editado en 1892.

En 1858, **Sir William James Herschel** (1833-1917), oficial del Gobierno Británico en la India reconoce que las huellas dactilares son únicas y permanentes y utiliza las impresiones dactilares de los nativos como medio de identificación personal para el registro de defunciones en las prisiones de esa ciudad. Estableció la inmutabilidad de las huellas, tomando y observando sus propias huellas a lo largo del tiempo.

Sir Francis Galton (1822-1911), antropólogo británico (ver tema 1), publica en 1892 su libro «*Fingerprints*» (figura 7.2) y realiza un estudio matemático que le permite afirmar que las huellas dactilares no son heredadas y que no existen dos huellas dactilares iguales. Definió algunos de los puntos o características que presentan las crestas papilares a las que denominó *minutiae*, lo que constituyó un paso más en la identificación por huella dactilar.

En 1904, **Juan Vucetich** (1858-1925), policía de Buenos Aires, escribe su obra «*Dactiloscopia comparada*» y basándose en los estudios de Galton adopta las impresiones dactilares como medio de identificación, clasificándolas en cuatro grupos: Arcos, Presillas internas, Presillas externas y Verticilos. En 1905 su sistema dactiloscópico fue incorporado por la policía Federal de Argentina, país que se convirtió así en el primero en utilizar, de forma oficial, las impresiones digitales como sistema de identificar delincuentes.

Posteriormente (figura 7.3), **Federico Olóriz Aguilera** (1855-1912), catedrático de anatomía patológica nacido en Granada crea, a partir de los sistemas de Galton y Vucetich, su propio sistema de clasificación. Sustituye el nombre dado por Vucetich a los cuatro tipos de dactilogramas por: Adelto, Monodelto (Dextrodelto y Sinistrodelto) y Bidelto (sección 7.4.2) e introduce en 1909 el sistema de identificación dactiloscópico español o sistema Vucetich-Oloriz, utilizado hasta 1982.

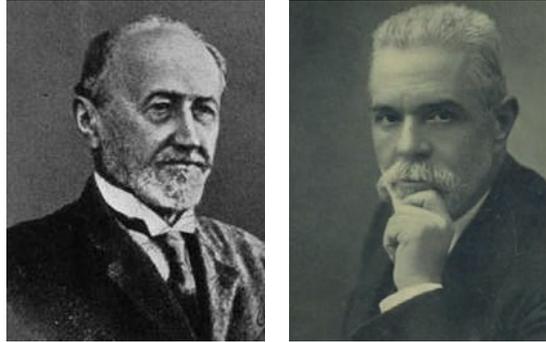


FIGURA 7.3.
Juan Vucetich
y Federico Olóriz.

La superioridad del método de identificación de las huellas dactilares frente al de las «medidas vitales o antropométricas» de Bertillon, quedó claramente confirmado en el caso del preso William West, ingresado en la prisión de Kansas. Los archivos de la cárcel indicaban la existencia de otro recluso con el mismo nombre y medidas antropométricas similares y la única manera fiable de distinguirlos fue a partir de sus huellas dactilares.

Surge así la necesidad de dotar a toda la población de documentos que prueben su identidad no solo como una obligación sino también como un derecho. Así, en 1911 comenzó a funcionar en Madrid, en la Jefatura Superior de Policía, un servicio de Identificación, extendiéndose progresivamente a las otras provincias. La cédula personal como documento identificativo se crea a principios del siglo XX y se suprime por ley en enero de 1943. En 1944 se crea por decreto de 2 de marzo el Documento Nacional de Identidad, documento personal y obligatorio para todos los españoles mayores de 14 años y que contenía, entre otros datos, el dactilograma en doble impresión del dedo índice derecho. A partir de 2005, por Real Decreto de 23 de diciembre, el DNI se sustituye por el «DNI electrónico» que contiene las impresiones dactilares de los dedos índices de ambas manos.

A finales de los años 60 del siglo XX y coincidiendo con el desarrollo de la tecnología de los ordenadores, comienza el proceso de automatización en la identificación por huella dactilar. Con el fin de agilizar las labores de cotejo, tanto de impresiones dactilares como de huellas latentes reveladas, la Policía Científica Española en 1982 introdujo el denominado SAID o AFIS (siglas inglesas de *Automated Fingerprint Identification System*) un sistema matemático e informatizado que automatiza la introducción de imágenes (huellas). Esta base de datos recoge las huellas decadaactilares de

aquellas personas que han tenido alguna relación con un hecho delictivo permitiendo un ahorro de tiempo considerable en la localización, comparación e identificación entre los datos existentes y los del dactilograma a identificar. En la actualidad existe un sistema internacional de AFIS.

7.3. PIEL DE FRICCIÓN. MORFOLOGÍA DE LAS CRESTAS PAPILARES

La piel es la envoltura de nuestro cuerpo que nos protege de las agresiones externas y nos permite, al mismo tiempo, relacionarnos con el mundo que nos rodea. En ella, la superficie correspondiente a la parte volar de los dedos y a la palma y planta de las manos y pies, se denomina *piel de fricción*. Se forma entre el segundo y tercer mes del embarazo y contiene muchos de los elementos y características utilizadas en la identificación de huellas. Su misión es proporcionar resistencia al agarre de objetos y está formada por una serie de capas (figura 7.4).

Presenta unas rugosidades, unos relieves epidérmicos (protuberancias y depresiones) formadas por:

Crestas papilares: bordes sobresalientes de la piel formados por una sucesión de papilas y que forman una infinidad de figuras en las yemas de los dedos.

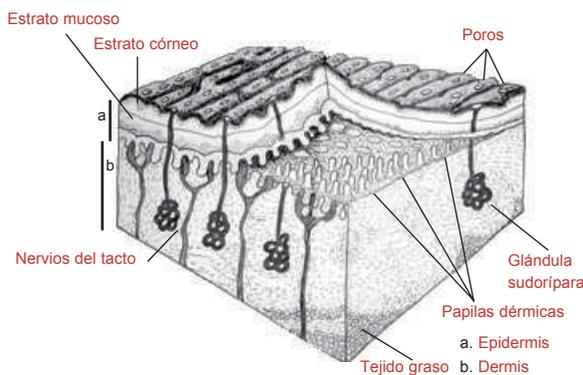


FIGURA 7.4. Sección de la estructura de la piel de fricción.

Papilas: pequeñas protuberancias con formas muy variadas que nacen en la dermis y sobresalen completamente en la epidermis.

Surcos o surcos interpapilares: nombre que reciben los espacios hundidos que se encuentran entre papila y papila. Son los espacios en blanco que se observan al imprimir sobre una superficie la huella procedente de un dedo entintado.

Poros: pequeños orificios, con diferentes formas (triangulares, circulares, elípticos...), situados en la cúspide de las crestas papilares y cuya función es segregarse el sudor. El tamaño de los poros no es uniforme y, por lo regular, suele ser más grande en el hombre que en la mujer.

En un proceso de identificación, las crestas papilares alternándose con los surcos, forman una gran variedad de dibujos, visibles en los dedos y la palma de manos y pies (figura 7.5).



FIGURA 7.5. Crestas y surcos interpapilares.

Las diferencias en estos dibujos, se deben al diseño pero también a la altura y anchura de las crestas que serán diferentes en cada individuo y a su vez según sea su edad, sexo, envergadura corporal, tamaño de la mano y etnia, variando incluso con el dedo del que proceda. Se han desarrollado procedimientos que permiten determinar, por ejemplo, si una huella encontrada pertenece a un hombre o una mujer.

7.3.1. Características de las crestas papilares

Las crestas papilares presentan una serie de características, a saber:

- Son comunes a la raza humana.
- Acompañan al individuo durante toda su vida. Empiezan a formarse en la undécima semana de vida intrauterina y quedan definitivamente configuradas hacia el sexto mes. Crecen con él y desaparecen después de su muerte con el proceso de putrefacción. **Son perennes.**

Cuando un cadáver se embalsama, las crestas papilares pueden persistir miles de años, como en el caso de la momia de *Tutankamon*, que conserva intactos los dibujos papilares después de 34 siglos.

- No sufren modificaciones en su dibujo, salvo por causa de anomalías congénitas (deformaciones que nacen con el individuo) o adquiridas (cicatrices o amputaciones). Incluso en caso de lesiones, quemaduras y desgastes profesionales o intencionales, se regeneran completamente, siempre que no haya sido destruida profundamente la dermis. **Son inmutables.**
- Son características de cada individuo en particular. **Son diversiformes o invariables.**

Entre las malformaciones, se encuentran entre otras: la *polidactilia*, mayor número de dedos de lo normal; la *sindactilia*, uno o más dedos unidos por una membrana; la *macroductilia*, desarrollo exagerado de los dedos; la *microductilia*, dedos con menos desarrollo que los normales o la *ectrodactilia*, número de dedos inferior al normal.

7.4. LOFOSCOPIA Y DACTILOSCOPIA

Nuestra piel se desescama continuamente y esto junto con el propio sudor y la grasa natural que contiene, propicia que al tocar una superficie

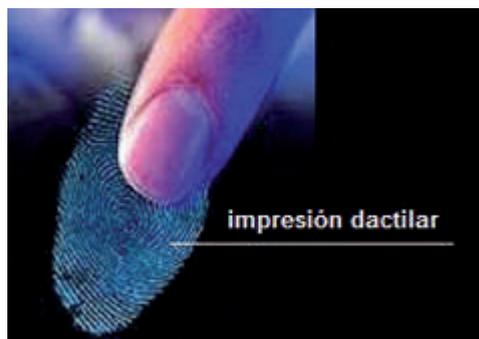


FIGURA 7.6. Impresión dactilar procedente del dedo índice de la mano.

o manipular un objeto, aptos para ello, dejemos una marca, un rastro. Este rastro o **huella latente**, convenientemente revelado, es decir, la marca visible del mismo, es a lo que se denomina **huella dactilar** cuando la marca es de origen desconocido o **impresión dactilar** si la marca está recogida en una base de datos y ha sido tomada, de forma voluntaria, por personal con materiales idóneos en la jefatura de policía o en el registro civil (figura 7.6).

Con el nombre de **lofograma** se denomina, de forma general, al dibujo que conforman las crestas y surcos papilares, siendo **lofoscopia** (del griego *lofos* = cresta y *skopia* = estudio) el término más general que describe la disciplina que se encarga de su estudio.

Existen otros términos específicos en referencia al estudio de las crestas papilares en zonas concretas, como: **quiroscofia**, **palametoscopia** o **palmetoscopia** para las palmas de las manos, o **pelmatoscopia** para las plantas de los pies.

De esta forma, **dactiloscopia** (del griego *daktylo* = dígito y *skopia* = estudio) se está utilizando, cada vez más, como expresión genérica de la materia de estudio sin tener en cuenta el área de procedencia de los dibujos. Sin embargo, tendría que hacer referencia, concretamente a la ciencia que estudia las impresiones digitales de las personas con fines identificativos. El **dactilograma** es así el conjunto de crestas y surcos que forman la impresión digital. Es posible distinguir entre:

Dactilogramas naturales: son los que existen en las yemas de los dedos de forma natural. Se nace con ellos y se pueden observar en las falanges de los dedos.

Dactilogramas artificiales: son los dibujos impresos que resultan de estampar, mediante entintado y sobre una superficie idónea, los dibujos naturales, y en los últimos años son el resultado de escanear la mano para añadir las impresiones digitales a la base de datos.

Dactilogramas latentes: son las huellas que deja cualquier dactilograma natural al tocar una superficie o un objeto resultado de una mezcla de sudor y materia sebácea secretadas en la transpiración cutánea, así como también de sustancias transportadas de otras partes del cuerpo y del medio que nos rodea. Son huellas generalmente invisibles sin la aplicación de un reactivo adecuado que las revele.

7.4.1. Topografía de los dactilogramas

Analizando la topografía de un dactilograma, es decir, el conjunto de líneas y espacios presentes en el, es posible diferenciar en casi todos los casos tres zonas denominadas **marginal**, **nuclear** y **basilar**. En la conjunción

de estos tres sistemas de líneas se forma una figura más o menos triangular, que se conoce como «delta». En la figura 7.7 se observan estas tres zonas:

- **Zona A** = zona marginal. Conjunto de crestas papilares de la parte alta del dactilograma.
- **Zona B** = Zona nuclear. Conjunto de crestas, de curvatura y aislamiento aceptable, ubicadas por lo general en la región central del mismo y circunscrito por los trazos limitantes de las otras dos zonas.
- **Zona C** = Zona Basilar. Conjunto de crestas de la base del dedo.

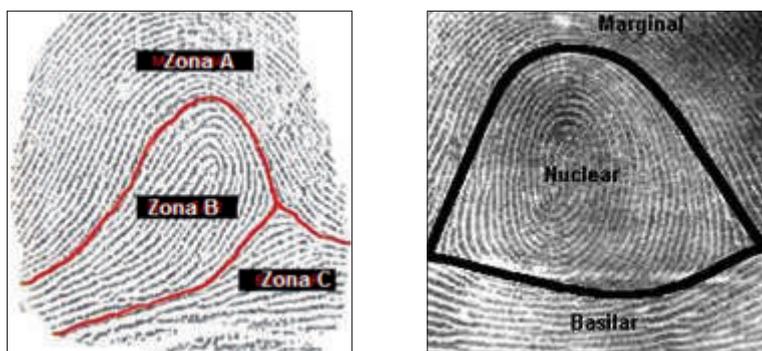


FIGURA 7.7. Zonas diferenciadas en un dactilograma.

Se denomina *línea directriz* a la línea que partiendo del delta circunscribe la zona nuclear. En esta figura, sería la línea roja que envuelve la zona B.

7.4.2. Tipos de dactilogramas y simbología

El sistema dactiloscópico español de clasificación utiliza como referencia el distinto grado de curvatura de las crestas papilares (en arco, en semi-círculo o en círculo). Está basado en la figura delta, esa forma triangular que se encuentra en todas las huellas dactilares, excepto las de tipo Arco (Adeltos). Admite cuatro tipos de patrones básicos de dactilogramas (figura 7.8), en función de la ausencia o existencia de deltas efectivos y, en tal caso, del número y situación de los mismos:



FIGURA 7.8. De izquierda a derecha, dactilogramas: Adulto, Dextrodelto, Sinistrodelto y Verticilar, donde se indica la representación de la figura «Delta».

Adultos: Las crestas papilares se acumulan unas sobre otras, de forma más o menos paralela formando una figura similar a un arco. Carece de deltas, línea directriz y núcleo. Es la forma menos común de los tres tipos de patrones (5-15%). Se simbolizan con la letra **A** para los pulgares y el número **1** para los otros dedos

Dextrodeltos: También recogidos en algunos textos con la denominación de *Presilla externa* y simbolizados por una E. Presentan un solo delta a la derecha del observador. Las crestas se pliegan sobre si mismas formando un bucle que se denomina presilla, donde las colas de las crestas se dirigen al lado izquierdo del dactilograma. Se simboliza con la letra **D** para los dedos pulgares de ambas manos y con el número **2** para los otros dedos.

Sinistrodeltos: Recogidos en algunos textos con la denominación de *Presilla interna* y simbolizados por una I, presentan también un solo delta que al contrario que en el anterior, se encuentra en el lado izquierdo del observador. Se simboliza con la letra **S** para el dedo pulgar y el número **3** para los otros dedos.

Ambos dactilogramas, los sinistrodeltos y dextrodeltos, se denominan monodeltos al tener un solo delta. En conjunto representan el 60-65 % de los dactilogramas.

Bidelto o Verticilares: Presentan dos o más deltas que se forma cuando la cresta se revuelve alrededor de un punto. Es el tipo de huella más común (30-35%) junto con el Dextrodelto y se simboliza, de forma semejante en ambas manos, con la letra **V** (de verticilo en lugar de B para mantener el orden alfabético) para el dedo pulgar, y el número **4** para los otros dedos.

Cuando el dactilograma presenta lesiones o cicatrices de carácter permanente que no permiten su lectura y clasificación, en lugar de la fórmula correspondiente a ese dedo se utiliza la letra mayúscula **X**. Asimismo, cuando nos encontramos con alguna amputación o ausencia del dedo, se indicará con un cero (**0**).

7.4.3. Proceso de identificación

La identificación dactiloscópica consiste en comparar la información entre una huella dactilar desconocida y las impresiones conocidas y clasificadas existentes en las bases de datos. Esta comparación se realiza a tres niveles.

Nivel 1. Flujo de las crestas

En los dedos el flujo de las crestas da lugar a los cuatro tipos de patrones básicos descritos anteriormente. Con este nivel de información es posible, aunque con precaución, realizar una exclusión de identidad pero nunca identificar a un individuo (sección 7.4.4).

Nivel 2. Puntos característicos de las crestas o *minutiae*

Este segundo nivel de información constituye la base más importante de la identificación. Se basa en la enorme variabilidad existente al observar las crestas papilares, ya que no son continuas, pudiendo presentar interrupciones en su curso y variaciones en la longitud. Las particularidades que ofrecen las crestas papilares en su flujo por el dactilograma natural y su impresión son los **puntos característicos** o también las *minucias* o *minutiae* (figura 7.9).

En el proceso de comparación deben tenerse en cuenta tanto el tipo de minucia, como el ángulo, la orientación y la disposición espacial.

Nivel 3. Morfología de las crestas

Este tercer nivel de información lo aportan la morfología de las crestas, la ubicación de los poros y también características accidentales, como pliegues o lesiones que puedan presentar. Debido al pequeño tamaño de los poros, su aparición en una huella dependerá de la sensibilidad de la técnica y, por eso, muchas veces tiene un papel muy limitado en la determinación de la identidad. El detalle o nivel con el que una huella pueda ser evaluada dependerá de su calidad y nitidez.

TIPO	EJEMPLO
Bifuración	
Cortada	
Empalme	
Encierro	
Extremo de línea	
Horquilla	
Islote	
Punto	



FIGURA 7.9. Morfología de algunos puntos característicos que ofrecen las crestas en dactilogramas naturales y su representación en una impresión dactilar.

7.4.4. Fórmula dactiloscópica

Es el conjunto de símbolos y números mediante los que se representan los tipos de impresiones dactilares sobre una ficha especialmente diseñada, que recibe el nombre de *ficha dactilar*. La ficha dactilar con las impresiones de los diez dactilogramas presenta la *individualidad dactiloscópica* de una determinada persona. Su objetivo es formar colecciones ordenadas que permitan, en caso necesario, una rápida y eficaz localización.

En la ficha decadactilar, se llama *serie* a los cinco dactilogramas de la mano derecha y *sección* a los cinco de la mano izquierda.

En la serie, al dactilograma del pulgar se le denomina *fundamental* y al de los otros dedos *división*,

En la sección, al dactilograma del pulgar se le denomina *subfundamental* y al de los otros *subdivisión*.

En la fórmula decadactilar se emplean, como se ha mencionado anteriormente, letras para los dactilogramas de los dedos pulgares y números para los de los dedos restantes (sección 7.4.2). La transcripción de la simbología de los diseños de los dígitos de una persona se hace de forma lineal, primero la correspondiente a la mano derecha y luego la correspondiente a la mano izquierda, en el orden pulgar, índice, medio, anular y meñique. Un ejemplo de fórmula decadactilar podría ser:

D 23 32 – S 12 34

De esta forma, y en base a los cuatro tipos básicos de dactilogramas existentes, sería posible obtener $4^{10} = 1.048.576$ combinaciones teóricas posibles.

A pesar de este elevado número de posibilidades, es posible la existencia de numerosas fórmulas iguales, siendo necesario recurrir a una subclasificación, en la que se considerarán otros parámetros (sección 7.4.3).

7.4.5. Dictamen

Una vez realizado el análisis, comparación y evaluación de la huella encontrada, los especialistas emiten un dictamen que puede ser de exclusión, no concluyente (cuando, por ejemplo los detalles en la impresión no son lo suficientemente claros para llegar a una conclusión de identidad o de eliminación) o bien de identificación positiva, basado en alcanzar un umbral para el número de puntos o parámetros coincidentes que deben ser observados. Este número es variable de unos países a otros, siendo el estándar más común el de 12 parámetros anatómicos de forma y posición, que es el vigente actualmente en España, aunque se puede reducir a ocho parámetros cuando se puede establecer de manera coincidente alguno de los patrones básicos.

7.5. TIPOS DE HUELLAS DACTILARES

Las huellas dactilares encontradas en la escena de un delito o en cualquier objeto sujeto a investigación se pueden agrupar en dos categorías: visibles o patentes e invisibles o latentes.

Huellas dactilares *visibles*. Son las que se imprimen con dedos que han tocado determinadas sustancias, como tinta, aceites, sangre, pintura fresca, harina, etc. Son las más fáciles de observar sin necesidad de emplear métodos de revelado. Se pueden distinguir cuatro tipos:

- Por impregnación o estampación. Son las dejadas sobre superficies planas y limpias por dedos que han estado en contacto con sustancias no pulverulentas, como pintura, grasa, sangre, etc. Sus crestas papilares impregnadas de dichas sustancias dejarán impresa una huella.
- Por sustracción. Cuando un dedo presiona sobre una superficie pintada, impregnada en sangre, polvo o grasa, y a continuación se

levanta se llevará en cada cresta papilar una porción de materia o sustancia quedando marcado un dibujo dactilar. Estos dibujos no suelen tener valor desde el punto de vista de la identificación pero si orientativo en la investigación.

- Por depósito. Cuando los dedos entran en contacto con sustancias finamente divididas tipo hollín, talco, harina... y luego tocan una superficie limpia dejaran un rastro, generalmente útil con fines de identificación.
- Huellas dactilares *plásticas* o *moldeadas*. Son las resultantes de presionar con los dedos sustancias blandas que no recobran ya su forma original, como arcilla, jabón, plastilina, masilla, cera, etc., es decir sustancias capaces de grabar las crestas papilares.

Huellas dactilares *invisibles* o *latentes*. No son visibles a simple vista aunque a veces puedan serlo por transparencia a través de un cristal o aplicando una luz indirecta a la superficie. Hay que revelarlas (sección 7.7) y son las más frecuentes en la escena del crimen y también las más difíciles de detectar. Son el resultado de la transferencia de las grasas naturales y productos de transpiración, presentes en los dedos a una superficie por el tacto.

7.5.1. Composición y características de las huellas latentes

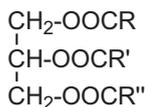
Una huella latente contiene siempre una mezcla de secreciones naturales procedentes de las glándulas sudoríparas que se encuentran en la piel de los dedos y de las manos y restos de sebo, generados al tocarse el pelo o la cara. Son los denominados *componentes propios*. Pero, además es posible encontrar otros componentes en pequeñas cantidades, *componentes extraños*, procedentes de otras partes del cuerpo que se tocaron antes de dejar la huella, como sangre, perfumes, cosméticos, orina, etc. También restos de pintura, comida, polvo, aceite, drogas, etc., que contribuyen a facilitar su detección en una superficie.

Refiriéndonos a los componentes propios, el contenido de las secreciones naturales en una huella dactilar fresca es: agua en cantidad aproximada de un 98%, sales inorgánicas (principalmente iones cloruro y también amonio, sulfatos, fosfatos, hierro e iones metálicos), componentes orgánicos, como ácidos (láctico, acético, úrico), aminoácidos, azúcares, urea, alcoholes, áci-

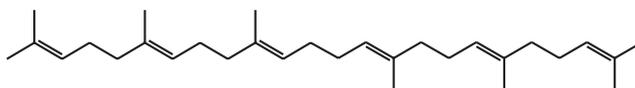
dos grasos, triglicéridos (ésteres de ácidos grasos con el glicerol), o el escualeno (terpeno), etc., (figura 7.10) y también células de descamación de la piel.

$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ Ácido oléico o Ácido cis-9-octadecenoico

$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$ Ácido palmítico o Ácido n-hexadecanoico



Triglicérido



Escualeno

FIGURA 7.10. Ácidos grasos, triglicéridos y escualeno son lípidos insolubles en agua, cuya función es la de reserva energética.

Las secreciones naturales presentan una serie de características, a tener en cuenta a la hora de seleccionar el procedimiento de revelado más adecuado:

- Se encuentran presentes en concentraciones muy bajas
- Su persistencia es variable. El agua es uno de los primeros componentes en desaparecer de una huella pero otros componentes son muy resistentes a factores ambientales, por lo que a menos que concurren una serie de condiciones adversas (calor extremo, humedad, abrasión, etc) que alteren su calidad, una huella puede durar muchos años. Se tiene constancia de una huella revelada 42 años después de estar depositada.
- Su composición varía con el clima, la dieta, el metabolismo e incluso el estado de ánimo de cada individuo.

7.6. BÚSQUEDA DE HUELLAS DACTILARES LATENTES

De la misma forma que la tecnología aplicada al estudio del escenario de un crimen ha avanzado, también lo han hecho las medidas que los delincuentes utilizan para no dejar su rastro, por lo que la búsqueda de huellas dactilares latentes requiere paciencia y habilidad.

Cuando el especialista llega a la escena del crimen, debe seguir un protocolo, que en líneas generales incluiría las siguientes acciones:

- Asegurar la escena.
- Interrogar a testigos.
- Fotografiar la escena.
- Buscar impresiones digitales comenzando por los posibles puntos de entrada, examinando manillas y marcos de puertas y ventanas, cualquier objeto que haya podido desplazarse y también lugares menos obvios.
- Si la búsqueda o examen ha de realizarse en una persona viva lo más recomendable es aplicar un papel adhesivo sobre las zonas sospechosas de contener huellas y posteriormente realizar su examen en el laboratorio. Por el contrario si se trata de un cadáver, existirán otros procedimientos (sección 7.6.1)
- Recoger, registrar, señalar y preservar las pruebas físicas encontradas.

7.6.1. Identificación de huellas dactilares en cadáveres

La toma de huellas en cadáveres se ha convertido en un trámite rutinario en determinadas autopsias y se suele realizar, una vez retirado de dedos y uñas cualquier rastro que constituya un posible indicio o cualquier elemento contaminante, siguiendo un protocolo en función de las condiciones de rigidez que presente el cadáver.

El tiempo transcurrido entre la muerte y el hallazgo de un cadáver dan lugar a que se produzca en mayor o menor grado una putrefacción del mismo, poniendo a prueba la pericia del dactiloscopista en el proceso de identificación, que deberá proceder de acuerdo al estado físico del cadáver.

Si la piel está reblandecida a causa de la humedad o como resultado de la inmersión en agua, es a veces necesario inyectar glicerina o cera líquida debajo de las articulaciones. En el caso de que los daños sean muy grandes:

- Se puede retirar la capa epidérmica de los dedos y montarla en la mano del técnico, sobre un guante quirúrgico, el cuál realizará el procedimiento de entintado y estampado, o bien

- Retirar la epidermis y trabajar directamente con la dermis donde existen también los dibujos papilares aunque con menor relieve.

Si el cuerpo ha estado expuesto al fuego, presentará una contracción de músculos y tendones conocida como «posición de boxeador». Al tener el puño cerrado, no se produce la combustión de esa zona y las crestas papilares pueden estar intactas. Si los dedos presentan deshidratación e incluso pliegues verticales que impiden observar el dactilograma, se procede a empaparlos en hidróxido de amonio durante el tiempo preciso para que adquieran una cierta elasticidad y, en caso de no ser aquél suficiente, se procede a inyectar este mismo compuesto en las capas profundas de los pulpejos.

Cuando un cuerpo está momificado, se procede a mojar la yema de los dedos sumergiéndolos en una mezcla de agua destilada, glicol y ácido láctico durante un tiempo, a veces varias semanas con el fin de que se reblandezcan y sea posible la toma de huellas.

7.7. TÉCNICAS DE REVELADO DE HUELLAS DACTILARES LATENTES

El *revelado* de huellas dactilares latentes es el proceso mediante el cual dicha huella puede ser encontrada, visualizada y analizada.

Es importante señalar que una huella latente es, en el mejor de los casos, una forma de evidencia física muy frágil, por lo que debe de manejarse con mucho cuidado si se pretende que sea de utilidad.

Debido a la característica de invisibilidad inherente a las huellas latentes, es necesario disponer en primer lugar de técnicas que permitan su localización. En este sentido:

El dispositivo llamado *Reflected Ultraviolet Imaging System* (RUVIS) es un sistema que emite luz UV de onda corta (254 nm) y permite localizar y fotografiar huellas en superficies lisas y no porosas tanto en la oscuridad como a plena luz del día. En el caso de residuos de impresiones dactilares que contengan aceites o aminoácidos la luz UV se refleja o dispersa. Así y, debido a que la mayoría de los materiales absorben este tipo de luz, el fondo aparece negro y solo la impresión es visible.

Fuentes de láser. El láser se inventa en 1960, siendo uno de los primeros el de argón (luz azul-verdosa). En 1970 se empiezan a utilizar en la búsqueda



de huellas dactilares y es en 1980 cuando se inventan los láseres portátiles que permiten su uso en la escena del crimen. Su funcionamiento se basa en la fluorescencia de algunos componentes presentes en las huellas latentes, como sodio o glucosa, al ser iluminados por dicha luz y a diferencia de los reactivos en polvo, no necesita que la huella esté húmeda. De esta forma es posible visualizar y fotografiar las impresiones, utilizando filtros adecuados.

Una vez localizadas, las huellas podrán ser fotografiadas, transportadas y finalmente estudiadas con fines identificativos. En la elección del método a utilizar se tendrá en cuenta:

- El tipo y naturaleza (rugosidad, porosidad, color...) del soporte en el que se encuentren depositadas. Ésta será la primera opción a considerar a la hora de elegir un procedimiento de revelado, ya que por lo general el investigador desconocerá a priori la procedencia de la huella y por tanto las sustancias presentes en ella.
- Las propiedades físicas y químicas de las sustancias presentes en la huella, de forma que en contacto con los reactivos empleados se produzca un contraste lo suficientemente fuerte para que haga posible su observación y fotografiado. Se considerará si está húmeda o seca, si está contaminada con grasa, sangre, etc.

En este sentido, existen manuales que recopilan protocolos de actuación que incluyen la aplicación de reactivos de forma secuencial, dependiendo cada nuevo paso del resultado obtenido en el paso anterior.

Los reactivos o reveladores de huellas pueden dividirse en dos grandes grupos: reactivos físicos y reactivos químicos, existiendo para todos ellos, desde 1997, la obligatoriedad de no interferir o invalidar análisis posteriores de ADN. En general, un buen reactivo para revelar huellas latentes debe cumplir los siguientes requisitos:

- Tener suficiente adhesividad a la huella
- Poseer características humectantes
- Ser capaz de mantener definidos los espacios entre las crestas papilares, de manera que no den lugar a falsas identificaciones.

Algunos de estos reactivos son específicos para el revelado de una determinada sustancia presente en la huella, mientras que otros son más generales como por ejemplo, aquellos que revelan cualquier compuesto de tipo graso.

7.7.1. Reactivos físicos

Aquellos que se aplican directamente, y de forma más o menos mecánica, sobre las superficies donde presumiblemente se encuentran las huellas. Las mejores superficies para el empleo de reveladores físicos son el cristal, el vidrio liso, el metal, la loza, la porcelana y la madera pulimentada. Entre estos reactivos de encuentran:

Reactivos de tipo pulverulento

Son polvos finamente divididos, muy adhesivos, por lo que se adhieren con facilidad a los elementos componentes de las huellas: al agua, si son recientes, o a la fracción grasa cuando son mas antiguas. Se aplican mediante brocha, cepillo o plumero magnético sobre la superficie que presente la huella. Suelen ser muy higroscópicos y su exceso se elimina con un pincel. Se utilizan, generalmente, en superficies duras y poco absorbentes como maderas pintadas, espejos, vidrios o baldosas, y presentan distintas coloraciones:

Blancos. Útiles para superficies oscuras o negras. Entre ellos se encuentran.

- Carbonato básico de plomo ($2 \text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$), cerusa o albayalde, que es un polvo de aspecto blanquecino, amorfo, insoluble en agua y muy adherente. Es un excelente revelador aunque no muy sensible cuando las huellas se van secando. Debido a su toxicidad fue prohibido durante algunos años. Actualmente, la policía científica lo utiliza de nuevo con las debidas medidas de seguridad.
- Compuestos de talco o de yeso.

Rojos. Muy utilizados para superficies muy pulidas, tipo espejo, debido a que ayudan a su fotografiado.

- Sangre de Drago, procedente de la resina pulverizada del drago canario. Muy utilizado antiguamente y poco en la actualidad. Tiene buena adherencia y se aplica con pincel o por resbalamiento. Presenta la ventaja de que una vez revelada la huella y tras aplicarle calor se conservará durante mucho tiempo.

Negros. Para el revelado de huellas en materiales claros o blancos.

- Toner de las fotocopiadoras, revela huellas frescas sobre papel. Se aplica por resbalamiento.

- Negro de humo, procedente de la combustión de materiales resinosos. Se aplica con pincel y es difícil eliminar su exceso sobre la huella. Es un polvo pesado que no flota en el aire y que se adhiere a la huella, pero no a la superficie. Al ser muy volátil es recomendable utilizarlo mezclado con licopodio (polvo de origen vegetal) para darle consistencia.

Ambos fueron muy utilizados aunque actualmente gozan de poca popularidad entre los profesionales debido a la suciedad que provocan.

Grises.

- Compuestos de aluminio, con gran adherencia y por tanto muy útiles para huellas poco recientes. Su utilidad es en superficies claras y secas, como cristal, loza u objetos esmaltados o barnizados, entre otras.

Two-colour powder. Permiten dibujar la huella en color oscuro cuando esta se encuentra sobre una superficie clara y al revés, de color claro cuando se trata de una superficie oscura.

Polvos magnéticos. Existen en distintas tonalidades y contienen un metal, hierro en gran porcentaje. Se aplican con una brocha magnética en superficies suaves, como el plástico, la piel, la madera, el vidrio, el caucho o el papel generalmente, pero nunca sobre objetos metálicos. Tienen la ventaja de conseguir una imagen bastante limpia, ya que apenas dejan residuos alrededor de la huella, aunque son bastante caros.

Polvos fluorescentes. Con o sin propiedades magnéticas, se elaboran con pigmentos coloreados luminiscentes (ver tema 2) y son una buena elección para el revelado de huellas en superficies rugosas o multicolores. Las huellas se hacen visibles sólo con luz ultravioleta (lámpara de Wood) y pueden ser fotografiadas en la oscuridad, no apareciendo los colores del fondo en la fotografía.

Reactivos de Titanio. Polvos pesados, amorfos e insolubles en agua, basados en la combinación de ferralla o limaduras muy pequeñas de hierro (JC1), bien con polvo de titanio o bien con negro de humo. Dependiendo de la combinación se obtiene el (JC2), resultado de combinar la ferralla con titanio, mientras que la combinación de ferralla y negro de humo da lugar al (JC3), de color oscuro. Se está experimentando con la mezcla de ferralla y polvos fluorescentes (JC10). El JC2 presenta una gran adherencia y además el titanio se amalgama con el sudor y produce el endurecimiento de la

huella revelada. Estos reactivos son apropiados para el revelado de huellas sobre cintas adhesivas de caucho.

Una vez reveladas las huellas, se fotografían y se conservan mediante un film adhesivo que reproduce el perfil que han trazado los polvos.

Otros reactivos físicos

Análisis SPR (Small Particle Reagent). Muy útil para el análisis de huellas en superficies húmedas. Consiste en sumergir el objeto que contiene la huella en una suspensión de sulfuro de molibdeno IV, sólido insoluble en agua. Cuando el objeto se seca se observa una imagen de color grisáceo, similar a la que se obtiene utilizando reactivos en polvo. Es un reactivo tóxico y destructivo de la prueba, pero de gran utilidad cuando existen residuos de grasa en las huellas.

Deposición de metales en vacío, VMD (Vacuum Metal Deposition). Este complejo método se utiliza cuando se dispone de porciones pequeñas de huellas debido a su alta sensibilidad. Consiste en colocar inicialmente la superficie que contiene la huella a examinar en un recipiente cerrado en el que se hace vacío y a continuación, evaporar una pequeña cantidad de oro que se adhiere uniformemente a la superficie penetrando en la huella. Después se procede a evaporar también una pequeña cantidad de zinc metal, que se adhiere al oro pero no a los restos de la huella dactilar. El resultado es el desarrollo del negativo de la huella, donde las crestas permanecen transparentes mientras el fondo, incluyendo los surcos entre las crestas, aparece plateado debido al zinc. El VMD, ha demostrado ser un procedimiento muy eficaz para el revelado de huellas sobre soportes plásticos o de cristal y en general en superficies no porosas y está considerado como una técnica muy sensible, sobre todo para la detección de huellas antiguas y también de aquellas que han estado sometidas a condiciones adversas.

7.7.2. Reactivos químicos

Los reveladores químicos son sustancias que al entrar en contacto con las secreciones cutáneas *producen una reacción química*, poniendo de manifiesto los dibujos de las crestas papilares que permanecían latentes. En general, son más sensibles que los de tipo pulverulento y pueden ser



líquidos o gaseosos. A continuación detallaremos la composición y forma de actuar de los más comunes:

Vapores de yodo metal. Se utilizan para el revelado de huellas en cartón, papel u objetos similares. Cuando el yodo, sólido cristalino, se calienta se desprenden vapores que por reacción con los ácidos grasos insaturados presentes en la huella latente la hacen visible, observándose un color ámbar-café sobre el fondo del soporte.

Es una técnica fácil de aplicar y que no mancha ni daña el soporte, pero presenta una serie de desventajas, como son:

- Su toxicidad y potencial corrosivo para los equipos metálicos por lo que es conveniente el uso de campanas extractoras en su manipulación.
- Su baja sensibilidad, que hace que esta técnica no sea adecuada para el revelado de muestras antiguas y
- Su baja permanencia. Las huellas así reveladas han de fotografiarse rápidamente, ya que empiezan a desvanecerse cuando se deja de pasar los vapores de yodo. Una forma de hacerlas más perdurables consiste en aplicar con un spray una disolución de almidón en agua, que reacciona con el yodo depositado, observándose entonces una coloración azul. Otro reactivo de fijación es la 7,8-benzoflavona, que también por reacción con el yodo da lugar esta vez a un compuesto de color púrpura. Existen kits conteniendo la mezcla yodo-benzoflavona, con los que se pueden rociar paredes, ventanas o cualquier superficie factible de contener huellas.

Ninhidrina. Disuelta al 5% en etanol, metanol o acetona, reacciona con el grupo $-H_2N$ de aminoácidos y proteínas presentes en la piel dando, compuestos coloreados, llamados púrpura de Ruhemann, visibles a las 72 horas a temperatura ambiente o a los 30 minutos a 90-100 °C (figura 7.11). Este reactivo se utiliza desde 1954 en criminalística para buscar huellas lofoscópicas sobre superficies porosas, como papel, cartón o maderas sin pintar. También, cuando se estudian pistas en una habitación con paredes empapeladas o huellas que ya tienen algunos años de antigüedad. Presenta el inconveniente de estropear los papeles que se van a tratar y también las tintas y, además, no es el más adecuado para utilizarse sobre soportes mojados.

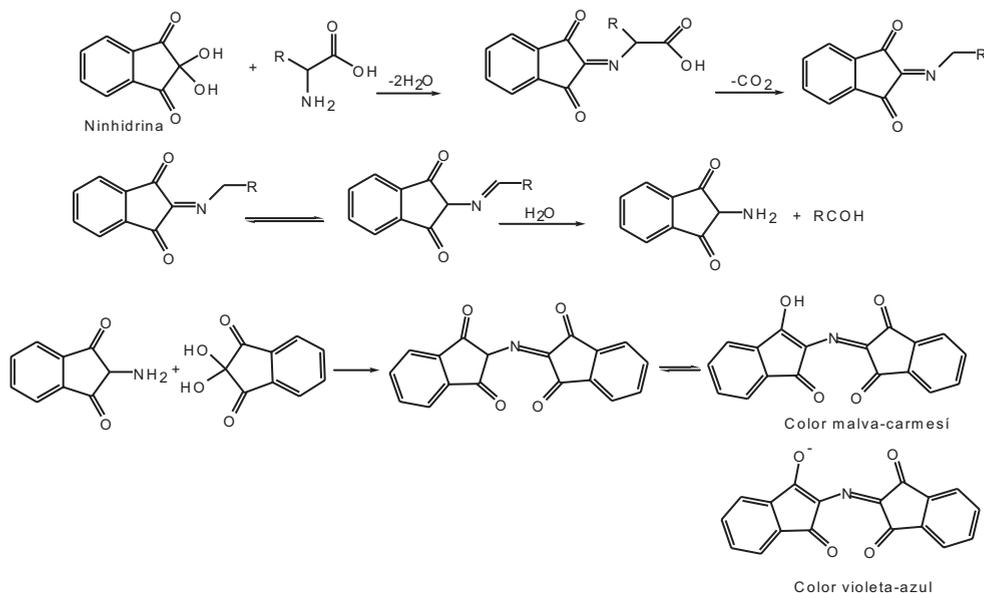


FIGURA 7.11. Reacción de la ninhidrina (2,2-Dihidroxi-1,3-indanodiona) y formación de los compuestos de Ruhemann.

Es posible realizar y en algunos casos preservar los resultados obtenidos con la ninhidrina mediante la adición de un segundo reactivo, por ejemplo, cloruro o nitrato de zinc en forma de aerosol. Esta combinación es de gran utilidad cuando la huella se encuentra sobre soportes policromados o de color rojizo, ya que se observa entonces una evolución del color malva/carmesí o violeta/azul al naranja, visible con luz natural. Además, y si se irradia la prueba con luz de longitud de onda de 480 nm y se enfría con nitrógeno líquido, aparece fluorescencia que incrementa enormemente el contraste de la huella, y que se debe a la formación de un complejo de zinc. (figura 7.12).

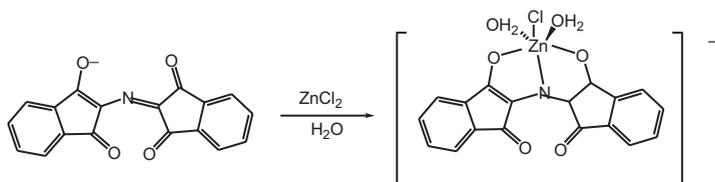


FIGURA 7.12. Formación del complejo de zinc de color naranja, por reacción entre el cloruro de cinc y la ninhidrina (color violeta/azul).

De forma similar, si tras el revelado inicial, la prueba conteniendo la huella se trata con una disolución de cloruro o nitrato de cadmio y posteriormente se enfría con nitrógeno líquido y se irradia con luz de 505 nm (luz turquesa/verde) también se observa fluorescencia.

A partir de 1980 se empezaron a desarrollar otros reactivos de estructura similar a la ninhidrina, capaces de reaccionar con aminoácidos y que tienen una reacción fluorescente más intensa. Entre ellos, el DFO (1,8-diazafluoren-9-ona) y el 5-MTN (5-metiltioninhidrina). Muchas veces los resultados con el DFO y el 5-MTN son mejores, no a causa de la reacción en si misma, sino como ocurre con el primero de ellos debido a un aumento de la visibilidad de la huella al utilizar una luz de unos 530 nm (luz verde) (figura 7.13).

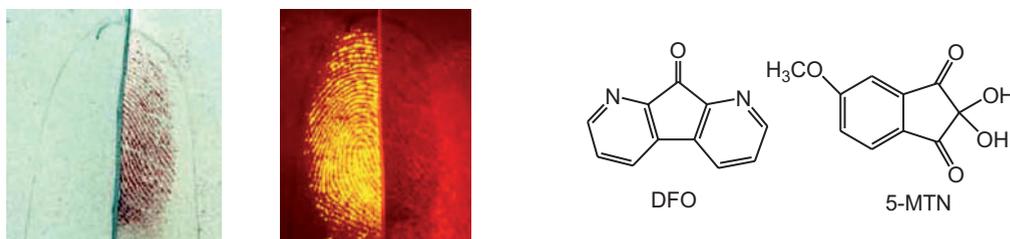
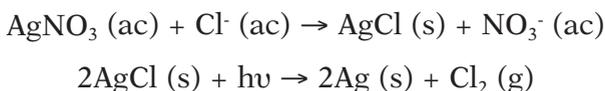


FIGURA 7.13. Izquierda: huella dactilar tratada con DFO (mitad izquierda) y ninhidrina (mitad derecha), visualizada con luz blanca. Derecha: huella dactilar tratada con DFO (mitad izquierda) y ninhidrina (mitad derecha), visualizada con luz de ≈ 530 nm a través de un filtro naranja oscuro.

El 5-MTN, combina las ventajas favorables de la ninhidrina (color púrpura mas intenso, observado con luz blanca) y las del DFO (fuerte fluorescencia, origina un color naranja). Es muy útil cuando es imprescindible preservar el documento ya que no deteriora las tintas debido a que el disolvente no es acetona.

Nitrato de plata. Muy útil para el revelado en papel. Se utiliza en forma de aerosol y por tanto en lugares ventilados. Cuando entra en contacto con la huella, se forma cloruro de plata, sensible a la luz, dando lugar a marcas de color marrón o gris oscuro y haciéndola visible.



Una vez que las marcas han aparecido, deben retirarse de la luz y fotografiarse ya que, en caso contrario, a las pocas semanas las huellas se vuelven borrosas y se pierde el contraste.

El nitrato de plata elimina los restos de aceite y de aminoácidos presentes en la huella, por lo que nunca debe usarse antes que la ninhidrina. Tiene un coste elevado y además no funciona cuando la muestra ha estado en contacto con el agua. En caso de humedad se utiliza el PD, que estudiaremos a continuación.

Physical Developer (PD). Se trata principalmente de nitrato de plata mezclado con un sistema redox, $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2]/[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3]$, un detergente y un tampón. La reacción entre los aceites y las ceras presentes en las secreciones y el PD da lugar a la aparición de un precipitado gris de plata que se observa a simple vista. Tiene como ventajas su utilidad para el revelado de huellas latentes en materiales porosos que están húmedos o han sido humedecidos con anterioridad (insolubilidad de los componentes grasos en agua) y su efectividad en revelar huellas cuando otros procedimientos han fallado. Por ello es prácticamente el único procedimiento que permite revelar una huella sobre papel mojado. Presenta, sin embargo, la desventaja de ser un método destructivo y de elevado coste.

Cianocrilato. Los vapores de metil o etil cianocrilato se utilizan, desde finales de los años setenta del siglo XX, como método de rutina para el revelado de huellas en superficies no porosas, como plásticos, metales, vidrios, fibras sintéticas, maderas barnizadas, superficies esmaltadas, etc. También es recomendable junto con los polvos magnéticos, para el análisis de huellas sobre piel humana. En este último caso se podrá aplicar directamente sobre la piel, si se trata de un cadáver o sobre la huella en papel adhesivo cuando se trata de una persona viva.

Se conoce también con los nombres de pegamento instantáneo, superglue o «la gotita». Debido a su toxicidad ha de manipularse en campana de gases en el laboratorio aunque a veces en circunstancias especiales, ha de hacerse fuera de aquél, como en el tratamiento de coches o en una casa. El reactivo es un monómero, generalmente el éster metílico o etílico del ácido 2-cianoacrilico, que con ayuda de calor y humedad forma un polímero de alta masa molecular, sin entrecruzamiento entre cadenas (figura 7.14), en forma de polvo blanco grisáceo, que se adhiere a la huella, que queda, de esta forma, conservada en forma de película plástica. Aunque el mecanismo no es cono-

cido, se cree que son las especies aniónicas como los cloruros, solubles en agua y presentes en los residuos de las huellas las que inician la polimerización en su superficie.

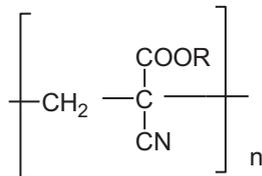


FIGURA 7.14. Polímero de un éster del ácido 2-cianoacrilico.

A veces si la polimerización es muy rápida se forman precipitados no deseables y para evitar esto, los pegamentos que se utilizan en criminología suelen contener estabilizantes-generalmente ácidos, en concentraciones de ppm-que retardan la polimerización.

Como ocurría en el caso de la ninhidrina y para lograr mejores contrastes entre las huellas y las superficies donde se encuentran, se puede realizar un segundo tratamiento mediante la aplicación de colorantes bien en el rango de la luz visible, como es el caso del violeta de genciana (color violeta), o bien con propiedades fluorescentes, como flavina (las tiñe de color amarillo), safranina (Rojo Básico 2) o rodamina 6G (Pigmento Rojo 81) y posterior excitación con luz verde para obtener una respuesta mucho más sensible y con mayor contraste (figura 7.15).

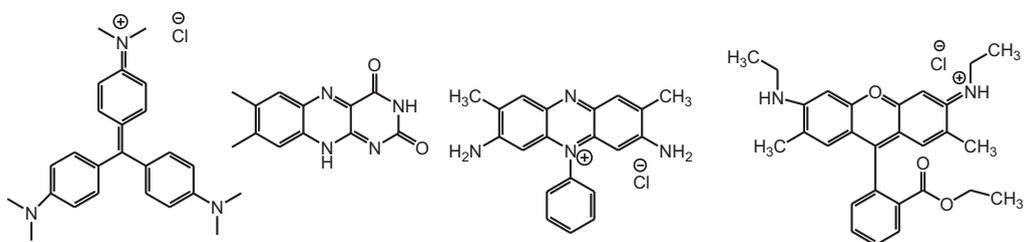


FIGURA 7.15. Violeta de Genciana, Flavina, Safranina y Rodamina 6G.

Violeta de Genciana. La prueba conteniendo la huella se sumerge en una disolución acuosa de violeta de genciana (figura 7.15) y se enjuaga con agua, apareciendo entonces la huella de color azul. Este colorante se puede

utilizar también en forma de aerosol y es muy útil en el revelado de huellas dactilares en papel, telas y en la parte engomada de cintas adhesivas. También cuando existe contaminación por grasa. Es un reactivo tóxico y además con efectos destructivos. Por tanto, ha de reservarse para utilizar cuando no se han obtenido resultados con otros procedimientos.

Amido Black. También conocido como azul negro de naftol (figura 7.16). De uso reciente, se emplea cuando se sospecha la presencia de sangre en una huella, siempre sobre soportes no porosos. Es un revelador eficaz para las proteínas de la sangre, con las que reacciona dando un color azul oscuro.

Este reactivo, sin embargo, no reacciona con los componentes propios de las huellas por lo que es recomendable, una vez utilizado este reactivo, tratar la evidencia con PD con el fin de mejorar el desarrollo de la huella latente.

Existen numerosos métodos para revelar o realzar huellas dactilares latentes contaminadas con sangre, empleando leuco-cristal violeta, azul de coomassie o luminol (ver tema 8).

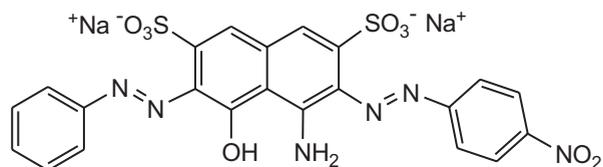


FIGURA 7.16. Amido Black, sal disódica del ácido 4-amino-5-hidroxi-3[(4-nitrofenil)azo] 6-(fenilazo)-2,7,naftalendisulfónico.

Nanopartículas. Estudios realizados con nanopartículas han puesto de manifiesto la interacción química, es decir, la formación de enlaces entre ellas y grupos químicos presentes en los residuos de las huellas. Se están ensayando nanopartículas de sílice (SiO_2) recubiertas con un grupo carboxilo ($-\text{COOH}$), conteniendo en su interior un tinte especial para poder visualizarlas una vez adheridas a las huellas dactilares. Se trata de un campo muy prometedor en la ciencia forense, con el que se pretende aumentar la sensibilidad de los métodos tradicionales y encontrar huellas dactilares difícilmente detectables.

La existencia de una gran variedad de materiales sobre los que es posible encontrar una huella latente, así como las diferentes circunstancias en las que se producen, ha dado lugar a la aparición de pruebas muy específicas. Entre estos reveladores destacan:

Dimetilaminocinamaldehído (DMA). Para la detección de huellas en papel térmico. Reacciona con la urea presente en las secreciones, dando lugar a un color rojo oscuro.

Tetróxido de rutenio (RuO_4). Reactivo muy útil para el revelado de huellas en papel moneda (aparición de color gris oscuro). Fue usado de forma limitada debido a su tendencia a descomponerse de forma explosiva. Actualmente, el desarrollo de un método seguro permite su utilización. Se comercializa como RTX.

Disolución amoniaca de sales de cobre II. Utilizado para la detección de huellas en latón. La muestra (por ejemplo, un cartucho de munición) se sumerge de forma breve y repetidas veces, en una disolución del reactivo hasta que el latón se vuelve de color negro, por formación de CuO . Las huellas presentes, debido a la formación de un complejo entre el Cu (II) y las grasas, se observan de color grisáceo.

Ácido acético. Utilizado para huellas sobre superficies de cobre. El cobre sumergido en ácido acético durante varias horas se vuelve de color verde-grisáceo, mientras que las sustancias presentes en la huella protegen al metal de la acción del ácido, haciendo que ésta se revele de color rojizo.

7.7.3. Técnicas que no emplean reactivos

Además de las fuentes láser y el dispositivo Reflected Ultraviolet Imaging System descritos en la sección 7.7, podemos mencionar también la técnica de:

Micro-fluorescencia de Rayos X (μFRX). Técnica de análisis elemental que se presenta como muy prometedora en química forense para el análisis de huellas dactilares. Permite detectar elementos como sodio, potasio y cloro presentes en el sudor, en función de su posición en la superficie de la huella. Se obtendría así una imagen de la huella, formada por puntos donde se han depositado las sales de acuerdo con el patrón dactilar.

7.8. OTRAS HUELLAS COMO ELEMENTOS DE IDENTIFICACIÓN

Estrechamente relacionados con las huellas dactilares, los dibujos de las crestas papilares presentes en las palmas de las manos y en las plantas de los pies son también característicos y únicos para cada individuo. En estos casos suele existir un problema en la identificación, debido a que este tipo de huellas no suele archivarse. Sin embargo pueden ayudar a descartar a un sospechoso cuando su huella no coincide con la de la mano o el pie descalzo encontradas en la escena del crimen.

Del mismo modo la información aportada por otros tipos de huellas, como huellas de orejas, marcas labiales, huellas de zapatos (patrón de los pasos y características anatómicas de las suelas) y huellas de vehículos (dibujos, marcas de rodadas y de reparación de las ruedas) pueden ser importantes y de ayuda a la hora de esclarecer un crimen.

7.9. IMPORTANCIA DE ESTA TÉCNICA

A la hora de establecer la identidad positiva o negativa de un individuo, la fiabilidad y eficacia que proporciona el procedimiento de huella dactilar se encuentra sustentado en la actualidad por múltiples experiencias, con lo que la certeza obtenida es algo que nadie cuestiona. La seguridad con la que un dactiloscopista emite un dictamen de identificación es comparable a la aportada a partir de un análisis del ADN.

No obstante, en la identificación de cadáveres, en algunos casos ha sido necesario apoyarse en la odontología y en otras pruebas fisiológicas, anatómicas o antropométricas debido a las malas condiciones de conservación de las huellas.

Existen estudios que han puesto de manifiesto la no interferencia en general de estos métodos de revelado de huellas dactilares con los correspondientes para determinar el ADN cuando se sospecha la presencia de otros residuos, como sangre. A pesar de ello, se recomienda en estos casos no procesar las huellas en la escena del crimen.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. A partir del tipo de dactilograma correspondiente a los dedos de ambas manos, indique la fórmula decadactilar correspondiente:

Dedos de la mano derecha: Pulgar: Verticilo; Índice: Verticilo; Medio: Dextrodelto; Anular: Sinistrodelto y Meñique: Adelto.

Dedos de la mano izquierda: Pulgar: Adelto; Índice: Dextrodelto; Medio: Verticilo; Anular: Verticilo y Meñique: Sinistrodelto.

2. Completar los siguientes huecos:

I funcionan muy bien para el revelado de huellas dactilares en superficies lisas. **II** reaccionan con aminoácidos presentes en los residuos de huellas dactilares para producir compuestos de color morado. **III** es una técnica de revelado de huellas dactilares que da lugar a un producto de color ámbar-café que pueden fijarse con **IV**
..... **V** es un reactivo de revelado que produce un precipitado blanco que cambia de color a morado/negro cuando se expone a la luz ultravioleta.

3. Empareje los términos de ambas columnas.

I. Las crestas papilares	A. Conjunto de protuberancias y depresiones en las yemas de los dedos
II. Dactilograma	B. Se simboliza con el número 1 para todos los dedos excepto para el pulgar
III. Dactilograma sinistrodelto	C. Son comunes a la raza humana
IV. Dactilograma en arco	D. Uno de los tipos de dactilograma más frecuente

4. Indique si las siguientes afirmaciones son ciertas a falsas, justificando su respuesta:

- a) Cuando en la fórmula de un dactilograma decadactilar se encuentra la letra X significa que la persona presenta una amputación o ausencia de dedo.
- b) Los restos de sebo presentes en una huella dactilar son un componente propio de la piel de los dedos.
- c) El fundamento del revelado de huellas dactilares utilizando como reactivo

vapores de yodo, se basa en su reacción con los ácidos grasos insaturados presentes en la huella.

- d) La técnica anterior de revelado presenta una serie de desventajas, como toxicidad de los vapores, baja sensibilidad y baja permanencia de las huellas. Una forma de hacerlas perdurables es mediante la aplicación de una disolución de almidón en agua.

Resolución

1. V 43 21 – A 24 42

2. **I** Los reactivos en polvo. **II** La ninhidrina y derivados. **III** El revelado con vapores de yodo. **IV** una disolución de almidón en agua. **V** El nitrato de plata.

3. I-C; II-A; III-D; IV-B

4. a) FALSO. La letra X presente en un dactilograma es indicativa de la presencia de cicatrices o lesiones de carácter permanente que impiden su lectura y clasificación.

b) FALSO. En la piel de fricción de los dedos existen glándulas sudoríparas pero no glándulas sebáceas, por lo que los restos de sebo presentes proceden de otras partes del cuerpo (cara, cabeza) tocados previamente.

c) VERDADERO. La reacción de yodo con los ácidos grasos insaturados es una reacción de adición a los dobles enlaces presentes, originando el desarrollo de un color ámbar-café que hace visible la huella.

d) VERDADERO. El almidón es la principal reserva alimenticia de los vegetales y está formado por la mezcla de dos componentes: amilosa de estructura lineal, soluble en agua caliente y formada por unas 200 unidades de glucosa y amilopectina de estructura ramificada, insoluble en agua caliente y formada por unas 1000 unidades de glucosa.

El yodo se integra en las unidades de amilosa pero no en las de amilopectina produciendo una coloración azul característica.

LECTURA

«Huellas dactilares; sus comienzos en los tribunales de justicia»



- *En 1892, en Necochea (Argentina), Francisca Rojas de Caraballo fue la primera persona en el mundo condenada por asesinato en base a la evidencia suministrada por sus huellas dactilares, encontradas en la escena del crimen. Francisca Rojas, mató a sus dos hijos de cuatro y seis años, culpando a su vecino Pedro Ramón Velasquez de dicho asesinato. El hallazgo de una huella ensangrentada (figura izquierda), correspondiente a un dedo pulgar de la mano derecha, en el buzón de la casa permitió a los investigadores de la policía, con ayuda de Juan Vucetich, exculpar a Pedro e identificar a Francisca como autora del hecho, quien terminó confesando su culpabilidad.*

- *En 1902, la identificación dactilar se acepta por primera vez como prueba en un juicio en el Reino Unido. El acusado, Henry Jackson, fue condenado por robo. La «mala suerte» hizo que dejara sus huellas en la ventana de la casa en la que entró a robar una caja de bolas de billar.*
- *También en 1902 fue encontrado asesinado en París Joseph Reibel. La investigación del caso, asignada a Alphonse Bertillon, condujo al arresto del asesino. Sus huellas registradas a causa de otra detención resultaron idénticas a las encontradas en los cristales de una ventana.*
- *La noche del 19 de Septiembre de 1910, en Chicago, Clarence Hiller fue asesinado en su domicilio por disparos con arma de fuego. La policía detuvo a un sospechoso en las proximidades del lugar del crimen. Su nombre era Thomas Jennings, y en el momento de la detención tenía manchas de sangre en la ropa y portaba un revolver cargado.*

Analizado el lugar del crimen, se encontraron distintas pruebas, aunque las más significativas fueron cuatro huellas dactilares de la mano izquierda del intruso, localizadas en una verja recién pintada y próxima al punto de entrada a la casa, y que coincidieron perfectamente con las de Jennings.

Jennings, fue el primer delincuente condenado y sentenciado a muerte en el estado de Illinois, Estados Unidos, el 22 de diciembre de 1911, siendo además su sentencia judicial la primera que se sustentó en ese país admitiendo las huellas dactilares como prueba.

PRUEBAS QUÍMICAS Y ANÁLISIS DE ADN EN EVIDENCIAS BIOLÓGICAS



Impacto de sangre en una pared: su aspecto indica salida a borbotones por ruptura de una arteria

Soledad Esteban Santos

OBJETIVOS

General

Explicar las etapas de la investigación forense de evidencias biológicas, así como diferenciar la aportación de las distintas técnicas analíticas empleadas en el estudio de dichas evidencias.

Específicos

1. Distinguir los distintos tipos de evidencias biológicas.
2. Explicar la composición de los fluidos corporales de mayor protagonismo en la investigación forense.
3. Razonar el diseño de los métodos analíticos para las evidencias biológicas, basándose en las propiedades químicas de determinados componentes de aquéllas.
4. Justificar la reacción antígeno-anticuerpo en cuanto a fundamento de muchos procesos analíticos de fluidos corporales.
5. Reconocer el papel del análisis de ADN en la individualización de los restos biológicos.
6. Explicar las técnicas más empleadas en la determinación del perfil de ADN.
7. Diferenciar las características y aplicaciones del ADN nuclear y del ADN mitocondrial en la investigación forense.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para el estudio de este tema es importante tener claros muchos conceptos básicos de bioquímica y biología molecular, tales como proteína, enzima, ácido nucleico, gen, alelo, cromosoma o herencia, entre otros.

Tema 8. Pruebas químicas y análisis de ADN en evidencias biológicas

- 8.1. Introducción
 - 8.2. Forma de localizar, recoger y transportar las evidencias biológicas
 - 8.3. La sangre en criminología: serología forense
 - 8.4. Composición de la sangre: antígenos, anticuerpos y grupos sanguíneos
 - 8.5. Análisis forense de la sangre
 - 8.6. El semen en criminología: composición y análisis forense
 - 8.7. Otros fluidos corporales: pruebas químicas para la saliva
 - 8.8. El ADN y las ciencias forenses
 - 8.9. El ADN desde el punto de vista bioquímico
 - 8.10. El ADN desde el punto de vista biológico
 - 8.11. Perfil de ADN: técnicas de análisis de ADN
 - 8.12. El ADN mitocondrial en la investigación forense
 - 8.13. Otras aplicaciones del análisis de ADN
- Ejercicios y soluciones
Lectura: «El zar Nicolás II y el ADN mitocondrial»

8.1. INTRODUCCIÓN

Una de las evidencias más frecuentes en la escena del crimen es la sangre, tanto si está líquida o coagulada como si es sangre seca que aparece en forma de manchas. Pero no es éste el único tipo de indicio biológico. Asimismo hay que considerar la presencia de otros fluidos corporales, especialmente semen (sobre todo en casos de agresiones sexuales), y también saliva, orina, sudor, lágrimas, secreciones vaginales... Pero hay que tener en cuenta además otros indicios biológicos, como son los restos de tejidos de nuestro cuerpo (por ejemplo, la piel que puede quedar en las uñas de la víctima) e, incluso, el pelo o las uñas. Todas estas evidencias pueden enlazar directamente a un sospecho con la víctima o con la escena del crimen.

En este sentido, el objetivo óptimo del criminalista sería poder individualizar el indicio biológico estudiado, lo que significa adjudicarlo inequívocamente a un individuo en particular y no a otro. Esto se fue consiguiendo a partir de los inicios del siglo XX, cuando se descubrió que la sangre no era igual en todos los individuos. El análisis de los grupos sanguíneos, cuya aplicación en un principio estaba dirigida hacia la medicina, abrió después nuevas vías para la investigación forense. No obstante, el descubrimiento del perfil de ADN (1985), así como el desarrollo de diversas técnicas analíticas para su estudio, permitió asociar la sangre y todos los otros restos biológicos a una persona en particular con un elevadísimo grado de probabilidad. Y esto supuso para las ciencias forenses una verdadera revolución. No obstante, los métodos tradicionales de análisis de indicios biológicos se siguen empleando, debido a que sus procedimientos son sencillos, rápidos y de un bajo coste frente a la tecnología del ADN. Aunque en su mayoría son de carácter orientativo, no por ello dejan de representar una poderosa ayuda en la investigación criminal, por lo que deben estudiarse en ciencias forenses.

Dentro de los distintos tipos de restos biológicos se dedicará una especial atención a los fluidos corporales, sobre todo a la sangre y al semen, dada su mayor presencia en la escena del crimen.

8.2. FORMA DE LOCALIZAR, RECOGER Y TRANSPORTAR LAS EVIDENCIAS BIOLÓGICAS

Todos estos procesos implican, ante todo, un máximo cuidado en la manipulación de este tipo de evidencias, a fin de *no contaminarlas ni dañarlas* para no crear posibles interferencias en las futuras pruebas químicas ni en los análisis de ADN que, en su caso, pudieran llevarse a cabo con ellas.

8.2.1. Localización

Para esta tarea son muy útiles, como para la localización de otros tipos de indicios, las *luces forenses*. En primer lugar, tienen la ventaja de no ser destructivas, si bien de cara a las pruebas de ADN hay que tener precaución con la luz ultravioleta por las alteraciones moleculares que en algunos

casos podrían producir. En segundo lugar, se da la circunstancia de que en muchos restos biológicos existen componentes que presentan *luminiscencia*, como en el semen, orina, saliva, fluidos vaginales o sudor. Y cuando no es así, caso de la sangre, aunque no emita luz sí que la absorbe, con lo que al enfocar las luces sobre una superficie, si hay sangre esta evidencia aparecerá como una mancha oscura.

Además de las luces forenses, existen una serie de *pruebas* o *ensayos químicos*, consistentes en reacciones de cierto grado de especificidad, en las que intervienen determinados componentes del indicio biológico de que se trate. El componente seleccionado en cada caso es lo que se conoce como *marcador*, y en consecuencia habrá que diseñar una forma de detectarlo. Estas pruebas químicas, que se empezaron a emplear ya en el siglo XIX, son interesantes sobre todo para la sangre, saliva o semen, si bien hay que tener en cuenta que son sólo orientativas, por lo que con ellas no se podrá determinar con plena seguridad la naturaleza del indicio, aunque sí dan una buena idea del mismo. Sin embargo, son rápidas y sencillas y además frecuentemente vienen preparadas o casi preparadas en kits transportables, todo lo cual constituye una enorme ventaja en la búsqueda de estas evidencias. Más adelante, al estudiar cada fluido biológico, se estudiarán con más detalle las pruebas químicas correspondientes a cada uno.

Por otra parte, hay otras características de los restos biológicos que muchas veces aportan asimismo importantes datos sobre el delito investigado. Tales son, por ejemplo, el *aspecto, tamaño o ubicación* de las manchas de sangre halladas en la escena del crimen o la distribución de sus salpicaduras (si las hubiera). Todo ello puede ser muy útil para reconstruir los hechos acaecidos. En este sentido, mediante el aspecto de una gota de sangre se puede determinar su punto de origen (incluso, saber si hay más de un punto de origen) o la forma en que salió del cuerpo. Por ejemplo, las manchas de proyección tienen forma de gotas o salpicaduras, mientras que si la forma es de regueros o charcos, corresponden a manchas de escurrimiento y se presentan allí donde el cuerpo perdió mayor volumen de sangre (figura 8.1). Si aparecen muchas gotas juntas y son grandes e irregulares, es que salió a borbotones, indicando que se debió a la ruptura de una arteria (figura de la portada del tema); si una mancha de sangre es una gota circular, es que cayó perpendicularmente, y si es alargada, su longitud será proporcional al ángulo de impacto en su caída (figura 8.1).



FIGURA 8.1. Gotas de sangre: circular, por caída perpendicular; alargada, por caída oblicua, y formando un reguero.

8.2.2. Recogida y transporte

Una vez localizados los indicios, se recogerán y transportarán al laboratorio forense para completar su estudio. Ante todo, se debe tener mucho cuidado con el grado de humedad de las manchas de fluidos biológicos, pues en caso de estar húmedos podrían resultar un excelente campo de cultivo de microorganismos que interferirían en las pruebas de ADN a llevar a cabo. Por esto nunca se guardarán en recipientes de plástico, pues mantendrían los restos de agua que pudieran tener las evidencias, sino en recipientes de papel (bolsas, sobres, etc.). En cualquier caso, si un indicio biológico está húmedo, deberá secarse en cuanto llegue al laboratorio.

Aparte de la humedad, los restos biológicos son muy sensibles a los demás factores ambientales, por lo que las muestras que con ellos hubieran podido prepararse se guardarán lo más rápidamente posible. Con este objetivo y también con el de perder el mínimo de evidencias, se deben contemplar unas reglas para su recogida y transporte:

- Si se sabe o se sospecha que existe una evidencia biológica en un objeto (sangre en una camisa, saliva en un vaso, etc.), dicho objeto se transportará entero, convenientemente guardado.
- Si esto no fuera posible (por ejemplo, unas manchas de sangre sobre una pared), se recortarán las zonas donde se encuentren las evidencias, adjuntando asimismo una muestra del soporte sin manchas, que se empleará como control.

- En casos de evidencias depositadas sobre una superficie no absorbente (así, sangre sobre un cristal), se raspará cuidadosamente con un bisturí para obtener la muestra, recogiénose los fragmentos en un papel y guardando todo ello en un sobre.
- Cuando se trata de evidencias en estado líquido o sólido, se frotará muy suavemente con un hisopo previamente humedecido en agua destilada (o a veces en suero fisiológico), con lo que parte de los restos biológicos se transferirá al hisopo. Este procedimiento puede también emplearse para manchas sobre un soporte que no pueda ser transportado.

Todo el material que se utilice para extraer la evidencia, sea un bisturí, un hisopo, etc. deben estar debidamente esterilizados, para evitar la contaminación de las muestras. Una vez recogidos y envasados los indicios biológicos, se procederá a su traslado al laboratorio lo más rápidamente posible.

■ PRUEBAS QUÍMICAS ■

Las pruebas químicas a realizar, tanto las de carácter orientativo como otras más precisas, vienen determinadas por la naturaleza del indicio biológico. Por tanto, en cada uno de ellos se examinará cuál es su composición, desde el punto de vista químico y biológico.

8.3. LA SANGRE EN CRIMINOLOGÍA: SEROLOGÍA FORENSE

Como ya se ha dicho, la sangre es uno de las evidencias que más aparecen en la escena del crimen. Los primeros testimonios en los que se menciona su estudio en relación a la investigación de determinados delitos se recogen ya en algunos textos chinos del siglo XII. Pero no será hasta el siglo XX cuando los grandes avances científicos abran nuevas rutas para el análisis de la sangre, lo que propició asimismo la investigación forense de estos indicios biológicos.

El estudio de la sangre en cuanto a determinar la presencia en ella de anticuerpos y otros componentes biológicos da lugar a lo que se conoce como

serología, la cual referida a su perspectiva concreta de investigación criminal se denomina *serología forense*. Etimológicamente la palabra serología significa «estudio del suero». En consecuencia, para saber qué es el suero, qué es un anticuerpo y cuáles son los otros componentes de la sangre, hay que atender primeramente a su composición desde el punto de vista biológico y químico.

8.4. COMPOSICIÓN DE LA SANGRE

La sangre es un tejido del organismo que tiene la particularidad de presentarse como fluido biológico y que actúa como sistema de transporte. En el caso particular de los seres humanos representa alrededor del 7,7 % de su peso. La composición de la sangre es muy compleja, estando formada por una mezcla de células, proteínas, enzimas, compuestos orgánicos, sales inorgánicas y agua. La parte fluida es el *plasma*, un líquido amarillento constituido por un 90% de agua, en el que las proteínas, las sustancias orgánicas y los iones inorgánicos están disueltos, mientras que las células, parte sólida de la sangre, se hallan suspendidas en él. El plasma constituye el 55% del volumen de la sangre y las células (que se pueden separar por centrifugación), el 45% restante, aproximadamente. El pH del plasma es casi neutro, 7,4 (pH fisiológico), y se mantiene en ese valor mediante un sistema regulador de carbonato ($\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{HCO}_3^-$).

Las proteínas de la sangre pertenecen a distintos tipos, en los que se incluyen albúminas, globulinas y enzimas. Dentro de las globulinas se encuentra el *fibrinógeno*, proteína fibrilar que por la acción de una enzima llamada trombina se transforma en *fibrina*, otra proteína también fibrilar, capaz de polimerizarse y entrecruzarse. Debido a esta propiedad de la fibrina la sangre se coagula. La *coagulación* es un proceso mediante el cual, cuando se produce una herida, la sangre comienza a perder su liquidez, formando coágulos, pasando a una especie de gel que termina por solidificar. Se limita de esta manera la pérdida de sangre que se produciría a través de esa herida. Un coágulo es, por lo tanto, una red tridimensional de fibrina que puede atrapar entre sus fibras a otras proteínas, agua, sales y hasta células sanguíneas.

Cuando se produce la coagulación de la sangre, si se separa el material coagulado, queda un líquido amarillo pálido llamado *suero*, el cual como se verá seguidamente tiene un gran protagonismo en muchos análisis de sangre.

Lo que en definitiva ocurre en la **coagulación** es que el fibrinógeno, soluble en el plasma, experimenta un cambio químico que le *convierte en insoluble*. Ello se debe a que pasa a fibrina, la cual forma esos enormes agregados macromoleculares en forma de redes tridimensionales que ya no se pueden disolver en la solución salina del plasma.

8.4.1. Células de la sangre

Las células de la sangre son de tres tipos: glóbulos rojos o eritrocitos, glóbulos blancos o leucocitos y plaquetas. Los *glóbulos rojos* son células que no tienen núcleo y contienen un pigmento, la hemoglobina, responsable del color rojo de la sangre. Su misión en el organismo es transportar el oxígeno de los pulmones a los distintos tejidos del organismo y, a la inversa, transportar el dióxido de carbono de éstos últimos a los pulmones. Los *glóbulos blancos* son células con núcleo y su papel está muy relacionado con el sistema inmunológico de defensa del organismo. Contienen, pues, ADN nuclear en forma de un complejo proteína-ADN llamado cromatina, la cual a su vez está compuesta de unidades, los cromosomas (de lo que se volverá a tratar después). En cuanto a las *plaquetas*, son grandes células que como los eritrocitos carecen de núcleo, y tienen un papel importante en el proceso de coagulación.

8.4.2. Antígenos y anticuerpos

Expresado de una forma general, **antígenos** son aquellas sustancias (usualmente proteínas o polisacáridos) capaces de estimular en el organismo una respuesta inmunológica. En la superficie de las células de los glóbulos rojos existe un buen número de antígenos, unas estructuras químicas características responsables de los rasgos que determinan el tipo de sangre de un individuo. De todos los antígenos conviene resaltar los que se designan con las letras A, B y D (éste último relacionado con el factor Rh de la sangre). Por otra parte, los antígenos de la sangre se agrupan en distintos sistemas, de los que se han encontrado más de 15, siendo los más importantes los que se designan como sistema A-B-0 (0: cero) y como sistema Rh.

Por otra parte, en el suero existen los **anticuerpos**, proteínas pertenecientes a la clase de las globulinas y que son capaces de reconocer determi-

nados grupos químicos específicos que puedan encontrarse en la sangre y, además, de unirse a ellos. De esta manera «marcan» materiales extraños al organismo como ajenos a éste, con lo que las células del sistema inmunológico podrán destruirlos.

Hay un principio fundamental en serología: **para cada antígeno existe un anticuerpo específico**. Por ejemplo, para el antígeno A existe un anticuerpo específico con el que reaccionará (pero no reaccionará con otros anticuerpos), por lo que se conoce como anti-A; de forma análoga, el anticuerpo específico del antígeno B será el anti-B, etc.

8.4.3. Grupos sanguíneos

En esa *reacción antígeno-anticuerpo* se basa precisamente el procedimiento para determinar el grupo de sangre de un individuo, según el sistema de antígenos AB0, descubierto en 1901 por el patólogo y biólogo austriaco **Karl Landsteiner** (1868-1943), por lo que se le concedió el Premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1930. Refiriéndonos así a los antígenos A y B, cada individuo recibirá por herencia un precursor de éstos, uno del padre y otro de la madre, que por acción de una enzima se transformarán en el antígeno A o en el B. Pero puede ocurrir que no se transformen en ninguno de ellos, con lo que faltarían en la sangre del individuo en cuestión, designándose en este caso como 0. Atendiendo al número de combinaciones posibles de pares de alelos resultarían los distintos tipos de sangre o *grupos sanguíneos* (tabla 8.1):

TABLA 8.1. Grupos sanguíneos en función de los antígenos A y B

Alelos	AA	A0	BB	B0	AB	00
Grupos sanguíneos	A	A	B	B	AB	0
Antígenos en glóbulos rojos	A		B		A y B	Ni A ni B
Anticuerpos en suero	Anti-B		Anti-A		Ni anti-A ni anti-B	Anti-A y Anti-B

Según el sistema AB0, los tipos resultantes de sangre o *grupos sanguíneos* son, pues, cuatro, ya que como puede observarse en esta tabla,

tanto la combinación AA como la A0 dan lugar al mismo tipo de sangre (tipo A) y, de forma análoga las combinaciones BB y B0 dan el tipo B. En la superficie de las células de glóbulos rojos de cada tipo de sangre existirán los antígenos correspondientes. En el tipo A, los antígenos A; en el tipo B, los antígenos B; en el tipo AB habrá ambos antígenos, y en el tipo 0, ninguno.

¿Qué ocurre con el anticuerpo del suero de cada tipo de sangre? Se ha comprobado que, como se representa en la Tabla 8.1, en el suero del tipo A, aparecen sólo los anticuerpos anti-B, en el tipo B, sólo los anti-A, etc. Hay que recordar que **los antígenos A sólo reaccionan con los anti-A, y los antígenos B reaccionan sólo con los anti-B**. Por tanto, no reaccionarán con los anti-B ni con los anti-A, respectivamente. Esto hace posible la coexistencia, en la sangre normal, de determinados antígenos y anticuerpos.

Pero supongamos que un individuo de sangre tipo A recibe sangre del tipo B. ¿Qué ocurrirá? Que ahora están también presentes anticuerpos anti-A, a los que ya sí se unirán los antígenos A de la sangre original. Es decir, en este caso se ha producido una reacción antígeno-anticuerpo, que da lugar a un gran entrecruzamiento de las células de glóbulos rojos, que forman como un amasijo, ocurriendo lo que se llama *aglutinación*. Esto es lo que ocurría muy frecuentemente en las transfusiones de sangre antes de conocerse la existencia de distintos tipos de ésta, lo que tenía muchas veces fatales consecuencias para el receptor, ya que las transfusiones entre grupos incompatibles provocan una reacción inmunológica con graves trastornos, llegando incluso a la muerte.

Sin embargo, no debe confundirse el proceso de *aglutinación* de la sangre con el de *coagulación*, tratado anteriormente.

La reacción antígeno-anticuerpo ha servido, por otra parte, no sólo para determinar el grupo de sangre de un individuo (como se especificará después, sección 8.4.3) sino que también es el fundamento de muchas pruebas de la sangre con fines clínicos y que después han tenido su aplicación en criminología. Se trata de un tipo de reacciones bioquímicas que se conocen como *pruebas inmunológicas*, de las que se tratará más detalladamente en la sección 8.5.2.

8.5. ANÁLISIS FORENSE DE LA SANGRE

Cuando aparecen manchas u otros restos de sangre en la escena del crimen, son tres las preguntas que debe hacerse el investigador forense. Primero, esa evidencia ¿se trata realmente de sangre? Después, y en caso de ser sangre, ¿proviene de un ser humano o de un animal? Y, por último, si resulta ser sangre humana, ¿pertenece a una persona en particular? Seguidamente estudiaremos los procedimientos más importantes por los que el criminalista se vale para encontrar respuesta a esas preguntas.

8.5.1. ¿Es la evidencia realmente de sangre?

A veces lo que parece sangre podría ser en realidad una mancha de pintura o de tinta e, incluso, de un jugo de origen vegetal. Es decir, hay que dar respuesta a la primera de esas preguntas para saber si la evidencia es o no realmente sangre, para lo cual ante todo se han de llevar a cabo una serie de pruebas químicas preliminares. Son pruebas bastantes rápidas y sencillas, por lo que muchas de ellas se realizan en la misma escena del suceso. No obstante, como ya se ha comentado, tienen el inconveniente de ser sólo de carácter orientativo.

- **Pruebas de color**

Éstas son las pruebas más tradicionales en las que se aprovecha una propiedad de la hemoglobina, la de catalizar a través del hierro presente en su molécula la oxidación de ciertos materiales por la acción de un peróxido.

El marcador de la sangre sería, pues, la hemoglobina. Para detectar su presencia se empleó la característica de muchos tintes (ver tema 3) de que además de poder existir en forma oxidada y en forma reducida, la forma oxidada es coloreada mientras que la reducida es incolora. Se trata, pues, de *pruebas de color*. Tal es el caso del tinte llamado verde malaquita: si se añade una gota de una disolución de su forma reducida, *leuco verde malaquita*, a una mancha sospechosa de ser sangre, no se observa ningún cambio de color; pero si seguidamente se agrega una gota de peróxido de hidrógeno, aparece una coloración de un **verde azulado**, correspondiente a la forma oxidada del tinte, es decir, el verde malaquita (figura 8.2). Se conoce como prueba de leuco verde malaquita.

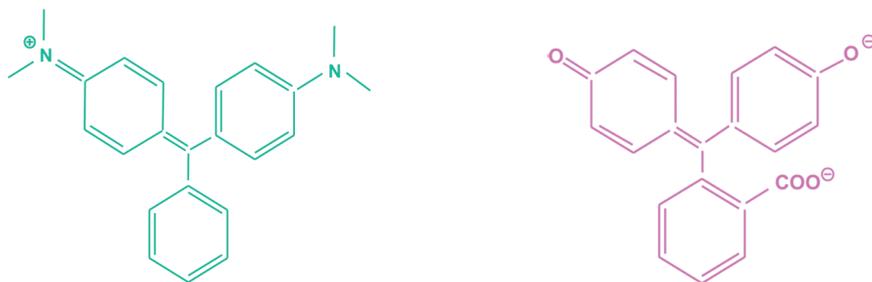


FIGURA 8.2. Estructura del verde de malaquita y de la fenolftaleína (formas iónicas).

Durante mucho tiempo se empleó la *bencidina* (4,4'-diaminodifenilo), que por oxidación da un producto de **color azul**, pero al conocerse su carácter cancerígeno ha sido sustituida por otros compuestos. Tal es el tinte fenolftaleína, cuya forma oxidada (figura 8.2) tiene un color **rosa fucsia** característico, pero la forma reducida es incolora. Esta prueba, en la que se emplea *fenolftaleína reducida* (fenolftalina, obtenida previamente por reducción de la fenolftaleína con polvo de zinc) se conoce también como prueba o *test de Kastle-Meyer* (KM).

En definitiva, se necesita la presencia de un peróxido para realizar este tipo de pruebas, ya que gracias a éste se produce la oxidación del tinte, catalizada por el hierro de la hemoglobina de la sangre. Además, las pruebas deben ser llevadas a cabo en cada caso en el medio adecuado (ácido o básico) para favorecer la aparición del color.

Sin embargo, algunos productos vegetales, como el rábano, el brócoli o la patata, contienen peroxidasa, enzimas que catalizan la ruptura de los peróxidos presentes en el organismo, oxidándolos hasta oxígeno. Por ello también darían positivo en estos tests, pero como su presencia en la escena del crimen no es muy frecuente, esa interferencia podría descartarse.

- **Pruebas de luminiscencia**

En la actualidad se emplea mucho más la prueba realizada con *luminol*, un derivado del ácido ftálico (3-amino ftalilhidrazida), compuesto sólido verdoso que tiene la particularidad de dar una reacción de *quimioluminiscencia* (producción de luz a partir de una reacción química, ver en tema 3), con peróxidos y en presencia de un complejo de hierro como catalizador.

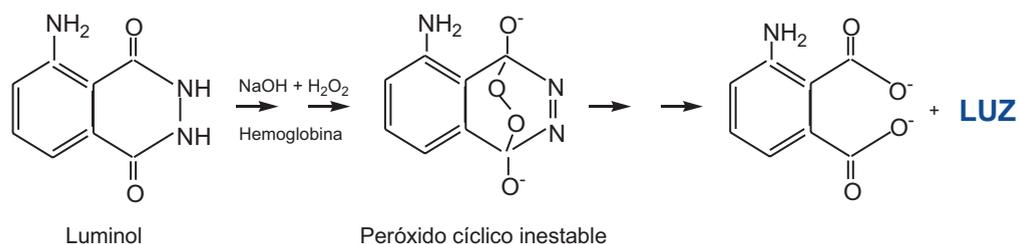


FIGURA 8.3. Reacciones implicadas en la prueba del luminol (no se han representado los pasos intermedios).

La reacción del luminol conlleva la utilización de tres reactivos: el luminol propiamente dicho; un compuesto básico inorgánico (como NaOH), cuyo papel es permitir que el luminol se encuentre como dianión, y peróxido de hidrógeno. La función de este último es proporcionar una fuente de oxígeno, el cual formará con el luminol un peróxido cíclico muy inestable, que se estabilizará emitiendo energía en forma de **luz de color azul** (figura 8.3). No obstante, la reacción de descomposición del H₂O₂ es lenta pero el Fe²⁺ de la hemoglobina de la sangre la cataliza.

La presencia de sangre se detecta así, mediante una luz azul, visible mejor observando el indicio en la oscuridad (figura 8.4).



FIGURA 8.4. Con luminol se ha comprobado que estas huellas de pisadas eran de sangre.

El luminol es sumamente sensible, siendo capaz de detectar manchas de sangre aunque estén muy diluidas. Esto permite investigar, incluso, la posi-

ble presencia de trazas de sangre en superficies grandes (alfombras, suelos, interior de un coche, etc.), simplemente utilizando un spray para aplicar el reactivo sobre ellas y observando después en la oscuridad si aparece esa luz. Tiene también la ventaja de no contaminar la muestra ante un posible análisis posterior de ADN.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los hipocloritos, presentes en muchos limpiadores (la lejía, por ejemplo), dan también esta reacción, debido a su fuerte carácter oxidante, y aunque la luminosidad que producen es más intensa y brillante que la de la sangre, podrían dar lugar a *falsos positivos* en tejidos lavados con estos productos de limpieza. También cabe la posibilidad de obtener *falsos negativos* en estas pruebas en el caso de que con anterioridad a su análisis el sospechoso, por ejemplo, hubiera intentado eliminar la mancha de sangre lavando la prenda con un detergente con oxígeno activo, ya que éste habría reaccionado entonces con la sangre del indicio, anulándola para esta prueba.

- **Ensayos cristalográficos**

Otras pruebas se basan en que al añadir determinados reactivos a la sangre, éstos dan con la hemoglobina unos derivados que forman microcristales característicos. Algunos de estos tests se emplean bastante en criminología, si bien son menos sensibles que los anteriores.

8.5.2. ¿Es sangre humana o sangre animal?

Una vez que el forense sabe que la mancha es de sangre, tiene que dar respuesta a esta segunda cuestión. En este sentido la prueba por excelencia es el *test de precipitina*, que consiste en una prueba inmunológica. Las *pruebas inmunológicas* tienen su fundamento en el siguiente fenómeno: cuando en la sangre de un animal aparece un material extraño, con sus correspondientes antígenos también extraños al animal, la sangre de éste «fabrica» anticuerpos específicos de esos antígenos. De esta manera, estos nuevos anticuerpos se unen a los antígenos extraños (recordemos la reacción antígeno-anticuerpo), a fin de neutralizar sus efectos en el organismo. Así, el animal quedará inmune contra ese material extraño. Es decir, **se ha inducido en la sangre del animal la producción de unos anticuerpos determinados**, que podrán emplearse en distintos ensayos.

Veamos cuál es el procedimiento en el caso concreto del test de la precipitina:

Primeramente se inyecta sangre humana en un animal, que suele ser un conejo o un ratón (figura 8.5). Ante ese elemento extraño (la sangre humana) el animal forma anticuerpos específicos, que se encuentran en su suero sanguíneo. Después, se extrae sangre del animal y se aísla el suero, ya que contiene anticuerpos capaces de reaccionar de forma específica con antígenos humanos. Por ello, se le denomina *antisuero humano*.

En definitiva, si una muestra de sangre desconocida es humana, al ponerla en contacto con el antisuero humano dará lugar a un precipitado en forma de depósito turbio (de ahí el nombre de «precipitina») por reacción específica de los anticuerpos del antisuero con los antígenos de esa sangre.

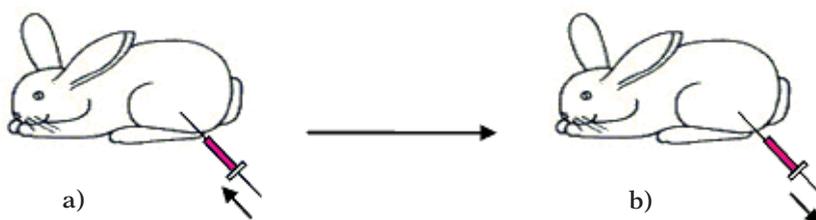


FIGURA 8.5. Preparación de antisuero humano para la prueba de la precipitina: a) se inyecta sangre humana; b) se extrae sangre del conejo.

En conclusión, si esta prueba es positiva (formación de un precipitado turbio) resultará que la sangre es humana.

Hay varias técnicas para realizar esta prueba. Una de ellas consiste en colocar en un capilar primeramente el antisuero procedente del conejo y en la capa superior la muestra de sangre a estudiar. Si ésta es humana, aparecerá en la interfase de los dos líquidos un denso anillo debido a la banda de precipitina. Otra técnica muy empleada también es la de difusión en gel, en la que se emplea una placa reactiva, es decir, una placa cubierta con una capa de un gel (por ejemplo, agar), con dos huecos o pocillos uno frente al otro. En un pocillo se coloca una disolución de la sangre problema y en el otro una disolución con el antisuero. Las dos disoluciones se van difundien-

do, moviéndose una hacia la otra, y al encontrarse, si la sangre es humana, se forma una línea de precipitina. Este proceso se puede acelerar aplicando un campo eléctrico, es decir, mediante *electroforesis* (ver en tema 2).

La prueba de la precipitina es sumamente sensible, de tal manera que detecta la sangre en muy pequeñas cantidades o en muestras muy diluidas (incluso, cuando se ha intentado eliminar la sangre lavando con agua). Asimismo tiene efecto en restos de sangre seca, aunque sean muy antiguos; tanto es así que ha dado positivo en tejidos humanos extraídos de momias egipcias.

Este tipo de pruebas inmunológicas, además de emplearse en el análisis de fluidos corporales, tiene también aplicación para detectar en orina muchas drogas de abuso.

8.5.3. ¿A quién pertenece la sangre?

El objetivo óptimo al que tiende todo criminalista es individualizar una evidencia, es decir, determinar con seguridad a quién pertenece. Pero este objetivo, lamentablemente, no siempre se alcanza y, en cualquier caso, requiere tiempo y grandes esfuerzos. En cuanto a la sangre, hoy en día esto se consigue mediante las técnicas de ADN. No obstante, hasta los años 90 del pasado siglo, en que estas técnicas fueron descubiertas y puestas a punto para su empleo en ciencia forense, se utilizaron otros métodos que aún hoy en día se siguen empleando. Además de mucho menos caros, tienen la ventaja de ser rápidos y sencillos, por lo que casi todos ellos se siguen empleando. Y aunque no son tan seguros, sirven para descartar buen número de sospechosos en el caso de que no coincidan los resultados del indicio con los datos de la sangre de aquéllos.

El método más empleado es averiguar el *grupo de sangre* al que pertenece el indicio. El sistema tradicional es el ABO, del que ya se ha tratado anteriormente (sección 8.4.3). Para determinar el grupo de sangre de un indicio, se hacen pruebas con antisueros A y B. La sangre del grupo A se aglutina con el antisuero A; la del grupo B se aglutina con el antisuero B; la del grupo AB se aglutina tanto con el antisuero A como con el antisuero B, y la del grupo 0, no se aglutina con ninguno de ellos. Por tanto, se necesita tan sólo disponer de dos antisueros, el A y el B, lo cual es muy fácil, ya que existen kits comerciales que los contienen.

La distribución en la población de esos cuatro grupos de sangre varía con la raza y el lugar geográfico, lo cual viene proporcionado por estudios estadísticos. Por ejemplo, en Estados Unidos y en la población de raza blanca, la distribución es: grupo 0, un 43%; grupo A, un 42%; grupo B, un 12%, y grupo AB, un 3%.

No obstante, además de los antígenos A y B, se han descubierto en la sangre otras sustancias cuya presencia varía de unas muestras de sangre a otras (no hay más que recordar de nuevo el factor Rh), muchas de las cuales han sido estudiadas con el fin de poder discriminar más entre la sangre de distintos individuos. Entre esas sustancias las más interesantes desde el punto de vista forense son determinadas *enzimas polimórficas*, llamadas así porque cada una puede existir en diferentes formas moleculares que tienen la misma actividad biológica (*iso-enzimas*).

Una de las enzimas polimórficas que más se emplea como marcador en los estudios de serología forense es la llamada **PGM** (fosfoglucomutasa), que se encuentra en la sangre y en otros fluidos corporales. De ella se han hallado tres tipos o iso-enzimas, PGM 1, PGM 2 y PGM 2-1, que se pueden separar entre sí por electroforesis. Se da el caso de que no todos los seres humanos tienen el mismo tipo de PGM. Así, en estudios realizados en Estados Unidos se encontró que en la población de raza blanca estas tres iso-enzimas están distribuidas de la forma siguiente: la PGM 1 en un 58%, la PGM 2-1 en un 38% y la PGM 2 en un 6%, aproximadamente.

Se han hallado además en la sangre *proteínas polimórficas* que se han empleado asimismo como nuevos marcadores con el objetivo de ir avanzando en la individualización de este indicio biológico.

En definitiva, cuanto mayor es el número de los factores (antígenos, enzimas y proteínas) que se analicen en una muestra de sangre, más pequeña será la probabilidad de que se pueda encontrar otra muestra con la misma composición. Hay que tener en cuenta que, como regla general, la probabilidad de coincidencia viene dada por el producto de la distribución (o de la frecuencia, en tantos por uno) de cada factor en la población. Es lo que se conoce en estadística como «regla del producto».

Regla del producto: La probabilidad de coincidencia de un cierto número de sucesos independientes, viene dada por el producto de la probabilidad de cada uno de esos sucesos.

Por ejemplo, si en el análisis de una muestra de sangre de una persona blanca (ver su distribución en esta misma sección) se encuentra que su grupo sanguíneo es AB y que contiene la iso-enzima PGM 2-1, la probabilidad de encontrar otra persona con sangre de esas características será: $0,03 \times 0,38 = 0,01$, o sea, del 1%. En consecuencia, se ha avanzado en su discriminación, o lo que es lo mismo, en la individualización del indicio.

De esta manera, si se comparan las características de la evidencia de sangre con la de la sangre de los sospechosos, será posible descartar aquéllos que no coincidan en todos los factores analizados.

8.6. EL SEMEN EN CRIMINOLOGÍA

En las agresiones sexuales frecuentemente aparecen indicios de este fluido biológico, bien como manchas en sábanas o en prendas de ropa, por ejemplo, bien como tal fluido en la vagina u otras partes del cuerpo de la víctima e, incluso, en preservativos.

Como siempre, se estudiará primero la composición del semen como clave para encontrar los métodos de detectarlo y analizarlo.

8.6.1. Composición del semen

El semen o esperma es un fluido corporal de aspecto viscoso y blanquecino que es expulsado a través de la uretra durante la eyaculación. Está constituido por células, los *espermatozoides*, suspendidos en una fase líquida, el fluido o *plasma seminal*, que contiene gran cantidad de sustancias, tales como metales (zinc, calcio, sodio y potasio), ácidos orgánicos (cítrico y ascórbico), algunas enzimas (como la fibrinolisina y la fosfatasa ácida y alcalina), proteínas, hormonas, fósforo, flavinas, prostaglandinas, colina, albúmina, alfa, gamma y beta globulinas, lecitina, ácidos grasos, antígeno soluble de grupo sanguíneo..., siendo además rico en fructosa. Los espermatozoides se producen en los testículos, mientras que el plasma seminal se forma por el aporte de distintos órganos y glándulas, entre los que se encuentran los testículos y la próstata.

La estructura del espermatozoide humano es muy característica (figura 8.6), distinguiéndose claramente tres partes: las que se conocen como cabeza y cola (flagelo) en los extremos, y entre ellas una pieza central. Los espermatozoides se mueven, nadando en el líquido seminal y en los fluidos vaginales mediante el movimiento del flagelo, impulsado por la pieza central que actúa a modo de motor.

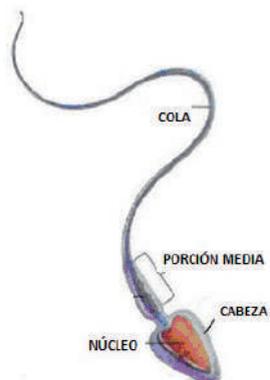


FIGURA 8.6. Estructura de un espermatozoide.

El espermatozoide es la célula sexual masculina, o gameto masculino, por lo que en los seres humanos sólo contiene 23 cromosomas, es decir, la mitad de los que tienen las células normales (46). Estos 23 cromosomas los transmite al óvulo o gameto femenino cuando su núcleo se fusiona con el de éste último en el acto de la fecundación. A pesar de contener un número bajo de cromosomas, dada la elevada densidad del núcleo dentro de esta célula sexual, el resultado es que los espermatozoides son muy ricos en ADN. Por otra parte, refiriéndonos siempre a la especie humana, hay que considerar asimismo que en un mililitro de semen existen por término medio 100 millones de espermatozoides y que cada eyaculación de un varón normal es de 2,5 a 6 mililitros.

8.6.2. Análisis forense del semen

En criminología el estudio del semen requiere llevar a cabo dos etapas: en la primera, localizarlo, y en la segunda, identificarlo de forma inequívoca. A éstas se añadiría una tercera, como siempre ocurre en los indicios biológicos: identificar el sujeto de donde proviene este semen, es decir, individualizarlo.

Localización del semen

El primer paso es localizar el semen o sus manchas en la escena del crimen o en objetos que, fuera de ella, pudieran estar relacionados con el caso investigado. En general, las manchas de semen tienen un aspecto característico, que hacen más fácil su detección por simple observación visual, con ayuda de luces forenses. Además, ciertos componentes de este fluido corporal, como son las flavinas, tienen propiedades luminiscentes, con lo que se puede detectar el semen con luz ultravioleta (figura 8.7).

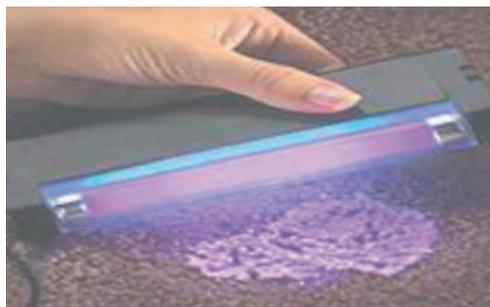


FIGURA 8.7. Localización con luz UV de una mancha de semen sobre una alfombra.

No obstante, esta tarea se puede complicar debido a que haya muchos objetos a investigar (generalmente prendas de vestir) o a su gran superficie (como sábanas o alfombras). Además, se hace aún más difícil si las manchas contienen muy poco semen o si se han lavado, tratando de eliminarlas.

Identificación del semen

Los métodos más usuales para su identificación son los siguientes:

- **Métodos ópticos: microscopía**

Dada la alta concentración de espermatozoides en el semen y su aspecto característico, se pueden detectar fácilmente en el microscopio. Previamente ha de prepararse la muestra, para lo cual hay varios procedimientos. Así, se corta un trozo del material donde esté la mancha y se introduce en un pequeño volumen de agua destilada o de suero fisiológico y, rápidamente, se agita. De esta forma se extraen parte de los espermatozoides, que pasan a la fase líquida, de la que se toma una gota para ser observada al micros-

copio. No obstante, es conveniente teñir los espermatozoides extraídos con un colorante adecuado (como azul de metileno-fucsina).

Es importante tener presente que esta prueba puede dar lugar a *falsos negativos*, existiendo varias razones para ello. Así, está el hecho de que el semen puede no contener espermatozoides (caso de las vasectomías, de ciertas anomalías congénitas o de determinadas enfermedades) o existir en una concentración sumamente baja y, por tanto, casi imposibles de detectar. Por otra parte, hay que considerar que los espermatozoides están fuertemente unidos a la ropa y que además son muy frágiles una vez que la mancha se ha secado, con lo que simplemente por el roce se desintegran. Por todo ello, puede afirmarse que si hay espermatozoides es que hay semen, pero no puede decirse lo contrario. En consecuencia, se han diseñado otros métodos de detección.

- **Prueba de la fosfatasa ácida**

Ésta es una enzima producida por la próstata y se halla presente en el semen en muy alta concentración. Por ello es muy útil su determinación cuando no se han observado espermatozoides en una mancha sospechosa y también en los casos en que es necesario localizar el semen en grandes superficies de tejidos o en muchas prendas de ropa. En estos casos el procedimiento a seguir es humedecer un papel de filtro con agua destilada y frotarlo suavemente sobre la superficie a estudiar. Si existe semen, la fosfatasa ácida que contiene se transferirá al papel de filtro. Para detectar la presencia de esta enzima se recurre a una *prueba de color*, ya que en una disolución ácida de alfa-naftilfosfato de sodio y el tinte designado como «Fast Blue B» produce una fuerte **coloración púrpura** (debida al complejo formado). Además la intensidad del color producido es proporcional a la cantidad de fosfata ácida presente, es decir, es cuantitativa. Lo cual es importante en este caso, ya que también los fluidos vaginales contienen esta enzima, si bien en mucha menor concentración que el semen.

En los laboratorios suelen existir kits con este reactivo ya preparado, generalmente en unas tiras, lo que facilita este análisis. De esta manera, un hisopo humedecido se pone en contacto con la mancha y después se coloca sobre la tira reactiva, con lo que si hay semen aparecerá el color púrpura. No obstante, hay que resaltar el *carácter sólo orientativo* de esta prueba.

- **Ensayos cristalográficos**

La colina es otra sustancia presente en el semen (producida en los vehículos seminales), que con determinados reactivos origina derivados sólidos cristalinos característicos, que se pueden observar y estudiar en un microscopio. Tal es su reacción con yodo, que da lugar a unos cristales de yoduro de colina, en forma de agujas de color ámbar (*test de Florence*). Existen bastantes pruebas similares, pero ninguna resulta demasiado específica.

- **Pruebas inmunológicas con la proteína P30**

La P30, descubierta hacia 1970, es una proteína que se encuentra en el líquido seminal. Con esta abreviatura es como comúnmente se conoce al *antígeno prostático específico (PSA)*, que como su nombre indica se produce en la próstata y que es exclusivo del semen. Por tanto, las pruebas que detecten esta proteína tienen un alto grado de especificidad.

Se trata de pruebas inmunológicas, en las que esta proteína se toma como marcador, por lo que los pasos a llevar a cabo son muy similares a los que se expusieron en el caso de la precipitina (sección 8.4.2). De esta manera, se inyecta la proteína P30 en un conejo para provocar la formación de anticuerpos, y después se extrae la sangre del animal inmunizado para obtener el suero con los anticuerpos de la proteína (antisuero-P30). Así, ya podrá emplearse frente a muestras de las que se sospecha puedan ser de semen. Para llevar a cabo esta prueba se utilizan varios métodos. El más tradicional es mediante electroforesis (como en la precipitina), empleando también una placa cubierta de gel con dos pocillos enfrentados, uno con el antisuero-P30 y el otro con la muestra a analizar. Si en ésta hay semen, aparece una línea claramente visible entre los dos pocillos.

Esta es una de los mejores procedimientos para asegurar, si no se observan espermatozoides, que la muestra sospechosa es de semen.

Individualización del semen

Con restos de semen se puede determinar también el grupo sanguíneo, ya que los antígenos necesarios para su estudio se encuentran en este fluido corporal de la mayoría de los hombres. No obstante, para la individualización inequívoca, hay que acudir a técnicas de ADN.

8.7. OTROS FLUIDOS CORPORALES

Además de sangre y semen, que son como ya se ha dicho los fluidos corporales que con más frecuencia aparecen en determinados delitos como evidencia, existen otros que son también objeto de estudio en los laboratorios forenses. Tales son saliva, orina, sudor, lágrimas, secreciones vaginales, de origen obstétrico (meconio, líquido amniótico, leche, etc.), pus, moco, materias fecales, vómito, etc. Entre ellos, la saliva es común a muchos tipos de delitos, por lo que se expondrá a continuación una de las pruebas más concluyentes y sencillas de demostrar su presencia.

8.7.1. Pruebas químicas para la saliva

La saliva es un fluido segregado por las glándulas salivares que se encuentran en la boca. El fluido salival está constituido mayormente por agua y una serie de componentes, entre los que destacan la mucina y la amilasa. La *amilasa* es una enzima cuyo papel en la saliva es hidrolizar el almidón, facilitando así la digestión de los alimentos que contengan este producto. Por esta función y por hallarse en la saliva en una elevada concentración, se ha elegido esta enzima como marcador para detectar la presencia de la saliva.

Se aprovecha una reacción muy clásica entre el almidón y el yodo, que produce una fuerte coloración de un **azul intenso**. Para esta prueba se prepara una muestra partiendo de la mancha o del objeto de los que se sospecha contengan saliva, y dicha muestra se coloca en una solución de almidón, a la que se añade otra de un yoduro. En esta prueba hay que tener en cuenta que si aparece esa coloración, el resultado sería negativo (es decir, no habría saliva) ya que no existiría la amilasa, por lo que el almidón no habría sido destruido, pudiendo así reaccionar con el yodo. En caso de haber saliva, la amilasa que contiene hidrolizaría al almidón, con lo que la reacción no tendría lugar y no se produciría el cambio de color. Es decir, la *prueba positiva (presencia de saliva) viene indicada por la ausencia del color*.

La reacción es rápida y muy sencilla. Además, la realización de esta prueba viene facilitada por la existencia de kits comerciales con los reactivos ya preparados.

Por otra parte, en la saliva existen también células y, aunque muchas son de bacterias bucales, otras provienen de la superficie interior de las mejillas, por lo que también la saliva constituye una fuente de ADN.

La etapa final del estudio de los fluidos y otros restos biológicos es la *individualización* de los mismos, es decir, adjudicar su origen a un individuo en concreto. En un principio se hacía mediante el análisis de los grupos sanguíneos, pero tenía grandes limitaciones. La individualización de forma inequívoca a través del estudio de indicios biológicos no fue posible hasta el descubrimiento de la huella genética y las técnicas de análisis del ADN. A ello se dedicará el resto de este tema.

■ ANÁLISIS DE ADN ■

8.8. EL ADN Y LAS CIENCIAS FORENSES

La investigación forense experimentó un impulso trascendental a partir del momento en que se descubrió un método para analizar el ADN. Hasta entonces se habían estudiado distintos tipos de restos biológicos, pero no era posible adjudicarlos inequívocamente a una persona determinada. En este sentido, su valor estriba en que cada individuo tiene un ADN particular, diferente al de los demás. Incluso, en gemelos el ADN de uno y otro pueden presentar diferencias, aunque pequeñas, debido a ligeras mutaciones que se producen, de una manera u otra, durante el desarrollo embrionario. Por eso el ADN se conoce como *huella genética*. De evidencias físicas tan comunes como son sangre, saliva, semen, sudor, distintos tejidos o pelo (en aquellas ocasiones en que la raíz lleva adherido tejido del cuero cabelludo) pueden obtenerse muestras de ADN para llevar a cabo los análisis correspondientes. Incluso, entomólogos forenses han conseguido obtener muestras de ADN humano de los insectos y larvas que invaden los cadáveres.

Estamos acostumbrados a escuchar o leer en los medios de comunicación sobre estos análisis, tanto que pueden parecer algo clásico en la investigación criminal. Sin embargo, es una técnica relativamente reciente pues data del año 1985. El análisis de ADN suele llevarse a cabo por biólogos, bioquímicos o médicos. No obstante, el fundamento y los aspectos

esenciales de las técnicas implicadas deben ser familiares a todo químico que se dedique a la investigación forense. Para ello, es necesario conocer en primer lugar no sólo las características estructurales, sino también el comportamiento bioquímico del ADN.

8.9. EL ADN DESDE EL PUNTO DE VISTA BIOQUÍMICO

ADN son las siglas de **Á**cido **D**esoxirribo**N**ucleico y es así como normalmente se le designa (o también como DNA, del inglés **D**esoxirribo**N**ucleic **A**cid). Junto con el ARN (**Á**cido **R**ibo**N**ucleico) forma el grupo de biomoléculas llamadas *ácidos nucleicos*. Dejando éste último, nos centraremos en el ADN, cuyo papel fundamental en los organismos vivos es el de transmitir toda la información hereditaria de una generación a la siguiente.

Desde el punto de vista simplemente químico el ADN es un polímero, es decir, una larga cadena de gran cantidad de unidades enlazadas entre sí. En este caso cada una de estas unidades es un nucleótido, por lo que el ADN es un *polinucleótido*. Cada *nucleótido* está constituido, a su vez, por una azúcar, una base nitrogenada y un resto de ácido fosfórico:

- *El azúcar*

Se trata de *desoxirribosa* (concretamente, de 2-desoxirribosa), monosacárido de 5 átomos de carbono (es decir, una pentosa), de fórmula $C_5H_{10}O_4$. Es precisamente este azúcar el que marca una de las diferencias fundamentales entre el ADN y el ARN, ya que en éste último el azúcar es la ribosa (figura 8.8).

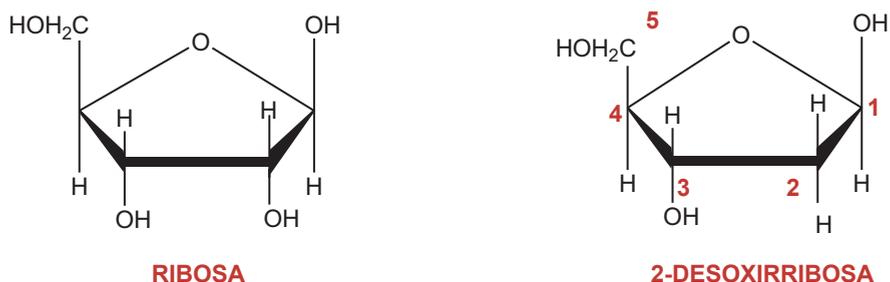


FIGURA 8.8. Estructura de la ribosa y de la 2-desoxirribosa.

- **Las bases nitrogenadas**

Las bases nitrogenadas que entran a formar parte del ADN son cuatro, que se representan abreviadamente por su inicial: *adenina* (A), *timina* (T), *citocina* (C) y *guanina* (G). Todos ellos son compuestos heterocíclicos y aromáticos, con dos o más átomos de nitrógeno como heteroátomos (figura 8.9). Aquí hay otra diferencia con el ARN, ya que en éste las bases nitrogenadas son las mismas, con excepción de la timina, que es sustituida por el uracilo (U).

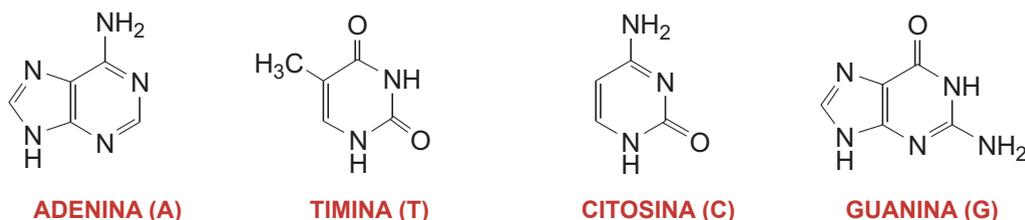


FIGURA 8.9. Bases nitrogenadas integrantes del ADN.

- **El resto fosfórico**

Se trata del grupo fosfato PO_4^{3-} , derivado del ácido fosfórico (H_3PO_4).

8.9.1. Estructura del polinucleótido

Veamos cómo se unen todos esos componentes. El ADN se presenta como una doble cadena (hebras) de nucleótidos. El *soporte* de cada hebra de ADN está constituido por unidades alternas de grupos fosfato y azúcar, que resultan ser así la columna vertebral de cada hebra. Los azúcares se unen entre sí a través de un grupo fosfato, que forma dos enlaces fosfoester. Como puede observarse en la figura 8.10, el grupo fosfato se une al carbono 5' de un azúcar y al 3' del azúcar siguiente (los números de los carbonos del azúcar llevan el apóstrofe ' para diferenciarlos de la numeración de las bases nitrogenadas).

A ese soporte se unen lateralmente las bases nitrogenadas, una por cada resto de azúcar, mediante un enlace entre el OH de éste de la posición 1'

y el NH de la base. La base será, pues, como la rama de un árbol que sale del tronco.

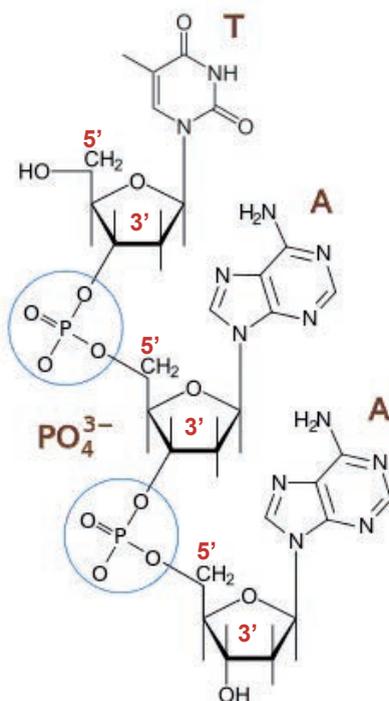


FIGURA 8.10. Estructura de las cadenas de ADN.

Se forman de esta manera nucleótidos completos, y lo que distingue a uno de otro es sólo la base nitrogenada. La disposición de los nucleótidos a lo largo de la cadena es lo que se conoce como *secuencia del ADN* y se especifica nombrando sólo la secuencia de sus bases mediante su letra inicial.

8.9.1. Estructura del ADN: la doble hélice

Al estudiar la estructura completa del ADN, resultó que en los organismos vivos las dos hebras están dispuestas en el espacio en una *doble hélice*, a modo de dos cables enrollados entre sí, pero en direcciones contrarias. Es decir, en esta doble hélice la dirección de los nucleótidos en una hebra ($3' \rightarrow 5'$) es opuesta a la dirección en la otra hebra ($5' \rightarrow 3'$), organización

que se denomina *antiparalela* (figura 8.11). Las bases nitrogenadas se disponen hacia el interior de cada hebra, las cuales quedan unidas entre sí por enlaces de hidrógeno entre las bases nitrogenadas de una y otra. No obstante, esta interacción entre las bases de cada hebra no puede ser cualquiera, ya que la citosina sólo puede unirse con la guanina, y la adenina con la timina, por lo que se las denomina *bases complementarias*. Es decir, los enlaces de hidrógeno son **C-G** y **A-T**, o combinaciones de *pares de bases complementarias*.

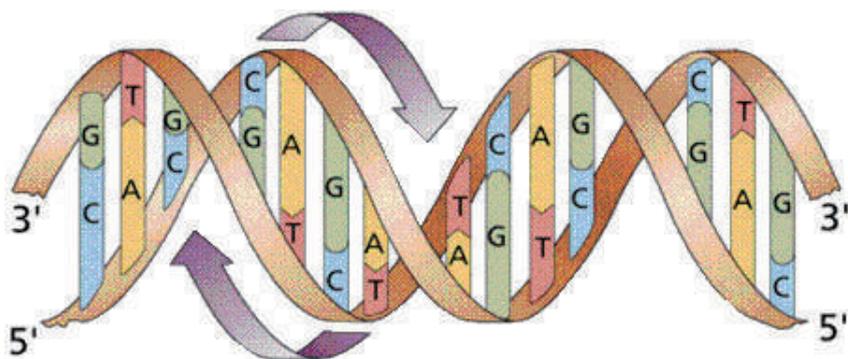


FIGURA 8.11. La doble hélice del ADN y su disposición antiparalela

Descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN

James Watson, Francis Crick y Maurice Wilkins recibieron conjuntamente, en 1962, el Premio Nobel en Fisiología y Medicina por el descubrimiento de la estructura del ADN. No obstante, en este hecho fueron fundamentales los datos de difracción de rayos X proporcionados con anterioridad por la investigadora británica *Rosalind Franklin*, lo que ha dado lugar a que se suscitara una importante polémica acerca de la autoría de este descubrimiento.

En cuanto a cómo se secuencian las bases en la cadena de ADN, no hay restricción alguna: por ejemplo, pueden ser secuencias TGAT, CACT, GCTT, etc., etc. Cabe, pues, un enorme número de combinaciones posibles dentro de la cadena del ADN. Lo que sí marcará cada una de esas secuencias es la del par complementario en la otra cadena, es decir, de lo que se

llama *hebra complementaria*. Así, en el ejemplo anterior las secuencias de bases en la hebra complementaria serían ACTA, GTGA, CGAA, respectivamente. Por ejemplo, las hebras de la primera secuencia serán:



Este fenómeno de creación de hebras complementarias es fundamental, como se verá más adelante en la síntesis de proteínas.

Ejercicios:

Represente la hebra complementaria de este segmento de ADN: TGGCAGCTTCA

Solución: Teniendo en cuenta la base complementaria de cada una de las bases de ese segmento, tendremos la siguiente hebra complementaria: ACCGTCGAAGT

Para el segmento de ADN siguiente, AACCTAGCCTT, se propone como hebra complementaria TTGGATCGTAA. Señale si es cierta o falsa esa propuesta, razonándolo.

Solución: Es falsa, ya que la secuencia propuesta es correcta excepto en la tercera base, comenzando por la derecha, ya que la base complementaria de C es G, y no T como está indicado.

8.10. EL ADN DESDE EL PUNTO DE VISTA BIOLÓGICO

Las células contienen **cromosomas**, constituidos por proteínas y sobre todo por ADN. En cada célula diploide del ser humano existen 23 pares de cromosomas, y en cada par un cromosoma procede del padre y el otro de la madre. En los 23 pares de cromosomas hay aproximadamente 3.000 millones de pares de bases. Como en nuestro cuerpo hay unos 60 billones de células, podemos hacernos idea de la enorme cantidad de ADN que poseemos.

Aunque el ADN fue descubierto en 1868, se tardó mucho tiempo en conocer que era el transmisor de la herencia. Desde el punto de vista biológico hay que considerar que el ADN es donde se almacena la información genética, que se transmite de padres a hijos y que nos hace ser lo que cada uno somos. Pero, *¿cuál es esa información genética?*

Se ha llegado a la conclusión de que el ADN resulta ser como una receta o un *código* con las instrucciones necesarias para que el organismo construya todas sus proteínas.

8.10.1. Síntesis de proteínas

Las proteínas están constituidas por aminoácidos, unidos entre sí por enlaces peptídicos. El número de proteínas diferentes es enorme (por ejemplo, en el ser humano existen más de 100.000), pero provienen de la combinación de tan sólo 20 aminoácidos. Al formarse las proteínas, los aminoácidos se unen entre sí en un orden determinado, estando marcada la forma y función de cada una por la naturaleza y la secuencia de los aminoácidos que la integran, de tal manera que con sólo alterar uno de ellos puede dar lugar a profundos cambios en la acción fisiológica de la proteína.

Cada proteína se crea bajo el *diseño* correspondiente y este diseño es el que va dando la orden para que se integre un aminoácido determinado. El diseño consiste así en instrucciones para que esos aminoácidos se unan en un orden y no en otro. Y, precisamente, *es el ADN el que proporciona ese diseño*. Cada proteína tiene, pues, un diseño, que está situado en un *gen*, uno para cada proteína. Los genes son la unidad fundamental de la herencia, y se encuentran situados a lo largo de los cromosomas.

Por otra parte, la entrada de *cada aminoácido* está regulada por una secuencia de *tres nucleótidos* (en definitiva, de tres bases nitrogenadas), que se denomina *codon*. Éste es un código o patrón de nucleótidos para cada aminoácido (tabla 8.2). De lo anterior es fácil deducir que si una proteína, por ejemplo, está constituida por 80 aminoácidos, el gen tendrá $80 \times 3 = 240$ nucleótidos.

TABLA 8.2. Código de nucleótidos para algunos aminoácidos.

Aminoácidos	Secuencia de nucleótidos	Aminoácidos	Secuencia de nucleótidos
Alanina (Ala)	GCA	Isoleucina (Ile)	ATA
Cisteína (Cys)	TGC	Leucina (Leu)	TTA
Ácido aspártico (Asp)	GAC	Lisina (Lys)	AAA
Ácido glutámico (Glu)	GAA	Metionina (Met)	ATG
Arginina (Arg)	AGA	Prolina (Pro)	CCA
Asparagina (Asn)	AAC	Serina (Ser)	AGC
Fenilalanina (Phe)	TTC	Tirosina (Tyr)	TAC
Glicina (Gly)	GGA	Treonina (Thr)	ACA
Glutamina (Gln)	CAA	Triptófano (Trp)	TGG
Histidina (His)	CAC	Valina (Val)	GTA

Se trata así de secuencias de las bases nitrogenadas que, de tres en tres, van instruyendo el aminoácido que se integra en la cadena proteínica, según un código. Así, si un segmento de ADN es *ATGGTAGAAGCA*, según los códigos de la Tabla 8.2, daría lugar a la cadena de proteína siguiente:

metionina-valina-ácido glutámico-alanina

Ejercicio:

Dado el segmento codificante de ADN siguiente, *AGA-GGA-AGC-CAC-TGG-TAC*, represente la cadena peptídica que codifica.

Solución: Consultando en la Tabla 8.2 el código de nucleótidos de los aminoácidos, resulta que la cadena peptídica es la siguiente: **arginina-glicina-serina-histidina-triptófano-tirosina**.

Cuando en una célula se va a formar una proteína, el diseño se envía al ribosoma, donde se van juntando los aminoácidos en el orden específico que ha indicado el gen, orden impuesto a su vez por la secuencia de bases.

En definitiva, la disposición secuencial de las bases a lo largo de la cadena es la que codifica la información genética.

La herencia transmitida por el ADN tiene su origen en su capacidad de dirigir la síntesis de proteínas. La *síntesis proteica*, pues, está determinada por la información genética, almacenada en el ADN y relacionada con la *secuencia de bases*.

8.11. PERFIL DE ADN: TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE ADN

No todas las secuencias de bases del ADN codifican la síntesis de proteínas. Al estudiarlas, se ha comprobado que, además de la información codificante discutida anteriormente, hay también secuencias de nucleótidos que no cumplen ese papel, por lo que se las denomina *secuencias no codificantes*, que además constituyen la mayoría del ADN, aproximadamente un 95%. Aunque aún no se ha logrado determinar con exactitud cuál es su función en el organismo, desde el punto de vista forense tienen una enorme utilidad, puesto que esos tramos no codificantes son también hereditarios y muy variables de unos seres humanos a otros, por lo que ofrecen un medio para distinguir a los individuos. Veamos cómo.

Hay secuencias de nucleótidos no codificantes que se repiten muchas veces a lo largo de las cadenas de ADN en lo que se denomina *repetición en tándem* (lo que significa secuencias seguidas, una detrás de otra). Son precisamente estas repeticiones en tándem las que la ciencia forense ha empleado para llevar a cabo el análisis de ADN, ya que si bien las secuencias de nucleótidos que se repiten son las mismas en todas las personas, *el número de veces que se repiten es diferente* de un individuo a otro. Así, si en el cromosoma 3 de un individuo la secuencia CGAA, por ejemplo, se repite 5 veces en el cromosoma paterno y 7 veces en el materno (ya que se hereda un cromosoma del padre y otro de la madre), puede que en otro individuo se repita 8 y 4 veces, respectivamente.

Desde el punto de vista forense, los tipos de repeticiones que interesan para determinar el perfil de ADN son dos. Un tipo consiste en largas secuencias de un número elevado y variable de bases (entre 15 y 35) que se repiten en tándem muchas veces (desde cientos a miles de veces) en diferentes lugares del genoma. Otro tipo consiste en secuencias de un número pequeño de bases (entre 3 y 7, aunque generalmente son de 4), que se repiten pocas veces (lo más común entre 7 y 15 veces) dando lugar a bloques de ADN que no superan el tamaño de 200 bases. En este último caso se trata de tándems cortos, mientras que el anterior era de tándems largos, por lo que atendiendo a su longitud se denominan también *minisatélites* y *microsatélites*, respectivamente.

Fue el genetista inglés **Alec Jeffreys** (ver en tema 1), de la Universidad de Leicester, quien hizo posible el análisis de ADN al descubrir que existían esas porciones repetidas no codificantes en la estructura del ADN y que eran únicas para cada individuo, por lo que resultaban como su huella dactilar. De esta manera, consiguiendo aislar y leer esos marcadores, se podría

dictaminar si una muestra de ADN pertenece o no a un individuo determinado. Es lo que se llama determinar la *huella genética* o el *perfil de ADN*, técnica desarrollada por Jeffreys en 1984.

El método de la huella genética de Jeffreys fue utilizado por primera vez en 1985, en un litigio sobre inmigración ilegal, demostrando los antecedentes británicos de un niño que volvía al Reino Unido tras un viaje a Ghana. En ciencia forense, el primer caso en el que se aplicó esta técnica fue el de *Colin Pitchfork* (ver en Lectura del tema 1), a quien se identificó como violador y asesino de dos adolescentes a partir de las muestras de semen obtenidas de los dos cadáveres. De esta manera se logró además, exonerar de los crímenes al principal sospechoso. Otro éxito espectacular en los comienzos de esta técnica fue confirmar la identidad del cadáver del doctor nazi *Josef Mengele*, en 1992.

8.11.1. Procedimiento experimental

Pese a los pocos años de funcionamiento, las distintas técnicas de análisis de ADN han ido variando con el tiempo, paralelamente a los avances en biología molecular que han permitido superar los problemas y conseguir que el proceso sea más fácil y asequible. En un principio se empleó la técnica conocida por las siglas **RFLPs** (del inglés **R**estriction **F**ragment **L**ength **P**olymorphisms), que estudiaba los tándems largos (minisatélites), pero a mediados de los años 90 del pasado siglo fue sustituida por la técnica llamada **STR** (del inglés **S**hort **T**andem **R**epeat) o de repetición en tándems cortos (microsatélites). Como su nombre indica, en este último caso lo que se analiza son los tándems cortos que se repiten dentro de la cadena de ADN. Pero, *¿por qué este cambio?* Porque la técnica RFLPs, a pesar de sus grandes éxitos (como el famoso caso del presidente norteamericano Bill Clinton y Mónica Lewinski, en el que se analizaron restos de semen en un vestido de ésta) presentaba algunos inconvenientes. Ante todo, resultaba bastante lenta de ejecución y, además, necesitaba cantidades considerables de muestra de ADN.

Estos problemas se resolvieron con la técnica llamada **PCR** (**P**olymerase **C**hain **R**eaction o reacción en cadena de la polimerasa), que permitía copiar la cadena de ADN millones de veces en poco tiempo. Pero esta técnica no se puede aplicar cuando los bloques de ADN son muy largos, como en el

caso de la técnica de RFPL, que pueden llegar a contener miles de bases. Por ello se emplean los tándems repetidos cortos (STR), que no suelen tener más de doscientas bases. Además, esto representa otra ventaja, ya que al tratarse de bloques cortos son menos susceptibles de degradarse bajo las condiciones ambientales, como sucede con las largas, que se rompen con cierta facilidad.

De esta manera, una vez extraído el ADN de la muestra, se amplifican los STR (es decir, se copian), para disponer de más material de estudio que haga posible su análisis. El proceso está automatizado, para lo cual se emplea un aparato, el *ciclador térmico de ADN*, que en unas horas es capaz de copiar el ADN un millón de veces. Este hecho es importantísimo, pues de esta manera se pueden analizar cantidades ínfimas de ADN, como son las de restos de saliva en sobres, sellos o cigarrillos, e incluso se puede trabajar con trozos muy pequeños de las cadenas de ADN.

Una vez amplificado el ADN, los tándems repetidos cortos (STR) se analizan mediante *electroforesis de gel*, en la que los fragmentos separados migran a distancias inversas a su tamaño. Es decir, los fragmentos mayores, con mayor número de repeticiones, tendrán una velocidad menor que los fragmentos pequeños. Para detectarlos en la placa se suelen emplear tintes fluorescentes (figura 8.12). De esta manera puede determinarse el número de repeticiones. Actualmente se va sustituyendo este tipo de electroforesis de gel por *electroforesis capilar* (ver en tema 2).

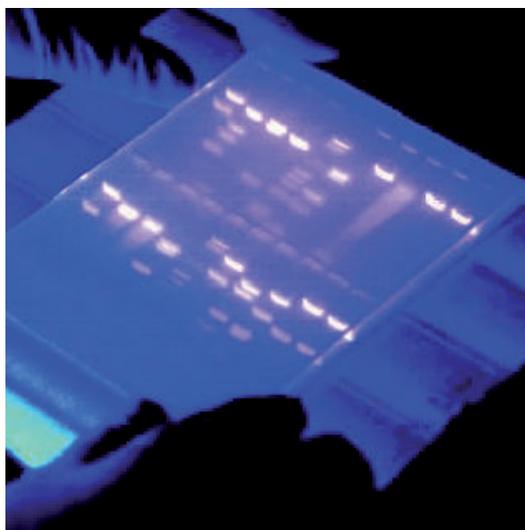


FIGURA 8.12. Revelado por técnicas fluorescentes de fragmentos de ADN separados por electroforesis en gel.

8.11.2. Estudio estadístico

Lo que se lleva a cabo después es un estudio estadístico, para lo que se necesita disponer de una gran base de datos. En Estados Unidos el FBI ha creado la base de datos llamada **CODIS** o **Combined DNA Index System** (Sistema de Índice Combinado de ADN), que se emplea también en muchos otros países. Veamos, a grandes rasgos, en qué consiste.

En el sistema CODIS se eligieron unas regiones (localizaciones o *loci*) de algunos cromosomas en las que secuencias de bases se repetían en tándems cortos (STR). Son los *marcadores genéticos*, en un total de 13 en este sistema, que se nombraron así:

TPOX D3S1358 FGA D5S818 CSF1PO D7S820 D8S1179
 TH01 VWA D13S317 D16S539 D18S51 D21S11

A estos *loci* hay que añadir otro situado en el cromosoma Y, por lo que existe sólo en los varones, lo cual tiene importancia para ciertos casos forenses (por ejemplo, en violaciones en las que han intervenido varios hombres, pues de los restos de semen se obtiene una muestra de ADN que es una mezcla del ADN de esos individuos). En la figura 8.13 se representa la posición de estos *loci* en los cromosomas.

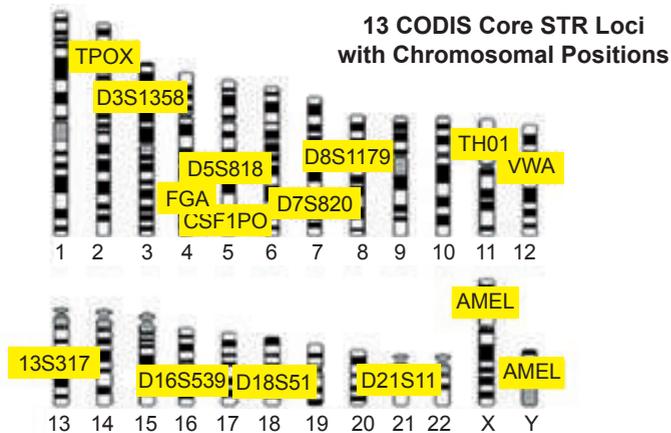


FIGURA 8.13. Marcadores genéticos en 13 localizaciones (*loci*) STR (siglas en amarillo).

Todas estas localizaciones se analizaron en muestras provenientes de gran número de personas: delincuentes, arrestados y otras pertenecientes

a muchos tipos de casos jurídicos. De esta manera, se ha calculado estadísticamente para cada localización el porcentaje de población (frecuencia de aparición o probabilidad) en el que las secuencias se repiten un número dado de veces en cada uno de los cromosomas del par.

Estudiémoslo en un caso concreto, por ejemplo en la localización TH01, situada en el cromosoma 11. Los análisis han mostrado que la secuencia que se repite en este *locus* es A-A-T-G, y lo hace de 5 a 11 veces. Así, un individuo puede tener un tipo de TH01 con 7 repeticiones de esa secuencia en un cromosoma y 10 en el otro. Esto se representa como TH01 7;10. Es decir, con dos números correspondientes a las repeticiones en cada cromosoma del par, separados por un punto y coma (en medios anglosajones se separan con una coma, que no se debe confundir con la de los decimales), que es lo que se conoce como *patrón*.

En la tabla 8.3 se han recogido algunas de las posibles combinaciones de repetición para dos loci, el TPOX y el D16S539 (en los que el número de repeticiones es de 8 a 12 y de 8 a 15, respectivamente) y la probabilidad o frecuencia de aparición (en tantos por ciento) de cada patrón en la población. Con estos datos se puede obtener la probabilidad de que dos individuos coincidan en uno o más patrones. La *probabilidad de identidad* es así una medida de la probabilidad de que dos individuos elegidos al azar tengan un tipo idéntico de STR. Obviamente, a menor valor de esta probabilidad, más discriminante será dicho STR.

TABLA 8.3. Probabilidades STR para algunas localizaciones CODIS

Localización TPOX del Cromosoma 2: <i>Patrón</i> : Repeticiones (AATG) _n	Porcentaje de población (%)	Localización D16S539 del Cromosoma 16: <i>Patrón</i> : Repeticiones (GATA) _n	Porcentaje de población (%)
8;9	28,5	8;8	0,023
8;10	12,7	8;9	0,38
-	4,91	8;10	0,18
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
11;11	6,40	14;14	0,058
11;12	2,48	14;15	0,014
12;12	0,24	15;15	0,0009

Veamos en el siguiente ejercicio un ejemplo del estudio estadístico.

Ejercicio:

Se necesita conocer el porcentaje de población que tiene a la vez el patrón 8;9 en TPOX y el patrón 14;15 en D16S539.

Solución: Primeramente, tendremos en cuenta los datos proporcionados por la Tabla 8.2:

- el patrón 8;9 en TPOX está presente en el 12,7% de población
- el patrón 14;15 en D16S539 está presente en el 0,014% de población

Luego, el porcentaje de población que puede tener ambos patrones se calcula mediante la multiplicación de ambas probabilidades (en tantos por uno), según la regla del producto (sección 8.5.3):

$$0,127 \times 0,00014 = 0,00001778, \text{ es decir, el } 0,001778\% \text{ de población}$$

Para calcular el *tamaño de población* que se necesita para encontrar a un individuo que coincida en esos dos patrones, hay que tomar el inverso de la probabilidad (expresada en tantos por uno):

$$1 / 0,00001778 = 56.242$$

Es decir, que se necesita una población de 56.242 personas para encontrar dos individuos que coincidan en ambos patrones a la vez.

En el caso del ejercicio propuesto, se trata de coincidir tan sólo en dos patrones. Pero si se calcula la probabilidad de que dos individuos coincidan en las 13 localizaciones, es fácil comprender que resulta pequeñísima, del orden de 1 en aproximadamente 700 trillones de individuos. De ahí la gran seguridad de adjudicar un ADN diferente a cada individuo.

Además del sistema CODIS, se han creado otras bases de datos de ADN. Así, en el Reino Unido se utiliza la realizada por el *Forensic Science Service* y, por su parte, la *Interpol* también ha elaborado la suya. No obstante, el mecanismo de actuación es similar en todas ellas, si bien algunos de los *loci* estudiados varíen de unas a otras.

8.12. EL ADN MITOCONDRIAL EN LA INVESTIGACIÓN FORENSE

Hasta ahora nos hemos referido al ADN de los cromosomas. No obstante, en las células de todo ser humano existen dos tipos de ADN: el ADN nuclear

y el ADN mitocondrial (ADNmt). Aunque ambos sean la misma sustancia desde el punto de vista químico, entre ellos hay importantes diferencias:

- **ADN nuclear:** Se encuentra en el núcleo de las células y es el ADN cromosómico, que contiene todos los genes responsables de la herencia. El ADN nuclear es el que se emplea en investigación forense para obtener el perfil de una persona, y también para realizar las pruebas de paternidad.
- **ADN mitocondrial:** Se encuentra dentro de un orgánulo de la célula llamado *mitocondria*, encargado de producir la energía que aquélla necesita. Con él sólo se pueden analizar los parentescos por vía materna. Esto se debe a que los óvulos sí tienen mitocondrias, mientras que los espermatozoides poseen mitocondrias en el flagelo o cola, pero no en la cabeza. Como en la fecundación únicamente penetra en el óvulo la cabeza del espermatozoide, mientras que el flagelo se separa y cae, el embrión sólo recibe ADN mitocondrial de la madre. El ADNmt no existe, pues, en los cromosomas (ni siquiera en los maternos), ya que éstos se encuentran en el núcleo de la célula, mientras que el ADNmt se sitúa fuera de aquél, en las mitocondrias, como ya se ha mencionado.

Además de su diferente localización en las células, ambos tipos de ADN difieren en otros aspectos:

- En su *forma*: el ADN nuclear es lineal y el ADNmt es circular.
- En su *tamaño*: el ADNmt es de tamaño mucho menor, ya que en total posee 16.569 pares de bases frente a los 3.000 millones del ADN nuclear. Por ello, este último codifica unas 100.000 proteínas y el ADNmt, sólo 37.
- En el *número de copias*: en el ADN nuclear sólo hay dos copias, correspondientes cada una a cada uno de los cromosomas del par (es decir, a los 23 cromosomas que provienen del padre y a los otros 23 que provienen de la madre), pero en el ADNmt hay muchísimas copias, entre cientos y miles por célula.

8.12.1. Aplicaciones del análisis del ADN mitocondrial

El análisis del ADNmt sirve para verificar *parentescos por vía materna*, pero obviamente no por vía paterna. Por ejemplo, si analizamos el ADN

mitocondrial de dos supuestos hermanos/as, podremos concluir si tienen o no la misma madre. No obstante, en investigación criminal presenta a veces algunas ventajas frente al análisis de ADN nuclear. Así, al tener tan gran número de copias (frente a las dos del ADN nuclear) es más fácil recuperar la muestra. Además, se descompone menos que el ADN nuclear, con lo que aumenta la posibilidad de disponer de una buena muestra para trabajar.

En el ADN de las mitocondrias las cadenas son más cortas que las del ADN nuclear, por lo que su fraccionamiento será menor ante procesos destructivos y, además el número de copias en el mitocondrial es muchísimo mayor. Por todo ello, será más fácil recuperar una muestra válida para el análisis.

Todo ello hace que en casos en que los restos hayan estado sometidos a altas temperaturas y a la intemperie, el ADNmt representa una vía factible de investigación. Buen ejemplo de ello es el caso de las *Torres Gemelas*, en los atentados del 11 de septiembre de 2002. Y, sobre todo, en la identificación de los restos del zar Nicolás II de Rusia y su familia, asesinados durante la revolución rusa, en julio de 1918 (ver lectura).

8.13. OTRAS APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE ADN

Además de identificar sospechosos en delitos de diversa índole, tiene otras aplicaciones muy importantes, tanto en investigación forense como de otros tipos: pruebas de paternidad y parentesco, identificación de restos humanos, compatibilidad en donaciones de órganos, en antropología (como migraciones de seres humanos o en estudios de evolución); estudio de poblaciones de animales silvestres; composición y origen de alimentos... Éstas entre otras muchas, ya que el campo de utilidad de estas técnicas va aumentando continuamente.

En lo que se refiere a *criminología*, a pesar de los relativamente pocos años de su descubrimiento, el análisis de ADN se ha convertido en una técnica habitual de los laboratorios forenses.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. Responda si son *ciertas* o *falsas* las siguientes afirmaciones, razonándolo brevemente:
 - a) En las pruebas realizadas con bencidina y con luminol se demuestra la presencia de sangre en una muestra porque se produce un cambio de color.
 - b) Se ha encontrado un vaso en la escena del crimen, y se ha analizado la posible presencia de saliva en sus bordes. Al hacer la prueba de la amilasa, se ha producido una fuerte coloración azul, con lo cual se demuestra que en el vaso había saliva.
2. Se ha enviado a un laboratorio forense una camisa con una mancha de la que se sospecha es de semen. Se ha preparado la muestra convenientemente para su estudio en el microscopio, dando como resultado que no se observa la presencia de espermatozoides. ¿Puede asegurarse que esa mancha no es de semen? ¿Por qué?
3. Calcule el tamaño de población que se necesita para encontrar a un individuo que tenga los siguientes patrones: 11,11 en TPOX y 8;10 en D16S539.
4. Una mujer (cuyas iniciales son A.F.) a la que adoptó de muy niña una familia, está buscando a sus padres biológicos. Tiene razones para sospechar que éstos sean una pareja que murió en un incendio. De los dos cadáveres sólo se han conseguido muestras de ADN mitocondrial. Una vez realizado con ese material los análisis de ADN, han dado un resultado negativo al compararlos con el análisis de ADN mitocondrial correspondiente a A.F. ¿Se podrá asegurar que tanto el hombre como la mujer no serán sus padres biológicos? *Justifique* brevemente la respuesta.

Resolución

1. a) *Falso* (en parte): Si bien es cierto que en la prueba realizada con bencidina cuando el resultado es positivo se produce una coloración, no es así con el luminol, prueba en basada en una quimioluminiscencia, es decir, que en caso de ser sangre se produce una emisión de luz.
 - b) *Falso*: Si hubiera habido saliva, la amilasa presente en ésta habría hidrolizado al almidón con el que se lleva a cabo esta prueba y, al quedar éste destruido, no habría tenido lugar la reacción con el yodo, que es la que da lugar al intenso color azul. Al producirse esta reacción es porque el almidón no se ha alterado. Luego no hay amilasa y, por tanto, tampoco saliva.
2. No puede asegurarse, ya que el que no aparezcan espermatozoides en el semen puede deberse a varias razones. A veces en el semen no hay espermato-

zoides (por ejemplo, debido a una vasectomía, o por una anomalía congénita o por enfermedad); también pueden estar en concentraciones tan bajas que prácticamente sean imposibles de detectar. Asimismo, hay que tener en cuenta que los espermatozoides están fuertemente unidos a la ropa, con lo que tal vez no se hayan podido extraer de la mancha al preparar la muestra. Además son muy frágiles una vez que la mancha se ha secado, con lo que simplemente por el roce se pueden desintegrar. Por tanto, habría que acudir a otras pruebas, ya que esta puede dar falsos negativos.

3. Consultando en la Tabla 8.3 el porcentaje de población que tiene cada uno de esos patrones, resulta que:

- el patrón 11;11 en TPOX está presente en el 6,40% de población
- el patrón 8;10 en D16S539 está presente en el 0,18% de población

Luego, el porcentaje de población que tiene ambos patrones se calcula mediante la multiplicación de ambas probabilidades (en tantos por uno):

$$0,064 \times 0,0018 = 0,0001152, \text{ es decir, } 0,01152\%$$

Para calcular el *tamaño de población* que se necesita para encontrar a un individuo que coincida con esos patrones, hay que tomar el inverso de la probabilidad:

$$1 / 0,0001152 = 8680$$

Es decir, que se necesita una población de 8680 personas para encontrar un individuo que tenga ambos patrones a la vez.

4. Sólo en el caso de la mujer puede asegurarse que no es su madre, pero en el caso del hombre no puede asegurarse que lo sea o que no lo sea.

La *causa* es que el ADN mitocondrial sólo se hereda de la madre, pero no del padre. Esto se debe a su vez a que los óvulos sí tienen mitocondrias, mientras que los espermatozoides tienen mitocondrias en el flagelo o cola, pero no en la cabeza. Como en la fecundación únicamente penetra en el óvulo la cabeza del espermatozoide, mientras que el flagelo se separa y cae, el embrión sólo recibe ADN mitocondrial de la madre.



LECTURA

«El zar Nicolás II y el ADN mitocondrial»

Al estallar la revolución rusa, el zar Nicolás II, de la dinastía de los Romanov, fue obligado a abdicar y hecho prisionero junto a su familia (en la figura), formada por su esposa, la zarina Alejandra, y sus cinco hijos (cuatro mujeres y un varón, el zarevich Alexis). En mayo del 1918 los revolucionarios bolcheviques los trasladaron a la ciudad de Ekaterimburgo, en los Urales. En la madrugada del 17 de julio de ese mismo año, todos ellos, junto a tres sirvientes y el médico de la familia, fueron llevados al sótano de la casa donde estaban retenidos, les alinearon contra la pared y, sin más, les comunicaron que iban a ejecutarles, con lo que inmediatamente un pelotón de unos doce hombres armados con fusiles y pistolas comenzó a dispararles. Nicolás fue el primero en morir, después la zarina, pero algunos de los otros tuvieron que ser rematados con las bayonetas. Posteriormente, los despojaron de sus ropas, los metieron en un camión y los enterraron en un bosque cercano, pero antes quemaron y rociaron los cadáveres con ácido sulfúrico. No querían dejar rastro de sus restos mortales, por temor a que los partidarios del zar pudieran recogerlos.

Muchos años después, en 1979, se localizó el lugar donde se suponía que estaba la fosa, aunque tal descubrimiento no se hizo público hasta pasados diez años. Sin embargo, no se autorizó entonces la investigación acerca de la identidad de los restos, consistentes en dientes y cerca de mil fragmentos óseos. Fue en 1991 cuando se comenzó la ardua tarea de intentar reconstruir los esqueletos, un puzzle realmente macabro. Tras un minucioso estudio, sólo se pudo estimar el sexo y edad de los cadáveres, con lo que se concluyó que correspondían a nueve personas, seis adultos (cuatro mujeres y dos varones) y tres niñas. Finalmente, se pensó que los restos podrían corresponder al zar, a la zarina y a tres de sus cuatro hijas, mientras que los otros cuatro adultos serían el médico y los sirvientes. Sin embargo, no dejaban de ser conjeturas que era preciso demostrar de forma inequívoca. En consecuencia, se decidió recurrir al análisis de ADN, para lo cual se pidió la colaboración del Servicio Británico de Ciencia Forense. Para ello, el equipo científico analizó el ADN mitocondrial.

¿Por qué se utilizó el ADN mitocondrial? *Porque dado el estado de los huesos tras los efectos del fuego, del ácido y del tiempo, el ADN nuclear estaría tan deteriorado que resultaría inservible para los análisis. Sin embargo, en el ADN de las mitocondrias es más resistente ante procesos destructivos.*

El ADN mitocondrial se transmite de la madre a los hijos e hijas, pero no del padre. Al cotejar el ADN mitocondrial de una de las mujeres adultas con el de las tres niñas, se observó que era el mismo. Luego, podrían ser la zarina y tres de sus hijas. Pero había que confirmar, por otra parte, que se trataba verdaderamente de Alejandra. Por esta razón, teniendo en cuenta que era nieta de la reina Victoria de Inglaterra por vía materna, se cotejó su ADN mitocondrial con el de otro descendiente también por línea materna, que en este caso fue el duque de Edimburgo, esposo de la reina Isabel de Inglaterra. La coincidencia de ADN demostró que los restos hallados eran verdaderamente de la zarina. En cuanto a Nicolás II, se cotejó el ADN mitocondrial de los huesos con el de una mancha de sangre en una camisa de cuando fue herido en la guerra con Japón, conservada como reliquia. Después se cotejó también con el de los restos exhumados de su hermano. Y en ambos casos hubo coincidencia, con lo que la probabilidad de que fuera el zar era superior al 99,99%.

Se trataba, pues, de la familia Romanov, pero faltaban los restos de otra de las hijas y del único niño, Alexis. En 2007, a unos setenta metros de la primera fosa se descubrieron fragmentos de huesos, sumamente deteriorados, y algunos dientes. De su estudio se dedujo que dos personas estaban sepultadas en ese lugar, una mujer de entre 15 y 19 años y un varón de entre 12 y 15. Podrían ser, pues, la princesa que faltaba y el zarevich. Los análisis dieron como resultado que el ADN mitocondrial de la joven era igual al de la zarina, y en cuanto al varón, se cotejó además el cromosoma Y del zar con el de Alexis y con el de un descendiente (varón) vivo de la misma línea paterna. Otra vez hubo coincidencia, por lo cual se trataba del pequeño zarevich.

No había duda, pues, toda la familia Romanov había sido ejecutada en aquella madrugada, y así se despejó también la incógnita de que la princesa Anastasia hubiera podido sobrevivir a la matanza.

DROGAS DE ABUSO

9



Marihuana y tabletas de MDMA, grabadas con distintos logos

María del Pilar Cornago Ramírez

OBJETIVOS

General

Ofrecer una visión general acerca de las características y formas de detección de las drogas más frecuentes en el trabajo de un Químico Forense.

Específicos

1. Clasificar las drogas de abuso descritas en el tema, en función de distintos parámetros.
2. Describir el origen, forma de presentación y forma de consumo de algunas de estas drogas.
3. Seleccionar los métodos de análisis y técnicas más utilizados que permiten obtener información, de forma presuntiva, acerca de la composición de una muestra.
4. Indicar los principales tipos de test basados en el color.
5. Reconocer el poder de discriminación que tienen las diferentes técnicas de análisis de drogas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Abordar el estudio relativo a las drogas de abuso requiere conocimientos de química orgánica en lo que a estructura, clasificación, nomenclatura y formulación de compuestos orgánicos se refiere. También, el conocimiento de las reacciones orgánicas implicadas en los métodos de screening facilitará, en determinadas ocasiones, la comprensión de su mecanismo.

Tema 9. Drogas de abuso

9.1. Introducción

9.2. Qué se entiende por drogas de abuso

9.3. Tipos de drogas de abuso

9.4. Identificación de drogas de abuso

9.5. Análisis de evidencias físicas

Ejercicios y soluciones

Lectura. «Cocaina. Una breve historia».

ANEXO. Estructura, denominación común o vulgar, nombre químico y acción farmacológica de sustancias presentes en el tema.

9.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas sociales más importantes del pasado siglo y con posibilidad de hacerse más grave en el siglo XXI a nivel mundial, es la considerable diversificación de los tipos de drogas de abuso (DA) producidas y que son objeto de tráfico y consumo.

La responsabilidad y penas impuestas por la legislación vigente asociadas con su producción, distribución, posesión y uso, varían en función del tipo y de la cantidad de que se trate. Esto unido a la aparición de una gran variedad de drogas procedentes de laboratorios clandestinos, así como al uso indebido de algunas de ellas de prescripción facultativa (como barbitúricos y benzodiacepinas), requiere que los laboratorios de investigación cuenten con expertos químicos-forenses, capaces de identificar y cuantificar la cantidad de droga presente en una muestra, empleando para ello la técnica o técnicas más apropiadas en cada caso.

Los distintos procedimientos utilizados en su síntesis o incluso las pequeñas variaciones en las condiciones de reacción (temperatura, presión o pureza de los reactivos) dan lugar, como veremos a lo largo del tema, a la formación de distintas cantidades y tipos de otros compuestos acompañando al compuesto principal. Así, el porcentaje del compuesto principal, la presencia a veces de un isómero, o de ciertas impurezas, desempeñan un papel muy importante en la investigación del origen geográfico de estas sustancias. Por eso, la comparación, tanto a nivel nacional como internacional, entre las distintas muestras de drogas encontradas proporciona una valiosa información acerca de su fabricación, distribución, cadena de suministro e, incluso, del cártel de drogas específico.

9.2. QUÉ SE ENTIENDE POR DROGAS DE ABUSO

El término *Droga*, y farmacológicamente hablando, es toda materia prima de origen vegetal o animal, sin valor nutricional, que contiene uno o varios principios activos, que no ha sufrido manipulación, salvo en lo referente a su conservación, y que es capaz de provocar una respuesta fisiológica o de comportamiento en un individuo.

Principio activo se define como la sustancia que posee acción farmacológica sobre determinadas dolencias o enfermedades mitigando sus síntomas o produciendo su curación.

Por otra parte, la palabra «drug» en inglés se usa indistintamente para designar *droga* o *medicamento*. Sin embargo, en nuestro lenguaje común el término de droga se emplea asociándola a hechos delictivos. Por ello, para matizar es más correcto emplear el término de drogas de abuso que es el que utilizaremos en el tema.

Llegados a este punto cabría preguntarse ¿Qué se entiende por drogas de abuso? A continuación, y aunque su definición puede variar en el tiempo y en el entorno en que se maneja, expondremos algunas de las que se utilizan. Podemos decir así, que drogas de abuso o lo que coloquialmente se entiende por drogas, son:

«Sustancias de uso no médico con efectos psicoactivos (capaces de producir cambios en la percepción, el estado de ánimo, la conciencia y el comportamiento) y susceptibles de ser autoadministradas». También,



«Sustancias que producen dependencia y que se emplean voluntariamente para provocarse determinadas sensaciones o estados psíquicos no justificados terapéuticamente». (Formulada por Gisbert Calabuig y recogida en el manual de drogodependencia).

Según la *Organización Mundial de la Salud* (OMS), «Tipo de sustancias que, introducidas en un organismo vivo, son capaces de modificar una o varias de sus funciones, siendo susceptibles de provocar dependencia y tolerancia» y

Desde un punto de *vista forense*, «aquellas sustancias, sujetas a control nacional o internacional, cuya posesión o consumo están prohibidos por la ley».

9.3. TIPOS DE DROGAS DE ABUSO

Hay que tener en cuenta que existen enormes diferencias tanto químicas como estructurales que caracterizan a las drogas lo que da lugar, como veremos a continuación, a distintos criterios de clasificación.

9.3.1. Clasificación

Es posible realizar una clasificación de las drogas atendiendo a:

- Sus propiedades ácido-base. Se trata de un sistema de clasificación que aunque de utilidad para un químico, no suele utilizarse en entornos legales. Así, tendrán carácter:
 - *Ácido*. Aquéllas con grupo funcional carboxilo o fenólico, como el ácido γ -hidroxibutírico o GHB, los barbitúricos o los tetrahidrocannabinoides.
 - *Neutro*. Sustancias con grupos no ionizables (testosterona) o anfóteros (morfina).
 - *Básico*. Aminas que se pueden subdividir en dos categorías:
 - *Alcaloides*: Es el grupo más numeroso, que incluye sustancias de origen vegetal conteniendo normalmente algún anillo heterocíclico en su estructura y uno o más átomos de nitrógeno básicos. Su basicidad depende de su carácter alifático o aromático y de la

afinidad electrónica de los sustituyentes presentes en ellos. Entre ellas: cocaína, LSD, heroína, triptamina, etc.

- *No-alcaloides*: Sustancias generalmente sintéticas o semi-sintéticas, como el anestésico ketamina, benzodiazepinas, o feniletilaminas.
- También es muy útil agruparlas de acuerdo a su origen de procedencia, si son naturales, semisintéticas o sintéticas, y a su forma de administración y de presentación (polvo, tableta, líquido...). Así, según la forma de obtención, se habla de:
 - Sustancias que son parte de plantas naturales, por ejemplo la marihuana.
 - Sustancias obtenidas a partir de plantas naturales, como los alcaloides.
 - *Drogas semisintéticas*: obtenidas por síntesis a partir de una sustancia natural. Por ejemplo, la heroína por acetilación de la morfina, ciertas hormonas, esteroides, etc.
 - *Drogas sintéticas*, como el diazepam (*Valium*), son las obtenidas en el laboratorio mediante reacciones químicas.
- La clasificación legal de las drogas de abuso está determinada por su capacidad para dañar la salud de un individuo o suponer un peligro para la sociedad, factores que en parte están determinados por sus propiedades farmacológicas, principalmente la toxicidad y la capacidad de producir dependencia. De acuerdo a su status legal, la *Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes*, JIFE, (organismo para el control de drogas, dependiente de la ONU), distingue entre cuatro listas, en función del grado de restricción. Así,
 - **Lista 1**. Sustancias sin uso médico aceptado. LSD, cannabis, derivados de anfetaminas (MDMA, MDA, MDEA), psilocibina, etc.
 - **Lista 2**. Uso médico aceptado con restricciones. Anfetamina, metanfetamina, GHB, 2C-B, cocaína, morfina y opiáceos relacionados como la oxicodeona.
 - **Lista 3**. Uso médico aceptado. Ketamina, barbitúricos como pentobarbital o amobarbital y alguna benzodiazepina como el flunitrazepam (rohypnol).



- **Lista 4.** Uso médico aceptado. La mayoría de las benzodiazepinas, como diazepam, bromazepam o clonazepam y barbitúricos como fenobarbital, barbital o alobarbital.

El uso potencial como drogas de abuso de las sustancias incluidas en la lista 4, es considerado menor que el de las sustancias de la lista 3.

- De acuerdo a sus propiedades farmacológicas, se hace referencia a:
 - Analgésicos narcóticos u opiáceos: morfina, codeína, oxicodona....
 - Depresores del sistema nervioso central (SNC), conocidos a veces como sedantes o tranquilizantes: barbitúricos, benzodiazepinas y medicamentos para dormir no benzodiazepínicos...
 - Estimulantes del SNC: cocaína, anfetaminas como, benzedrina, MDMA, DOB, MDA o MBDB.
 - Alucinógenos o psicodélicos (producen alteraciones perceptivas): LSD, mescalina...
 - Misceláneos (drogas con acción no definida).

La aspirina y la morfina son ambos analgésicos, pero su mecanismo de actuación es diferente. La primera actúa contra la causa del dolor mientras que la segunda bloquea el impulso nervioso que produce el dolor al unirse a los receptores opiáceos a lo largo del SNC. La morfina es considerada un analgésico narcótico.

- En función del uso que se les va a dar se encontrarían, entre otras drogas
 - Las «*Human-Performance*» o «Mejora personal», sustancias que potencian o debilitan una determinada acción. Entre ellas destacan el alcohol y los esteroides anabolizantes. Estas últimas, la mayoría adquiridas por prescripción facultativa, incluyen muchas sustancias basadas en la testosterona y usadas en algunos casos de forma abusiva por los atletas para aumentar su masa muscular y disminuir el tiempo de recuperación tras un esfuerzo.
 - Las denominadas «*predadoras*» o «*de violación*» como el rohypnol, el GHB y la ketamina, que utilizadas junto con alcohol pueden

conllevar efectos de desorientación, inconsciencia y pérdida de memoria a corto plazo.

- Las de «*Club o recreativas*», consumidas por los participantes en festivales, discotecas, etc. Además de las incluidas en el apartado anterior, el éxtasis (MDMA), LSD y otros alucinógenos.

9.3.2. Descripción de algunas drogas de abuso

Cannabis. Procedente de la planta *Cannabis sativa*, variedades *Índica* (figura 9.1) y *Americana*. En el cannabis están presentes unos setenta compuestos químicos conocidos como cannabinoides, siendo al Δ^9 -tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THC) al que se le atribuyen la mayor parte de los efectos que produce. Todas las partes de la planta, en diferentes proporciones (resina > flores > hojas > semillas), poseen el principio activo Δ^9 -THC, a veces con pequeñas cantidades de su isómero Δ^8 -THC. Se presenta, como: droga seca, como resina (hachís), y como aceite esencial (~ 60% de THC) que se obtiene a partir del hachís.

El término *marihuana*, también «porro», hace referencia al preparado elaborado a partir de las flores, hojas y tallos pequeños provenientes de ejemplares hembra de la planta.

El *hachís*, también llamado «chocolate», es la pasta formada por las secreciones resinosas de THC que se almacenan en las flores de la planta hembra. Contiene por lo general concentraciones mucho más altas de THC (alrededor del 20%) y por eso el efecto suele ser más potente que el de la marihuana (alrededor del 5% de THC).

El símbolo Δ seguido de uno o varios números en la parte superior derecha, indica la presencia de uno o varios dobles enlaces en la molécula. En este caso, el Δ^9 -THC, significa que se trata de un compuesto con la estructura del tetrahidrocannabinol y un enlace extra en la posición 9-10.

Normalmente se mezcla con el tabaco y se fuma. Esta sustancia se clasifica como **miscelánea** por los efectos tan diferentes que presenta, a saber: euforia, sedación, analgesia y alucinaciones.

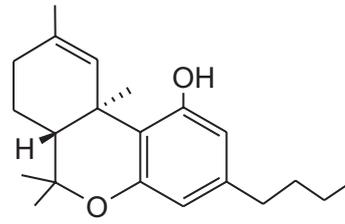


FIGURA 9.1. *Cannabis Sativa Indica* (izquierda) y su principio activo Δ^9 -THC.

Cocaína. Es el alcaloide principal que se extrae de las hojas de la planta *Erythroxylum coca*, un pequeño arbusto (alrededor de 1,5 m de altura) que crece en las regiones tropicales y subtropicales de Sudamérica.

En las regiones andinas sus hojas (que son de sabor amargo, tienen un olor característico y producen adormecimiento de la lengua y de los labios) se mascan como estimulante para resistir el mal de altura, siendo ésta la forma menos adictiva de consumo.

La cocaína o metilbenzoilecgonina, es un alcaloide, que se puede presentar en forma de:

- Pasta de color pardo o pasta de cocaína, que son restos de cocaína procesada con ácido sulfúrico. Se la denomina también «basuco», «suzuki» o «paco».
- Polvo blanco, que es el clorhidrato de cocaína (figura 9.2) conocida también como «nieve», «blanca», «farlopa», etc.
- Cristales blancos o amarillos, que es «el crack» (figura 9.2), forma que produce una gran dependencia y que resulta de tratar el clorhidrato de cocaína con un medio básico.

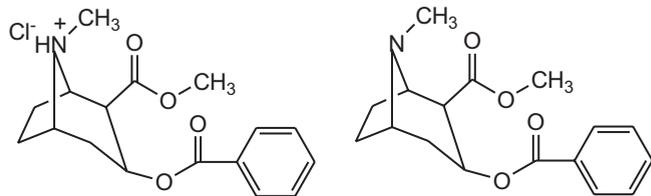


FIGURA 9.2. *Erythroxylum coca*. Estructuras del clorhidrato de cocaína y del «crack».

En Estados Unidos, la cocaína se corta o adultera mezclándola generalmente con azúcares, como manitol o sacarosa, mientras que en el Reino Unido se suele mezclar con anestésicos locales, como la procaína.

Las formas de consumo de la cocaína, anteriormente mencionadas, están relacionadas con la forma de presentación, lo que determina sus propiedades. Así, el clorhidrato que es una sal, es soluble en agua, y se puede administrar por vía intravenosa o esnifar porque se disuelve en la cavidad nasal y pasa al riego sanguíneo. Por otro lado, el «crack» o «rock», es una molécula neutra, insoluble en agua, que se fuma y no se esnifa porque no se puede disolver en el conducto nasal.

La cocaína, junto con la anfetamina y metanfetamina, son ejemplos de sustancias que actúan como **estimulantes del sistema nervioso central**. Se cree que causan un aumento en los niveles de los neurotransmisores dopamina y noradrenalina, que se traduce, entre otros efectos, en un aumento de la presión arterial, reducción del cansancio físico y del apetito. Son, probablemente, las drogas más consumidas.

Cuando en un laboratorio forense se sospecha que una muestra de droga pueda ser cocaína, una forma sencilla de averiguar la forma en que se presenta es haciendo uso de sus distintas propiedades físicas, por ejemplo de su solubilidad. Así, la adición de un disolvente orgánico no polar como el hexano, benceno, éter o cloroformo disolverá la muestra en el caso de que se trate de «crack» la forma básica y no lo hará si es clorhidrato de cocaína, que si se disolverá en disolventes polares, como el agua, o en disoluciones ácidas o hidroalcohólicas. A continuación habrá que realizar una identificación positiva de la droga y determinar su pureza.

Mescalina. Procede del cactus *Lophophora williamsii*, comúnmente conocido como Peyote o botón de mezcal (figura 9.3). Es un alcaloide con propiedades alucinógenas, una de las drogas mágico-religiosas usada por los aztecas en ceremonias rituales. Su ingestión produce en primer lugar distorsión en la percepción de colores y sonidos, seguida de una fase depresiva acompañada de náuseas y midriasis. Este cactus no se cultiva a escala comercial y la mescalina ha sido remplazada por otras feniletilaminas de origen sintético.

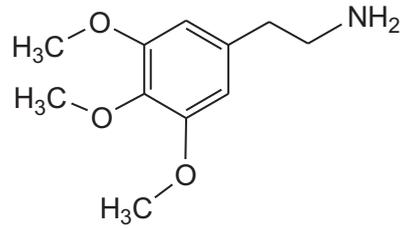


FIGURA 9.3. Peyote y estructura química de la mescalina.

«**Hongos mágicos**». Pertenecientes al género *Psilocybe*, con 140 especies aproximadamente, de las cuáles 80 presentan propiedades alucinógenas, que juegan un importante papel en la cultura indígena de América, en sus ceremonias mágico-religiosas. Una de las principales especies es la *Psilocybe semilanceata* que contiene una mezcla de los alcaloides psilocibina, psilocina (correspondiente compuesto desfosforilado), y de su precursor, baeocistina (figura 9.4), todos ellos derivados del triptófano. Se puede encontrar en forma de hongo seco o en forma de polvo. La identificación de estas especies cuando aparecen en un caso delictivo, y como ocurre siempre que se trata de hongos, requieren del trabajo de expertos micólogos.

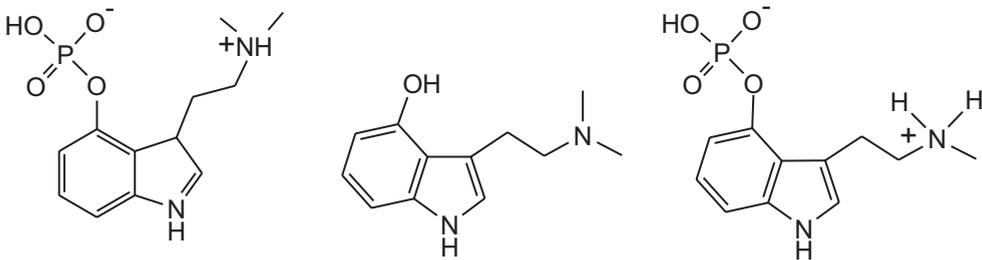


FIGURA 9.4. Psilocibina, Psilocina y Baeocistina respectivamente.

Drogas **alucinógenas** de origen natural, como la mescalina y la psilocina, se han consumido desde hace mucho tiempo en América Central y Sudamérica. Entre las de origen sintético están el LSD y algunas fenetilaminas, como el DOB. Denominadas a veces drogas psicodélicas, se cree que actúan interfiriendo en el cerebro con los receptores de serotonina.

Opio y Heroína. La heroína o diacetilmorfina es una droga semisintética obtenida por acetilación de la morfina, uno de los principios activos del opio, con anhídrido acético o cloruro de acetilo. El **opio**, que en griego significa jugo, es el látex desecado (pasta de color café oscuro y sabor acre y amargo), extraído de las cápsulas inmaduras de una variedad de amapola, la adormidera o **Papaver Somniferum**. Contiene cerca de 25 alcaloides, que se pueden clasificar en cuatro grupos principales: 1. grupo de la morfina (morfina, tebaína y codeína), 2. grupo de la papaverina, 3. grupo de la narcotina o noscapina y 4. grupo de la narceína.

En los últimos años la mayor parte de la heroína que se consume en Europa procede del Sudoeste Asiático (Paquistán, Afganistán y Turquía). Se puede encontrar como un polvo blanco cristalino que contiene 80% de diacetilmorfina en forma de sal, 5% de acetil codeína y 3% de monoacetilmorfina, o como un polvo marrón que contiene principalmente 60% de diacetilmorfina en forma de base, 5% de acetilcodeína, 3% de monoacetilmorfina, 10% de noscapina y 4% de papaverina. La figura 9.5 muestra la estructura de los principales alcaloides encontrados en la heroína.

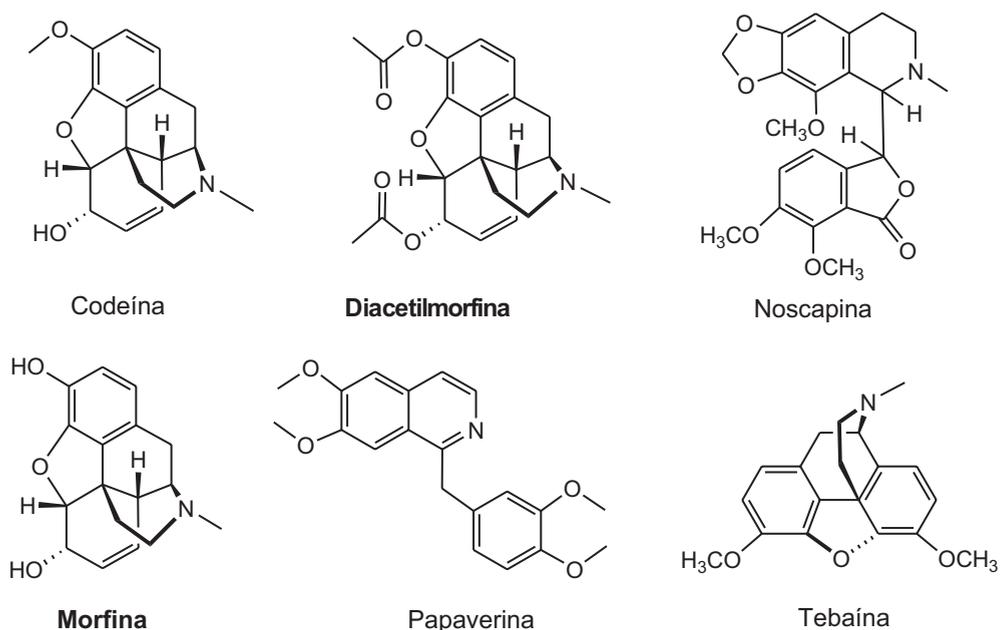


FIGURA 9.5. Heroína y principales alcaloides presentes en el opio.



La heroína, junto a otros compuestos de origen sintético (metadona, meperidina o fentanilo) pertenece al grupo de *analgésicos* denominados *narcóticos*, *hipnóticos* u *opiáceos*.

Opiáceos. Son sustancias que alivian el dolor al ejercer una acción depresora del sistema nervioso central. Sustancias como el opio y la morfina fueron introducidas en Estados Unidos por los inmigrantes chinos a mediados de 1800. En 1875, San Francisco aprobó una ley de regulación de drogas.

Su abuso constituye una de las primeras causas de enfermedad y muerte relacionada con drogas. La heroína se adultera con mucha frecuencia con quinina, ya que ambas tienen un sabor amargo, y también con manitol, lactosa, cafeína y procaina.

La *vicodina*, sustancia muy conocida a raíz de la emisión de la serie televisiva «House», es el nombre comercial de la *hidrocodona*, otro opioide derivado de la codeína que se receta como analgésico y que puede producir dependencia. Al ser una droga de prescripción, su forma de obtención como droga de abuso es diferente (robo en farmacias, prescripciones ilegales...).

LSD. Es la dietilamida del ácido lisérgico, droga con propiedades alucinógenas, denominada también, «lisérgida» y «LSD-25», y comúnmente conocida como «ácido». Se prepara de forma semisintética a partir de la ergotamina, compuesto heterocíclico presente en el hongo cornezuelo (*Claviceps purpúrea*) (figura 9.6), que se desarrolla en el ovario de las flores del centeno contaminando sus granos.

Durante la Primera Guerra Mundial, y como consecuencia del inadecuado almacenamiento de este grano, las personas que lo consumieron enfermaron presentando síntomas de dolor estomacal, delirio y alucinaciones debido a la presencia de este hongo.

Es una de las drogas de uso común más potentes, ya que es activa en dosis extremadamente bajas (entre 20 y 30 μg), 100 veces más activa que la psilocina o la psilocibina y, aproximadamente, 4000 veces más activa que la mescalina, y perteneciente como todas ellas a la familia de las triptaminas (que son monoaminas derivadas químicamente del aminoácido triptófano).

En su forma pura es inodora, incolora y algo amarga. Se puede encontrar en forma de gelatina, como tabletas fuertemente coloreadas, y más frecuentemente impregnada en papel secante, que es como se consiguen obtener dosis más homogéneas.

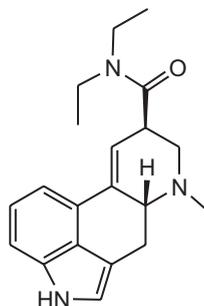


FIGURA 9.6. *Claviceps purpurea* y estructura química del LSD

Anfetaminas. Son fenetilaminas de estructura química semejante a la adrenalina. Esta denominación en plural engloba una serie de compuestos de origen sintético con propiedades estimulantes del SNC, psicodélicas y *entactógenas*. Entre ellos:

- *Anfetamina*: Es la primera que se sintetizó, hace aproximadamente cien años. En Europa, como droga de abuso, junto con el cannabis, ocupa el segundo lugar en consumo. En países como Norteamérica y Asia está más extendido el consumo de la metanfetamina (figura 9.7), conocida popularmente como speed. Ambas, anfetamina y metanfetamina generalmente se encuentran en forma de polvo blanco, adulteradas con cafeína o glucosa.

La anfetamina es una molécula quiral, siendo la dextroanfetamina (isómero dextrógiro, comercializada como dexedrina), la responsable casi al 100% de la actividad farmacológica del compuesto.

- *Derivados de anfetamina*, entre ellos (figura 9.7) la MDA o «droga del amor». La MDMA, conocida como «éxtasis cristal», que se sintetizó de forma accidental en 1912, y se presenta en forma de tabletas con logos característicos. La MBDB y la MDEA conocida en la calle como «Eva o Intelecto». Estas sustancias tienen propiedades duales, efec-

tos alucinógenos y estimulantes y se incluyen dentro de la categoría de sustancias denominadas «*empatógenos* o *entactógenos*».

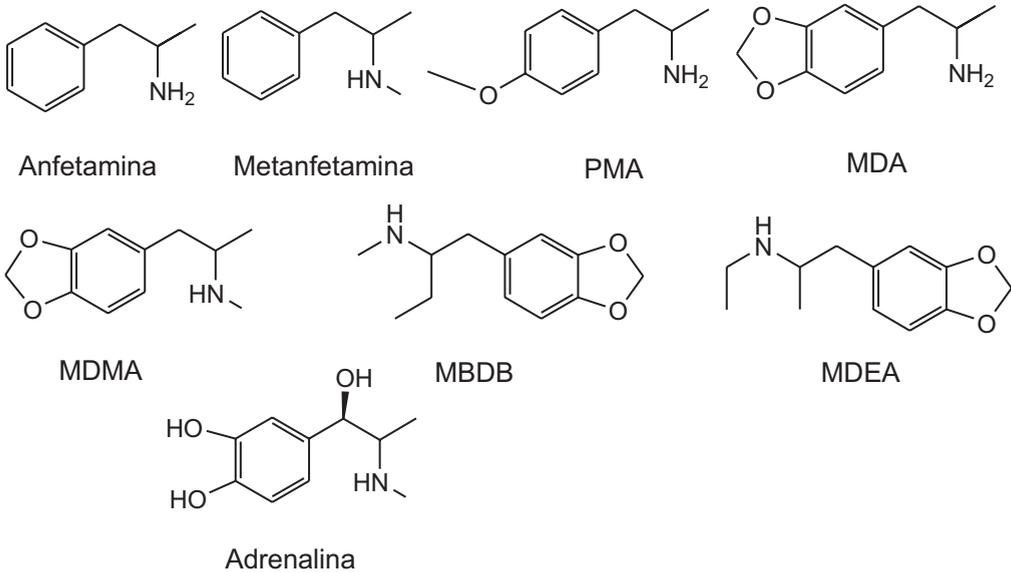


FIGURA 9.7. Estructura química de la adrenalina y algunas anfetaminas.

Los términos *empatógeno* y *entactógeno* se usan para designar a una subclase de sustancias psicoactivas que producen efectos emocionales y sociales similares a los producidos por el MDMA (éxtasis); euforia, disminución de la ansiedad y sensación de intimidad con los demás.

A continuación (figura 9.8) se describen dos de los procedimientos para la síntesis de anfetamina a partir de 1-fenil-propan-2-ona. El primero de ellos, la reacción de Leuckart, se utiliza en Europa Occidental, mientras que el segundo, es más utilizado en Estados Unidos.

Barbitúricos y Benzodiacepinas: Drogas de uso considerado lícito (drogas de prescripción). Los barbitúricos, derivados del ácido barbitúrico (amobarbital, pentobarbital, fenobarbital, etc), y las benzodiacepinas (lorazepam, diazepam, flurazepam, flunitracepam o rohypnol...), ambas con actuación sobre el SNC (psicotrópicos).

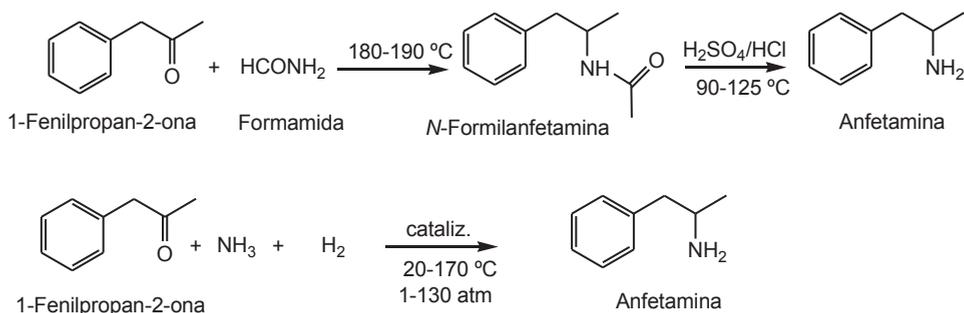


FIGURA 9.8. Síntesis de anfetamina a partir de 1-fenil-propan-2-ona.

9.4. IDENTIFICACIÓN DE DROGAS DE ABUSO

El análisis de drogas, como una parte de la toxicología forense, está cobrando cada vez más importancia, debido al aumento en el consumo de este tipo de sustancias, existiendo además en muchos casos una fuerte relación droga de abuso-actividad criminal.

Las distintas formas en que se presentan estas drogas, su origen desconocido y la cantidad de aditivos que las acompañan, hacen que su identificación sea compleja. No hay que olvidar que el mercado ilícito en el que se adquieren estas sustancias no está sujeto a los controles gubernamentales que aseguran su calidad. El químico forense habrá de diseñar un plan de análisis que le permita identificar de forma concluyente la sustancia problema, y deberá, además, estar preparado para defender sus resultados en un juicio.

En la identificación de drogas, se podrían contemplar dos aspectos diferenciados:

- El análisis de evidencias físicas, que es el que se abordará en este tema y que permite dar respuestas a preguntas como, ¿qué droga se ha incautado?, ¿en qué cantidad? o ¿con qué otras sustancias están mezcladas?
- El análisis de evidencias biológicas en individuos vivos o postmortem (autopsia) que permitirá determinar ¿qué sustancia se administró? y ¿cuándo se la administró? En este contexto que incluye, entre otros, estudios farmacocinéticos, determinación de toxicidad y de metabolitos de la sustancia, son importantes las pruebas inmunológicas, cuyo fundamento se ha explicado en el tema 8.



9.5. ANÁLISIS DE EVIDENCIAS FÍSICAS

Determinar el perfil o «huella dactilar» de una droga facilitará, en muchos casos, información acerca:

- Del procedimiento de síntesis o método de extracción utilizados.
- De los diluyentes, adulterantes o impurezas existentes.
- De su origen geográfico.

Además de identificar y cuantificar una droga, el químico forense tendrá en muchas ocasiones que determinar las sustancias que generalmente la acompañan y cuya finalidad es «aparentar» un mayor porcentaje de droga del que realmente existe. Son los denominados *agentes de corte*, que se eligen en base a su similitud con alguna propiedad física o química de la droga a la que acompañan. Por ejemplo, la heroína y la quinina presentan ambas sabor amargo.

Los agentes de corte se pueden incluir en tres categorías:

- *Diluyentes*: sustancias que no tienen propiedades farmacológicas, como el azúcar o el bicarbonato de sodio.
- *Adulterantes*: Tienen actividad, unas veces similar a la de la droga que acompañan y otras no. Por ejemplo, la cocaína se puede cortar con cafeína (ambas con efectos estimulantes), también con lidocaína (ambas con propiedades anestésicas).
- *Impurezas*: Sustancias que acompañan a la droga si son productos naturales o que se han ido incorporando en los procesos de síntesis o extracción.

El plan o esquema seguido en la caracterización de drogas, incluirá:

- *Un examen de las características físicas*: color y apariencia de la muestra y análisis del tamaño de partículas y un
- *Análisis químico*, que incluye dos tipos de pruebas que aportan, como veremos a continuación, distinta información
 - Pruebas de barrido o «screening» y
 - Pruebas de discriminación o confirmación

9.5.1. Pruebas de barrido o «screening»

Se utilizan para determinar la posible presencia de sustancias controladas en una muestra y tratar de clasificarlas dentro de unas categorías generales (opiáceos, opiáceos sintéticos, benzodiazepinas, barbitúricos...). Permiten reducir la enorme variedad de estos productos a un número de sustancias más manejable, para a continuación en una segunda fase tratar de identificar la sustancia. Entre ellos, los test de color y los de estructura microcristalina, la cromatografía en capa fina y la espectroscopía ultravioleta. Existen en el mercado kits de reactivos para la realización de los test de color.

Pruebas basadas en el color

Son test que no permiten obtener resultados concluyentes. En ellos, la muestra objeto de análisis se pone en contacto con una serie de reactivos; el color que se desarrolla, (tono, intensidad y tiempo que tarda en aparecer) y la comparación, a continuación, con los colores de los patrones existentes, permite tener una idea acerca de la sustancia de que se trata o del grupo al que pertenece. Dependiendo del reactivo que se utilice, existen diferentes tipos de test. Los más usados son,

Test de Marquis. Es uno de los test más utilizados en el análisis de drogas. El reactivo consiste en una mezcla de formaldehído y ácido sulfúrico. Da positivo para heroína, morfina (color violeta) y la mayoría de opiáceos y también con algunas anfetaminas y metanfetaminas, entre púrpura y amarillo (figura.9.9). La *p*-metoxianfetamina (PMA), es, sin embargo, un ejemplo de un derivado anfetamínico que no experimenta cambio de color en este ensayo.

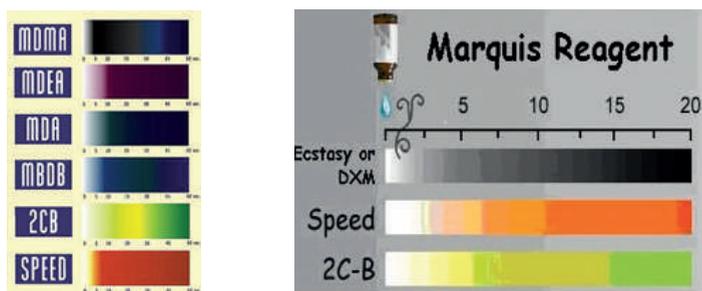


FIGURA 9.9. Izquierda: colores observados con el reactivo de Marquis para algunas anfetaminas. Derecha: Desarrollo del color con el tiempo.

El mecanismo de reacción es complejo y no del todo conocido, y el producto formado es un dímero de la molécula original que presenta una mayor conjugación lo que se traduce en muchos casos en la aparición de color (ver tema 3, sección 3.4.2).

El color naranja producido (figura 9.10) aunque es muy característico, no permite diferenciar de forma concluyente entre la anfetamina (amina primaria) y la metanfetamina (amina secundaria).

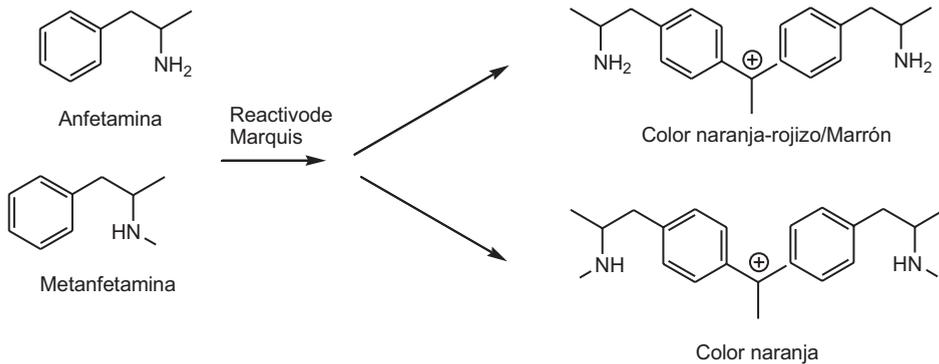


FIGURA 9.10. Mecanismo de reacción propuesto para la Anfetamina y la Metanfetamina con el reactivo de Marquis.

Es necesario un test adicional, en este caso el *test de Simon*, mezcla de tres reactivos, acetaldehído, una disolución de nitroprusiato de sodio, $\text{Na}_2[(\text{CN})_5\text{FeNO}]$, y otra disolución de carbonato de sodio. En el caso de la metanfetamina se observa la formación de un complejo de color azul (figura 9.11).

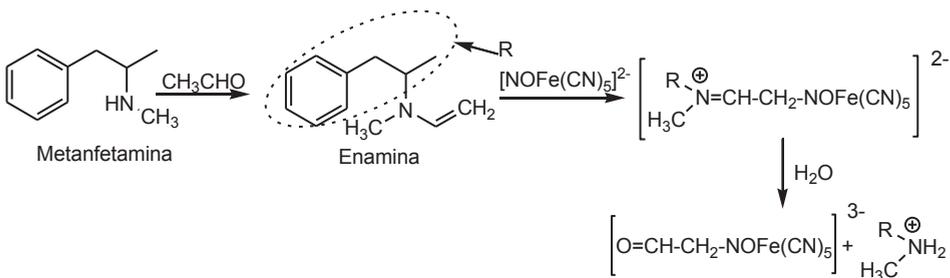


FIGURA 9.11. Mecanismo propuesto para la reacción de Metanfetamina con el reactivo de Simon.

Test de Duquenois-Levine. Utilizado en la detección de THC. El reactivo está formado por tres componentes (A, B y C). **A** es una mezcla de acetaldehído y de vainillina en etanol, **B** es una disolución de ácido clorhídrico concentrado, y **C** es cloroformo. Al añadir las tres disoluciones a la muestra que se va a analizar se forman diferentes capas. Si en la capa más densa, que es la de cloroformo, se observa un color púrpura, puede ser indicativo de la presencia de THC (figura 9.12). Este test, como ocurre en otros casos, no es excluyente para esta sustancia, ya que puede dar positivo para una variedad de extractos vegetales, como son los derivados del resorcinol (*m*-dihidroxibenceno).

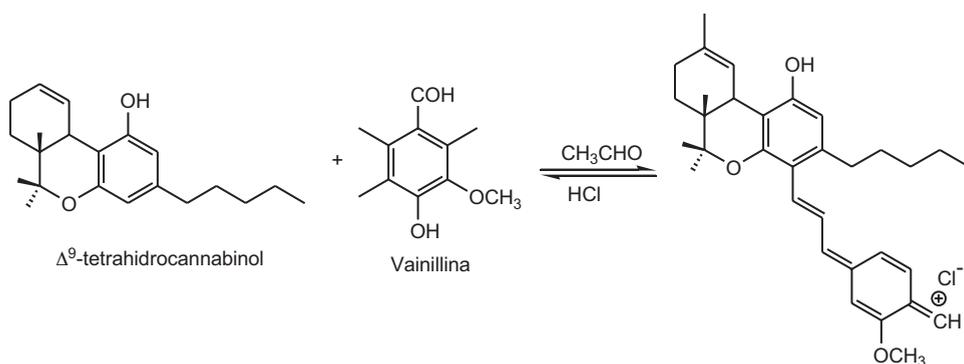


FIGURA 9.12. Detección del THC mediante la reacción de Duquenois-Levine.

Test de Van Urk. Muy utilizado, dada su alta sensibilidad para detectar la presencia de LSD. Este reactivo, denominado a veces también como *reactivo de Ehrlich*, consiste en una disolución de *p*-dimetilaminobenzaldehído (*p*-DMAB) en ácido clorhídrico y etanol del 95% a partes iguales. Cuando esta disolución se añade a la muestra que presuntamente contiene LSD (figura 9.13), se observa la aparición de un color azul-morado. Este test también da resultados positivos con otros alcaloides indólicos como la psilocina y la psilocibina.

El reconocimiento de marihuana al microscopio (las hojas poseen unas características botánicas fácilmente reconocibles) junto con un resultado positivo en el test de Duquenois-Levine, constituye una identificación positiva para esta sustancia. No ocurre lo mismo si se encuentra como hachís, siendo necesaria la realización de otras pruebas.

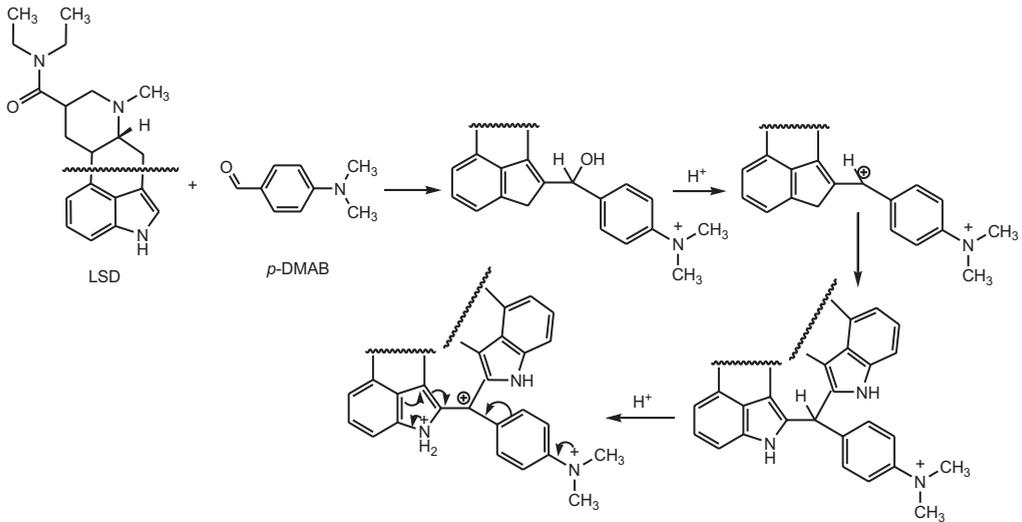
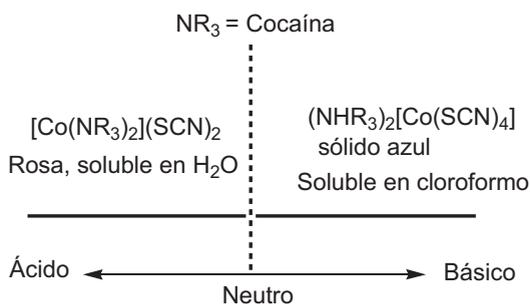


FIGURA 9.13. Mecanismo de reacción propuesto para el LSD con el reactivo de Ehrlich.

Relacionados con el test de Simon, anteriormente mencionado, se encuentran otra serie de tests, en los que el desarrollo de color está basado en la formación de complejos con metales de transición. Estos complejos de coordinación se producen por interacciones entre cationes de metales, como Fe, Cu, Co, V y Se, y átomos con pares de electrones sin compartir, como N, presente en muchos alcaloides y aminas.

Test de Scott. El reactivo de Scott inicialmente consistía en una disolución acuosa de tiocianato de cobalto (II), de color rosa, en medio ácido. Actualmente se utiliza el reactivo de Scott modificado que está formado por tres componentes: **1.** tiocianato de cobalto (II) $\text{Co}(\text{SCN})_2$ en ácido acético al que se añade glicerina. **2.** Ácido clorhídrico concentrado. **3.** Cloroformo

El fundamento del test es la formación de distintos complejos coloreados entre la cocaína (forma cationica) y el complejo de cobalto (forma aniónica), en función del pH del medio. Así, y de acuerdo con el siguiente esquema, en condiciones ácidas, se forma el complejo $[\text{Co}(\text{NR}_3)_2](\text{SCN})_2$ de color **rosa** que es soluble en agua, mientras que a pH básico se formaría el complejo $[\text{NHR}_3]_2[\text{Co}(\text{SCN})_4]$, de color **azul**, que es soluble en cloroformo



Se trata de una prueba química muy utilizada para detectar la presencia de cocaína (figura 9.14), un alcaloide de carácter básico débil (pKa = 8,6). Este test permite, además diferenciar entre las dos formas de cocaína: la cocaína básica o “crack”, insoluble en agua, y el clorhidrato de cocaína, una sal y por tanto soluble en agua.

El procedimiento que consta de tres etapas, consiste en:

- **Etapa 1:** Colocar, en un tubo de ensayo, una pequeña cantidad de muestra (aproximadamente 1 mg) de la que se sospecha que es cocaína, añadir unas gotas del reactivo **1** y agitar el tubo. La cocaína produce un precipitado azul y una coloración azul en la disolución.
- **Etapa 2:** Añadir una gota del reactivo **2** y agitar. La disolución azul, en caso positivo, se volvería rosa.
- **Etapa 3.** Añadir unas gotas del reactivo **3** y agitar. Si hay cocaína presente (en cualquiera de las dos formas), la capa inferior de cloroformo se volverá de un intenso color azul, mientras que la capa superior adquirirá una tonalidad rosa.

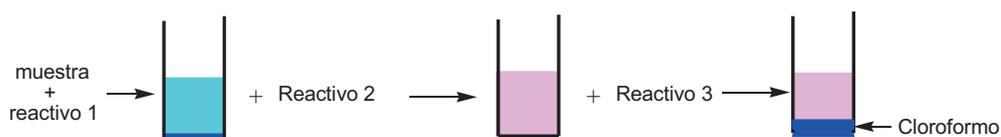


FIGURA 9.14. Colores observados en la reacción entre una muestra de clorhidrato de cocaína y el reactivo Scott.

Existen en el mercado diferentes kits con esta preparación entre ellos el llamado NARK II, representado en la figura 9.15, para el ensayo de cocaína.

Así, y tal y como se representa en el envase, cuando a la muestra se añade la primera ampolla de reactivo, se producirá disolución de color azul si la forma de cocaína presente es el clorhidrato, mientras que en el caso del «crack» al no ser soluble en agua, lo que se observará serán unas pequeñas manchas azules en una disolución de color rosa. Ambas formas de cocaína, desarrollan un color rosa con la segunda ampolla del reactivo y finalmente, también color rosa sobre la capa azul de cloroformo en la tercera ampolla.



FIGURA 9.15. Kit comercial conteniendo el reactivo de Scott.

Otras drogas, la mayoría con valores de pK_a superiores a la cocaína, como la anfetamina ($pK_a = 9,8$), la difenhidramina, un antihistamínico comercializado como benadryl ($pK_a = 9,0$) o la procaína ($pK_a = 9,0$) y también la lidocaína (con valor de $pK_a = 7,9$, inferior al de la cocaína), dan también positivo el test de Scott. Es decir, que esta no sería una prueba concluyente, solo de presunción, es decir orientativa en la identificación de cocaína, aunque si permitiría descartar la presencia de sustancias como metanfetamina, heroína o LSD en la muestra.

De acuerdo con lo publicado en la patente US 6133040 el 17 de octubre de 2010, las sustancias con valores de pK_a mayores al de la cocaína y que dan falsos positivos en el test de Scott, podrían ser discriminadas, utilizando un indicador de pH, como el éster etílico de la tetrabromofenoltaleína, en disolventes tipo cloroformo, diclorometano o 1,2-dicloroetano, inmiscibles todos

ellos con el agua y una disolución tampón de pH = 7. El método propuesto consistiría en:

- Colocar una pequeña cantidad de la muestra que se sospecha es cocaína en un tubo de ensayo y añadir unas gotas del indicador de pH. Si la disolución, inicialmente de color amarillo se vuelve de color verde intenso confirmaría la presencia de «crack» en la muestra.
- Si, por otro lado, la disolución amarilla anterior no cambia de color, añadir entonces unas gotas de la solución tampón de pH = 7, agitar y observar. Si la fase orgánica (fase inferior) se vuelve de color verde oscuro, la sustancia es el clorhidrato de cocaína.

Las otras sustancias, mencionadas anteriormente y que dan positivo el test de Scott, darían con este método colores rojo-púrpura y la lidocaína color marrón claro por lo que quedarían descartadas.

Test de Dilli-Koppanyi. Se utiliza habitualmente en las detecciones de barbitúricos (depresores del SNC), entre ellos, tranquilizantes como el fenobarbital, hipnóticos como el pentobarbital sódico (nembutal), sedantes como el secobarbital (seconal) y amobarbital o anestésicos como el pentotal sódico. El reactivo está formado por dos disoluciones (**A** y **B**). **A** es una solución de acetato de cobalto (II), $\text{Co}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ en metanol o isopropanol a la que se añaden unas gotas de ácido acético glacial. **B** consiste en una disolución de isopropilamina en metanol. La prueba se realiza añadiendo a la muestra dos partes de la disolución **A** y una de la **B**, observándose un color azul violeta si hay presencia de barbitúricos.

Test de Mandelin. El reactivo es una disolución de vanadato de amonio (NH_4VO_3) en ácido sulfúrico concentrado. Se utilizó en un principio para la detección de ketamina (color naranja-rojizo oscuro), y PMA (marrón-rojizo) pero reacciona también con otras sustancias, entre ellas una gran variedad de alcaloides, como la morfina (gris oscuro-marrón rojizo), codeína (verde oliva), cocaína (naranja), heroína (marrón), y otras sustancias como el éxtasis (negro azulado), la metanfetamina (amarillo-verdoso), esteroides y también con la aspirina.

Test de Mecke. El reactivo es una disolución de ácido selenioso (H_2SeO_3) en ácido sulfúrico concentrado que se adiciona a la muestra a analizar. Utilizado para identificar, presumiblemente, opiáceos en general (heroína, morfina y codeína (azul verdoso) y otros compuestos como,



DXM (amarillo) o MDMA/MDA/MDE (verde-azul oscuro). Sustancias como anfetamina, cocaína o ketamina no reaccionan.

Este tipo de pruebas presenta como ventajas su sencillez de manejo y su bajo coste y como inconveniente la posibilidad de dar «falsos positivos».

Un falso positivo es un resultado de un test que sugiere que una sustancia está presente en una muestra cuando realmente no es así.

La tabla 9.1 muestra comparativamente los colores observados, para una serie de sustancias, utilizando los test de Mandelin, Marquis y Mecke.

TABLA 9.1. Colores, que no tonalidad, observados con los reactivos de Mandelin, Marquis y Mecke.

Sustancia	Test de Mandelin	Test de Marquis	Test de Mecke
Metanfetamina	Verde oscuro	Naranja / marrón	No reacciona
Anfetamina	Verde oscuro	Naranja / marrón	No reacciona
PMA	Verde / marrón	No reacciona	No reacciona
Ketamina	Naranja /marrón	No reacciona	No reacciona
2C-B	No reacciona	Verde	No reacciona
2C-I	No reacciona	Verde	No reacciona
DXM	No reacciona	Gris	Amarillo
Opiáceos	No reacciona	Rosa/rojo/morado	Verde

Pruebas de estructura microcristalina

Los test de color, como se ha visto, ayudan en la caracterización de una sustancia, pero, en general no son específicos. Sin embargo, la técnica basada en la determinación de la estructura cristalina es considerablemente más específica, aunque no permite cuantificar la cantidad.

Una pequeña cantidad de droga, colocada en un porta o en un micro-tubo, reacciona con unas gotas de un reactivo específico y da lugar a la aparición de pequeños cristales de estructura y tamaño dados (figura 9.16). Estos cristales se examinan con un microscopio óptico, con lo que se obtienen microfotografías o micro vídeos, y posteriormente se comparan con la vasta librería de imágenes existente. Una disolución acuosa al 10% de acetato de sodio, añadida a una muestra de heroína, da lugar a la formación de micro-cristales hexagonales, mientras que si la muestra contiene quinina el aspecto de los cristales será irregular y con forma alargada. Por otro lado, si a esa misma muestra de heroína se añade cloruro de mercurio como reactivo, se observarán cristales con forma de rama de arbusto. Existen cientos de estos test de estructura cristalina, rápidos de realizar y cuyos resultados dependen de las condiciones en que se realizan. Pueden aplicarse a moléculas con diferentes tamaños, formas y grupo funcional, permitiendo distinguir incluso entre enantiómeros.

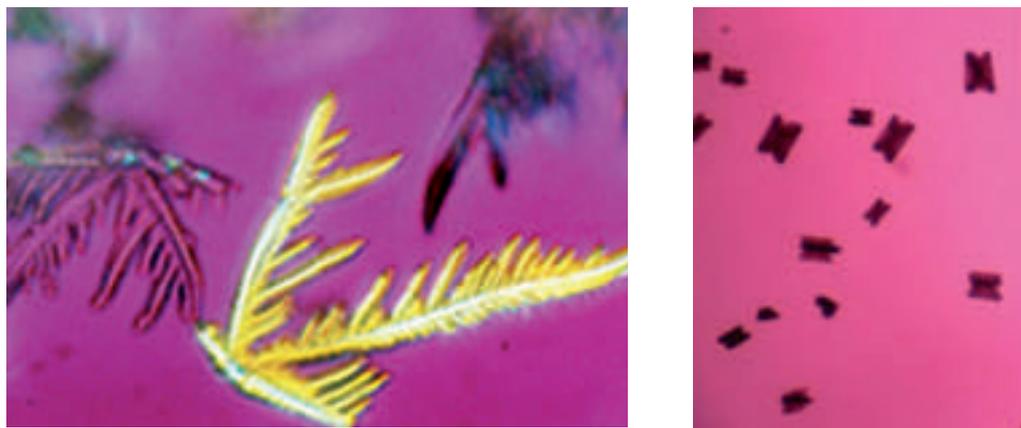


FIGURA 9.16. Micro-cristales de cocaína utilizando cloruro de mercurio como reactivo (izquierda) y de fenciclidina, utilizando permanganato potásico (derecha).
(Foto obtenida de Miami-Dade Police).

Cromatografía en capa fina (TLC)

Esta técnica cromatográfica (secciones 2.2 y 4.6.3), permite separar productos presentes en una mezcla en base a su solubilidad y sus propiedades físicas (tamaño, forma e interacción con la fase estacionaria).



Espectroscopia Ultravioleta (UV)

La absorción selectiva de luz por una sustancia en la región UV (100 - 400 nm) del espectro electromagnético constituye una herramienta de gran utilidad a la hora de caracterizar una droga.

El espectro UV obtenido para una droga desconocida no es una prueba concluyente para su identificación positiva (otros compuestos pueden producir espectros iguales), pero sí para establecer su probable identidad. Conocida su identidad, podrá utilizarse para obtener una determinación cuantitativa, incluso en disoluciones acuosas.

9.5.2. Pruebas de discriminación o confirmación

Los resultados negativos en un análisis obtenido utilizando alguno de los procedimientos de «screening» anteriormente descritos, permiten descartar la presencia de determinadas sustancias en una muestra problema. Sin embargo, si el resultado es positivo, aunque se reducen las posibilidades en cuanto a las sustancias presentes, siempre será necesario realizar pruebas adicionales para confirmar la presencia de esas sustancias.

Los test de confirmación son test conducentes a confirmar o formar concluyente la identidad de una sustancia.

Las técnicas de mayor poder de discriminación (categoría A) a menor (categoría C), se encuentran recogidas en la tabla 9.2. De acuerdo con los métodos de análisis seleccionados, existen unas recomendaciones para asegurar que los resultados en una identificación de drogas sean razonables, exactos y defendibles en un juicio. Este documento recomienda que los resultados obtenidos utilizando una técnica del apartado A, (figura 9.17), vengán corroborados por los obtenidos en, al menos, otra técnica de cualquiera de las tres categorías (A, B y C). Si por el contrario no se utiliza ninguna técnica de la categoría A, habrán de obtenerse resultados coincidentes a partir de tres técnicas de la categoría B que no utilicen la misma propiedad química. Las técnicas agrupadas en la categoría C, aunque sin utilidad de discriminación, tienen su importancia como se ha descrito anteriormente (Test de color y UV) y en el caso del punto de fusión permite determinar el grado de pureza una, vez que ha sido identificada.

TABLA 9.2. Métodos analíticos clasificados de mayor (A) a menor (C) poder de discriminación

CATEGORÍA A	CATEGORÍA B	CATEGORÍA C
<ul style="list-style-type: none"> • Espectroscopía Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) • Espectroscopía Raman • Espectrometría de masas (MS) • Resonancia magnética nuclear (RMN) • Difracción Rayos X (DRX) 	<ul style="list-style-type: none"> • Electroforesis capilar (CE) • Cromatografía de gases (GC) • Cromatografía líquida (LC) • Test microcristalinos • Cromatografía en capa fina (TLC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Test de color • Espectroscopía ultravioleta (UV) • Puntos de fusión

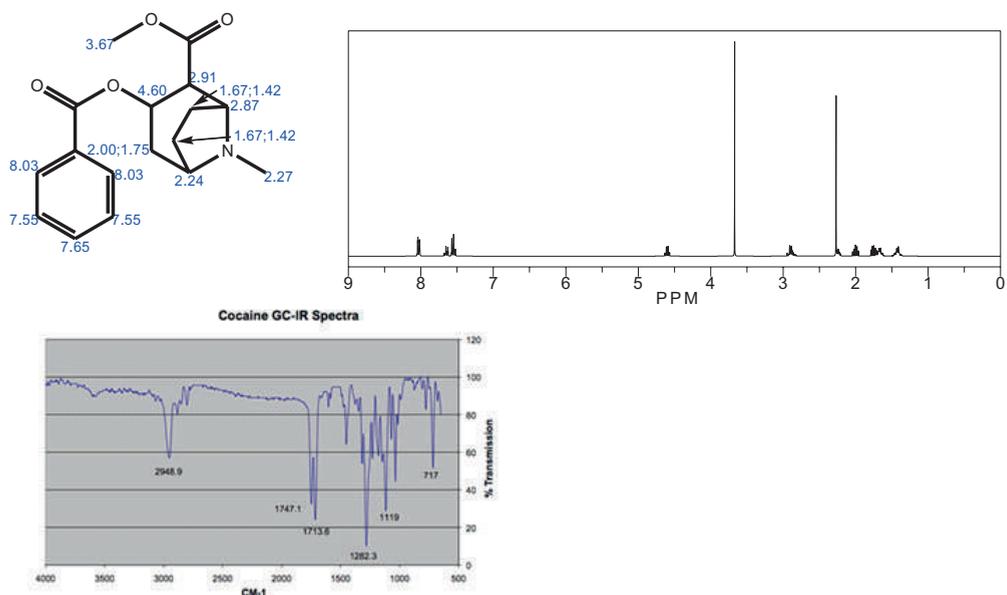


FIGURA 9.17. Espectros de ¹H RMN (parte superior derecha) e IR (parte inferior izquierda), para la cocaína. En azul las ppm correspondientes al espectro de ¹H RMN.



EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. Circulando en una carretera, un policía detiene un coche por exceso de velocidad. Cuando aparca en el arcén el agente observa que el conductor, de forma precipitada, guarda una bolsita de plástico en la guantera. Ante la sospecha de presencia de drogas, el policía pide al conductor que salga del vehículo y procede a su examen, encontrando en el interior de éste una serie de bolsas de plástico idénticas a la primera y que contienen un polvo blanco. El agente las requisa y las envía al laboratorio para su identificación. En el laboratorio, el químico procede a su identificación ante la sospecha de que pueda tratarse de cocaína. Para ello realiza el *test de Scott* y obtiene un resultado positivo.

- Describe en qué consiste el test de Scott y qué se observaría en el caso de que la sustancia fuera clorhidrato de cocaína.
- A partir de este resultado positivo, indique una sustancia de la que se podría afirmar que está ausente en la muestra **¿Por qué?**
- Este resultado, obtenido al realizar el test de Scott, ¿sería concluyente para identificar la muestra como cocaína sin ninguna duda? **¿Por qué?**

2. Se dispone en el laboratorio de una muestra presumiblemente de hachís.

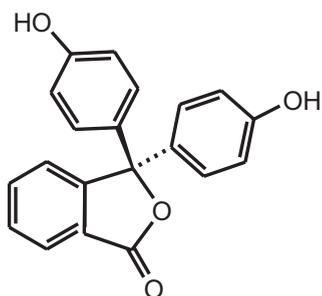
- Indique qué es esta sustancia, cuál es su origen y en qué forma se presenta.
- Clasifíquela, de acuerdo a sus propiedades farmacológicas e indique cuál es su principio activo.
- Indique y describa el test utilizado en su identificación (no es necesario escribir la reacción).

3. Complete los huecos indicados con puntos suspensivos.

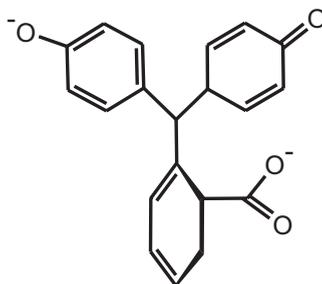
I. El es el látex extraído de la cápsula de la *Papaver somniferum*. **II.** El es la resina extraída de las flores de la planta de la marihuana. **III.** El principio activo de la marihuana, responsable de sus propiedades es el **IV.** La acción farmacológica de la morfina es de: **V.** La lidocaína tiene un Pk_a al de la cocaína.

4. La acción que como laxante catártico tiene la fenolftaleína, fue descubierta de forma accidental en Hungría hacia finales del siglo XIX. Aunque su uso como medicamento se ha limitado en base a sus posibles efectos cancerígenos, esta sustancia tiene diversas aplicaciones, por ejemplo, se utiliza en química como indicador de pH y también en los test de color como revelador de sangre.

En el rango de pH comprendido entre 0 y 12 la fenolftaleína existe en las dos formas abajo indicadas, una incolora (pH = 0-8,2) y la otra de color rosa (pH = 8,2-12).



Disoluciones ácidas o neutras
Incoloro



Disoluciones básicas
Rosa



Justifique el cambio de color observado.

NOTA: Para contestar esta pregunta consulte la bibliografía que estime oportuno.

Resolución

1. a) El reactivo de Scott está formado por estos tres componentes. **1.** Tiocianato de cobalto en ácido acético y glicerina. **2.** Ácido clorhídrico concentrado y **3.** Cloroformo.

El test consiste en poner en contacto la sustancia a analizar con 1, a continuación añadir una gota de 2, agitar y finalmente añadir unas gotas de 3.

En el caso de que se tratara de clorhidrato de cocaína, el resultado observado sería el siguiente:

Cuando la sustancia problema se pone en contacto con 1 se forma un precipitado **azul** y disolución **azul**. A continuación se añade 2 y el color de la disolución cambia a **rosa**. Finalmente, al añadir el componente 3, se observa la aparición precipitado **azul** en la capa inferior del cloroformo.

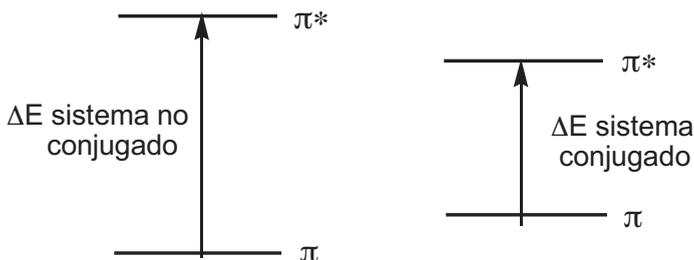
- b) Permite descartar la presencia de sustancias tales como heroína, metanfetamina o LSD en la muestra, lo que es debido a que no se observa coloración azul al añadir los reactivos anteriores.

- c) No sería concluyente, ya que otras sustancias diferentes a la cocaína, como la lidocaína, procaína o difenhidramina darían positivo el test de Scott. Habría que realizar otras pruebas que permitieran de forma inequívoca confirmar la presencia de esta sustancia en la muestra.
2. a) Es una de las formas más comunes de Cannabis. Se fuma a menudo mezclado con tabaco. Procede de la planta *Cannabis sativa*. Cuando se presenta en forma de resina, se denomina hachís.
- b) Todas las partes de la planta en mayor o menor proporción poseen el principio activo que es el Δ^9 -tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THC). Se clasifica como miscelánea por los efectos tan diferentes que presenta, a saber: euforia, sedación, analgesia y alucinaciones.
- c) El test de Duquenois-Levine se utiliza para la detección de tetrahidrocannabinol (THC).

El reactivo está formado por tres componentes. **A** (mezcla de acetaldehído y vainillina en etanol), **B** HCl concentrado y **C** cloroformo. Cuando al añadir los tres componentes a la mezcla se observa en la capa más densa que es la de cloroformo, un color púrpura, esto puede ser indicativo (identificación presuntiva) de la presencia de THC.

3. **I. Opio. II. Hachis** o «chocolate». **III. Δ^9 -THC** o Δ^9 -tetrahidrocannabinol. **IV.** Analgésico narcótico. **V.** Inferior.

4. En condiciones básicas, la fenolftaleína se encuentra en forma aniónica, lo que hace que aumente la conjugación de la molécula. El efecto de dicha conjugación es reducir la diferencia de energía entre los orbitales moleculares ocupados de mayor energía y los orbitales moleculares desocupados de más baja energía. Esta disminución permite que la molécula absorba en la zona azul del espectro visible. De esta forma lo que se observa es el color rosa (complementario del azul).



LECTURA



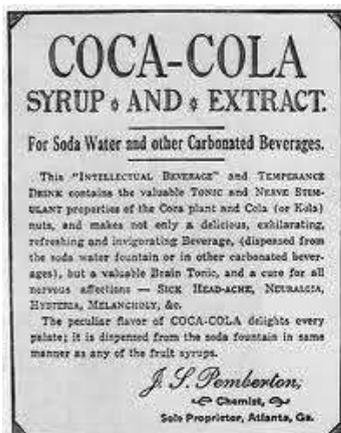
«Cocaína. Una breve historia»

La cocaína, un alcaloide tropánico, es uno de los estimulantes del sistema nervioso central de origen natural, más antiguos, potentes y peligrosos que existen, siendo la hoja de coca la única parte de la planta que contiene cocaína.

A pesar de la gran popularidad que alcanzó en los años setenta, ochenta y noventa del siglo veinte, no es una droga nueva, sino todo lo contrario. Los nativos habitantes de los Andes ya mascaban estas hojas para acelerar los latidos del corazón y contrarrestar así el «mal de altura».

En 1750 llegan a Europa, procedentes de Sudamérica los primeros arbustos de coca. En 1859 el químico alemán Albert Niemann aísla por primera vez el alcaloide y lo denomina «cocaína» y es en 1902 cuando Richard Willstätter, un investigador también alemán, galardonado con el premio Nobel de Química, realiza su síntesis. En la segunda mitad del siglo XIX la cocaína se utilizó para tratar la dependencia de la morfina, como anestésico y en elixires y tónicos, comenzando en esta época a ser muy popular en la vida social.

El psicoanalista austriaco Sigmund Freud, prescribía esta droga para curar la depresión y la impotencia sexual. En 1884, publica su obra Über Coca (sobre la coca), en la que ensalza sus beneficios, denominándola sustancia «mágica» y en 1895, siendo ya un consumidor habitual de cocaína, publica «La interpretación de los sueños».

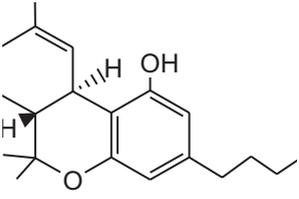
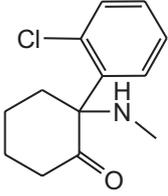
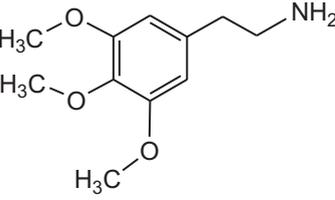
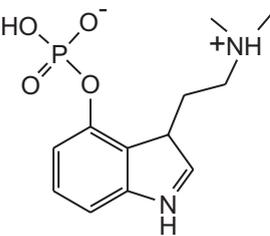
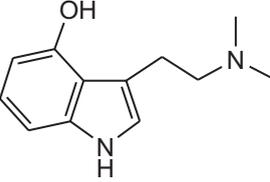


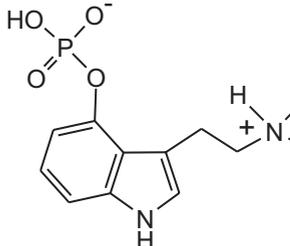
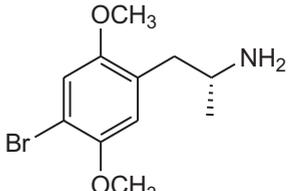
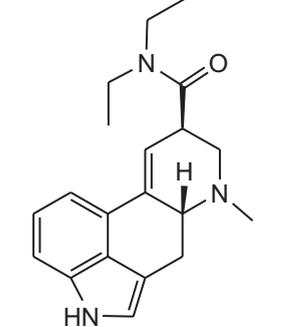
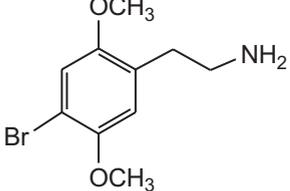
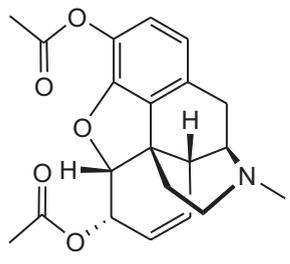
En 1886, alcanzó gran popularidad cuando el farmacéutico John S. Pemberton en su intento de dejar la morfina desarrolló una bebida refrescante «Coca cola», hecha con extractos de hoja de coca. En 1903 y conocido su potencial adictivo, este extracto se eliminó de la composición. No obstante, en esta época esnifar cocaína se convirtió en un hábito muy popular entre las clases adineradas.

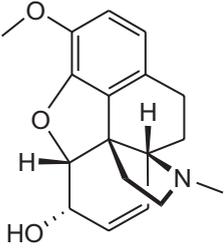
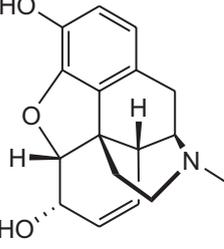
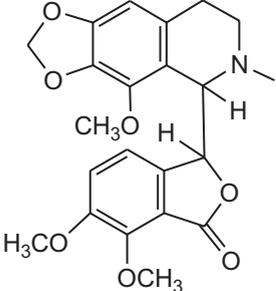
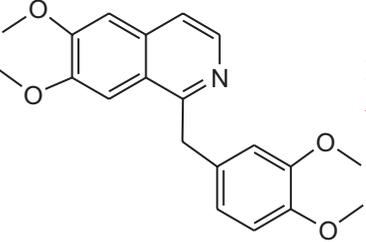
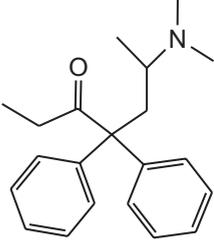
Los daños nasales y cardíacos causados y el número de muertes relacionadas con su consumo hicieron que en 1922 esta droga fuera prohibida oficialmente.

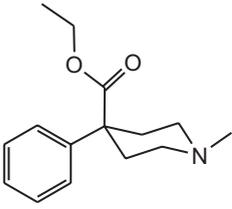
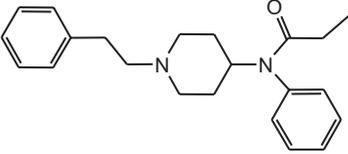
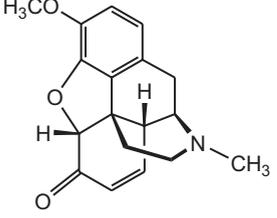
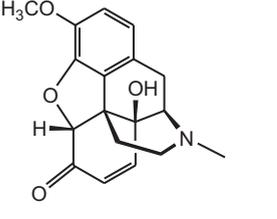
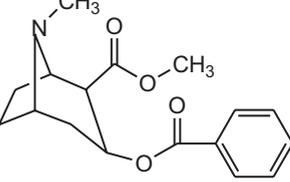
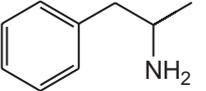
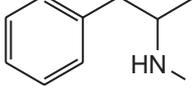
ANEXO

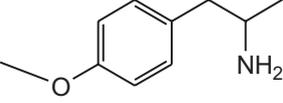
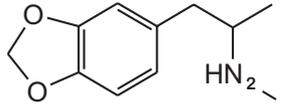
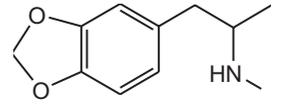
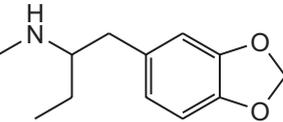
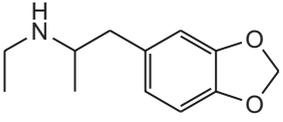
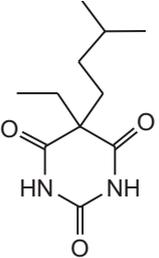
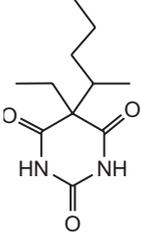
Estructura, denominación común o vulgar, nombre químico y acción farmacológica de sustancias presentes en el tema.

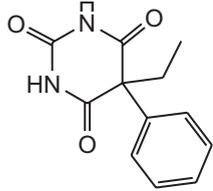
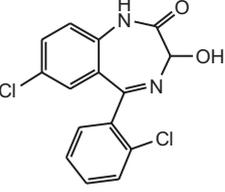
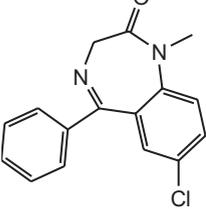
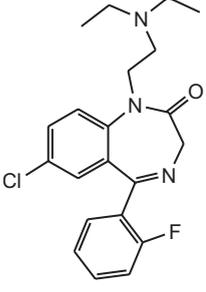
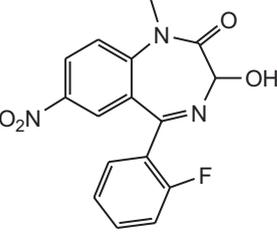
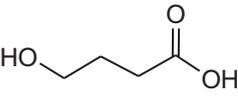
Estructura	Nombre común/ acción Farmacológica	Nombre químico
	Cannabis o Marihuana Miscelánea (Excitación, Depresión y alucinación)	Δ^9 -tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THC)
	Ketamina «Kit-Kat» «Special K», «K», «Vitamina K» Miscelanea (analgesico, anestésico, alucinógeno)	(RS)-2-2-clorofenil-2- metilamino ciclohexan-1-ona
	Mescalina Alucinógeno	2-(3,4,5-trimetoxifenil)- etilamina 3,4,5- trimetoxifenetilamina
	Psilocibina Alucinógeno	[3-(2-dimetilaminoetil)- 1H-indol-4-il] dihidrógeno fosfato
	Psilocina Alucinógeno	3-(2-(dimetilaminoetil)-1H- indol-4-ol 4-hidroxi-N,N-dimetil- triptamina

	<p>Baeocistina Alucinógeno</p>	<p>[3-(2-metilaminoetil)-1<i>H</i>-indol-4-il] dihidrógeno fosfato</p>
	<p>Brolamfetamina o DOB Alucinógeno</p>	<p>1-(4-bromo-2,5-dimetoxifenil)propano-2-amina</p>
	<p>LSD «lisérgida» «LSD 25», «ácido» Alucinógeno</p>	<p>Dietilamida del ácido lisérgico o (6<i>aR</i>,9<i>R</i>)-<i>N</i>, <i>N</i>-dietil-7-metil-4,6,6<i>a</i>,7,8,9-hexahidroindolo [4,3-<i>fg</i>]quinolina-9-carboxamida</p>
	<p>2 C-B «Erox», «Nexus» Alucinógeno</p>	<p>2-(4-Bromo-2,5,dimetoxifenil)etilamina</p>
	<p>Morfina Analgésico narcótico</p>	<p>(5<i>α</i>,6<i>α</i>)-7,8-didehidro-4,5-epoxi-17-metilmorfinan-3,6-diol</p>

	<p>Codeína o Metilmorfina Analgésico narcótico</p>	<p>(5α,6α)-7,8-didehidro-4,5-epoxi-3-metoxi-17-metilmorfinan-6-ol</p>
	<p>Diacetilmorfina Analgésico narcótico</p>	<p>diacetato de (5α,6α)-7,8-didehidro-4,5-epoxi-17-metilmorfinan-3,6-diol</p>
	<p>Noscapina Analgésico narcótico</p>	<p>(3S)- 6,7-dimetoxi-3-[(5R)-5,6,7,8-tetrahidro-4-metoxi-6-metil-1,3-dioxolo(4,5-g)isoquinolin-5-il]-1(3H)-isobenzofuranona</p>
	<p>Papaverina Analgésico narcótico</p>	<p>1-[(3,4-dimetoxifenil)metil]-6,7-dimetoxiisoquinolina</p>
	<p>Metadona «Dolofina» Analgésico narcótico</p>	<p>(RS)-6-(dimetilamino)-4,4-dipfenilheptan-3-ona</p>

	<p>Meperidina Analgésico narcótico</p>	<p>4-fenil-1-metil-piperidina-4-carboxilato</p>
	<p>Fentanilo Analgésico narcótico</p>	<p><i>N</i>-(1-(2-feniletil)-4-piperidinil)-<i>N</i>-fenilpropanamida</p>
	<p>Hidrocodona Analgésico narcótico</p>	<p>4,5a-epoxi-3-metoxi-17-metilmorfinan-6-ona</p>
	<p>Oxidodona Analgésico narcótico</p>	<p>(5<i>R</i>,9<i>R</i>,13<i>S</i>,14<i>S</i>)-4,5-α-epoxi-14-hidroxi-3-metoxi-17-metil-morfinan-6-ona</p>
	<p>Cocaína Estimulante del SNC</p>	<p>Benzoilmetilecgonina (1<i>R</i>,2<i>R</i>,3<i>S</i>,5<i>S</i>)-3-(benzoiloxi)-8-metil-8-azabicyclo [3.2.1]octano-2-carboxilato de metilo</p>
	<p>Anfetamina Estimulante del SNC</p>	<p>(\pm)-1-fenilpropan-2-amina</p>
	<p>Metanfetamina «speed», «hielo», «ice» Estimulante del SNC</p>	<p><i>N</i>-metil-1-fenilpropan-2-amina</p>

 <p style="text-align: center;">PMA</p>	<p>PMA «éxtasis rosa», «doctor muerte» Antidepresivo Propiedades psicodélicas</p>	<p>1-(4-metoxifenil)propan-2-amina <i>p</i>-metoxianfetamina <i>p</i>-metoxi-α-metilfenetilamina</p>
	<p>MDA «píldora del amor» «droga del abrazo» «trébol» Alucinógeno Estimulante del SNC</p>	<p>3,4-metilenodioxianfetamina Tenamfetamina</p>
	<p>MDMA «éxtasis», «adám» «la droga del amor», «pasti», «rola» Alucinógeno Estimulante del SNC</p>	<p>3,4-metilenodioximetanfetamina</p>
	<p>MBDB «Edén» Alucinógeno Estimulante del SNC</p>	<p>3,4-metilenodioxi-α-etilmetanfetamina</p>
	<p>MDEA «Eva» Alucinógeno Estimulante del SNC</p>	<p>3,4-metilenodioxi-etilanfetamina 1-(benzo[<i>d</i>][1,3]dioxol-5-il)etilpropan-2-amina</p>
	<p>Amobarbital Depresor del SNC</p>	<p>5-etil-5-(3-metilbutil)pirimidin-2,4,6(1<i>H</i>,3<i>H</i>,5<i>H</i>)-triona</p>
	<p>Pentobarbital Depresor del SNC</p>	<p>5-etil-5-(1-metilbutil)pirimidin-2,4,6(1<i>H</i>,3<i>H</i>,5<i>H</i>)-triona</p>

	<p>Fenobarbital Depresor del SNC</p>	<p>5-etil-5-fenilpirimidin-2,4,6(1<i>H</i>,3<i>H</i>,5<i>H</i>)-triona</p>
	<p>Lorazepam Depresor del SNC</p>	<p>(<i>RS</i>)-9-cloro-6-(2-clorofenil)-4-hidroxi-2,5-diazabicyclo[5.4.0]undeca-5,8,10,12-tetraen-3-ona</p>
	<p>Diazepam Depresor del SNC</p>	<p>7-cloro-1,3-dihidro-1-metil-5-fenil-2<i>H</i>-1,4-benzodiazepin-2-ona</p>
	<p>Flurazepam Depresor del SNC</p>	<p>7-cloro-1-[2-(diethylamino)etil]-5-(2-fluorofenil)-1,3-dihidro-2<i>H</i>-1,4-benzodiazepin-2-ona</p>
	<p>Flunitrazepam o Rohypnol Depresor del SNC</p>	<p>6-(2-fluorofenil)-2-metil-9-nitro-2,5-diazabicyclo[5.4.0]undeca-5,8,10,12-tetraeno-3-ona</p>
	<p>GHB «Extasis líquido» Depresor del SNC (analgésico, anestésico)</p>	<p>Ácido γ-butírico Ácido 4-hidroxibutanoico</p>

VENENOS EN LA TOXICOLOGÍA FORENSE

10



Planta de acónito: bella flor, terrible veneno

Soledad Esteban Santos

OBJETIVOS

General

Reconocer la implicación de la química en el estudio de los venenos, en el sentido de determinar su mecanismo de acción, procedimientos de detección y posibles formas de contrarrestar sus efectos en el organismo.

Específicos

1. Explicar el significado de los conceptos de tóxico, veneno y toxicidad.
2. Diferenciar entre los conceptos de antídoto y antagonista.
3. Justificar por qué determinadas sustancias sirven como antídoto o antagonista de ciertos venenos, en función de la estructura química de éstos o de su acción en el organismo.
4. Explicar la acción tóxica de los venenos más significativos recogidos en este tema, su sintomatología y la forma de detectarlos.
5. Valorar la aportación de la toxicología a las ciencias forenses.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para estudiar este tema es importante tener presente ciertos contenidos de bioquímica, tales como respiración, oxidación celular o fosforilación oxidativa.

Tema 10. Venenos en la toxicología forense

- 10.1. Introducción
 - 10.2. Dosis tóxica y dosis letal
 - 10.3. Toxicología Forense. Procesos analíticos en Toxicología Forense
 - 10.4. Características de los venenos
 - 10.5. Tipos de venenos
 - 10.6. Los venenos y la química
 - 10.7. Desintoxicación: antídotos y antagonistas
 - 10.8. Venenos de origen mineral: arsénico; talio; monóxido de carbono
 - 10.9. Venenos de origen vegetal: plantas cianogénicas y otras plantas venenosas
 - 10.10. Venenos de origen animal
 - 10.11. Venenos de origen artificial
 - 10.12. Polonio, un veneno de última generación
 - 10.13. Venenos: nuevas perspectivas
- Ejercicios y Soluciones
- Lecturas: «El caso Lafarge y la difusión del test de Marsh» y
«Alan Turing y la manzana envenenada con cianuro»

10.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los venenos tal vez sea el capítulo más atractivo de la ciencia forense. Con gran probabilidad ello sea debido al misterio, intriga e, incluso, teatralidad, que suelen rodear los casos en los que un veneno aparece como protagonista. Por ello también su aparición en la literatura o en el cine es muy frecuente.

El veneno ha ocupado muchas e interesantes páginas en la historia, más o menos conocidas, más o menos importantes. Tal es, por ejemplo, el suicidio-ejecución de Sócrates, el gran filósofo griego, por medio de la ingestión de cicuta. O los famosos envenenamientos atribuidos a la familia de los

Borgia, en el Renacimiento. Ya en momentos más próximos y cotidianos, todos asociamos los términos de estricnina o arsénico con casos de este tipo. Y éste último, sobre todo, es probablemente el que más se ha utilizado; no en vano se le conoce como el «rey» de los venenos.

Atendamos primero a la etimología de la palabra «veneno». Proviene del término latino *venenum*, relacionado con la raíz indoeuropea *wen* (amar, venerar). De ese término procede también el nombre de Venus, la Afrodita de la mitología griega, diosa del amor. Esto tiene su importancia, ya que en un principio se daba el nombre de *venenum* a las pócimas mágicas empleadas como filtros amorosos para despertar el amor o el deseo sexual (recordemos también el término «afrodisíaco»), por lo que no implicaban la idea de algo malo o perjudicial. Con el tiempo esta palabra de *venenum* se fue extendiendo a todas las drogas y pociones, tanto a las empleadas como medicamentos como a aquéllas capaces de originar grandes daños e, incluso, la muerte. Por este motivo el escritor romano Virgilio unía a esta palabra el calificativo de *bonum y malum* (bueno y malo). Poco a poco fue quedando para veneno tan sólo el sentido de «malo», es decir, de aquellos productos perjudiciales para el organismo (ya sea de un ser humano o de un animal), que al entrar en contacto con él ocasionan una alteración funcional, una enfermedad o una lesión, frecuentemente con efectos mortales.

■ VENENOS: ASPECTOS GENERALES ■

10.2. DOSIS TÓXICA Y DOSIS LETAL

Por otra parte, hay que recordar el término de «tóxico», ya que una sustancia que produce tales alteraciones se dice también que es tóxica o, simplemente, que es un tóxico. Attendamos de nuevo a la etimología: la palabra *tóxico*, proviene del griego *toxikós*, que significa «relativo al arco», que deriva a su vez de *tóxon*, «arco, flecha». A primera vista esto puede resultar chocante, pero si acudimos también ahora a la mitología, esta extraña conexión se explica fácilmente. La diosa Hera había impuesto a Hércules —el Heracles griego— doce pruebas (recordemos los doce trabajos de Hércules), y una de ellas era matar a la Hidra, una terrible serpiente de nueve cabezas. Tras hacerlo, Hércules empapó la punta de sus flechas

en la sangre venenosa del monstruo, con lo cual consiguió transformarlas en una terrible arma mortífera.

La *toxicidad* es por tanto la capacidad de un determinado producto de causar efectos perjudiciales sobre un ser vivo. De aquí proviene también el término *toxina*, una sustancia venenosa producida por células vivas de organismos, ya sean animales o plantas. Por ello, no se considerarían como toxinas las sustancias nocivas para la salud originadas en procesos artificiales.

¿Qué diferencia hay, pues, entre tóxico y veneno? Para entenderlo hay que recurrir a la tan famosa frase de **Paracelso**, que puede traducirse así: «Nada es veneno, todo es veneno. La diferencia está en la dosis». Es decir, cualquier sustancia a concentraciones altas podría llegar a ser un veneno para el organismo. Por ejemplo, el agua si se ingiriese en enormes cantidades, llegaría a producir la muerte del individuo. En ese sentido, pues, el agua podría considerarse un veneno. Este matiz de la dosis es muy importante en el caso de ciertos fármacos que pudiendo ser beneficiosos para el organismo, a partir de lo que se conoce como *dosis tóxica* causarían graves trastornos (por ejemplo, los barbitúricos, tan empleados en casos de suicidio).

Podemos así distinguir entre:

Dosis terapéutica (Dt): cantidad mínima de sustancia que careciendo de efectos tóxicos presenta una acción favorable.

Dosis tóxica (DT): cantidad de sustancia capaz de manifestar un efecto tóxico.

Dosis tóxica mínima (DTm): cantidad más baja de sustancia capaz de manifestar un efecto tóxico.

Dosis letal (DL): cantidad de sustancia que resulta mortal al ser administrada.

Dosis letal mínima (DLm; DL01): cantidad mínima de sustancia que resulta mortal al ser administrada.

Dosis letal media (DL50): cantidad de sustancia que mata al 50% de la población a la que se suministra.

Por ello, para algunos autores la diferencia entre tóxico y veneno sería que el primero tendría alta toxicidad, resultado peligroso ya a dosis muy

pequeñas, mientras que para que un producto fuera un veneno la dosis tóxica no tendría por qué ser necesariamente baja. Por otra parte, para muchos estudiosos de este tema el término «veneno», conllevaría tradicionalmente el sentido de intencionalidad, es decir, de producto utilizado con fines criminales. Así, si nos fijamos en el lenguaje común, la palabra envenenar significa el acto realizado por alguien con una intención de dañar a otro, pero intoxicarse tendría un sentido de algo que ocurre involuntariamente. Por otra parte, hay que tener en cuenta que los venenos no siempre han estado implicados en el envenenamiento intencionado, puesto que se han utilizado también para conseguir armas más potentes para la caza o la guerra (en puntas de flechas o de lanzas, envenenamiento de aguas, etc.) y en medicina, ya que muchos tienen propiedades terapéuticas.

Actualmente no habría diferencia entre tóxico y veneno, siendo «tóxico» el término preferente, digamos que el más ortodoxo desde el punto de vista científico, que englobaría así a los venenos clásicos y también a todas aquellas otras sustancias que pueden resultar perjudiciales en función de la dosis. Pero en este tema utilizaremos casi siempre la palabra «veneno», ya que está dedicado al estudio de los tóxicos empleados con intención criminal. No obstante, conviene clarificar los siguientes conceptos:

Tóxico: todo agente químico que ingresado en el organismo altera elementos bioquímicos fundamentales para la vida. El tóxico, pues, produce un efecto biológico, con lo que se establece así un nexo entre la Toxicología y la Bioquímica a través de los mecanismos de acción tóxica y en lesión bioquímica.

Toxicidad: Capacidad inherente a una sustancia para producir efectos perjudiciales el organismo.

Intoxicación: Conjunto de trastornos que derivan de la presencia en el organismo de un tóxico o veneno.

Hemos mencionado a Paracelso, y volveremos a hacerlo en alguna ocasión. Pero, *¿quién era Paracelso?*



Paracelso o **Philippus Theophrastus Bombast von Hohenheim** (1453-1541), nació en Suiza, en la región minera del Tirolo, donde su padre era médico. De ahí sus conocimientos, desde muy pequeño, sobre minerales y su interés por la medicina. Obtuvo el título de médico en la Universidad de Basilea, pero también se formó en alquimia y en metalurgia. Personaje controvertido y rodeado de misterio y leyendas, alcanzó sin embargo grandes méritos, sobre todo en medicina. Paracelso en su terapia seguía el principio de la similitud, según la máxima «lo similar cura lo similar». Además, aplicaba dosis mínimas, según expresaba en otra de sus famosas frases: **Sólo la dosis hace el veneno**, *dosis sola facit venenum*. Es decir, ciertos venenos en pequeñas dosis pueden ser buenos medicamentos, por lo cual se le considera el antecedente más directo de la homeopatía. No obstante, su mayor logro fue en la obtención de sus medicamentos de origen mineral. Por ejemplo, empleaba compuestos de mercurio (mercuriales) y de arsénico (arsenicales) como remedios curativos en ciertas dolencias, aunque seguía empleando también los de origen vegetal. Tal era el opio, en forma de un preparado llamado «láudano», empleado como analgésico y del que se dice que llevaba siempre una dosis guardada en su famosa espada (ver figura).

10.3. TOXICOLOGÍA FORENSE

La ciencia que estudia los tóxicos se llama *Toxicología*, según indica su propia etimología. Se define como la ciencia que investiga la toxicidad de sustancias y productos químicos sobre los organismos vivos, así como los mecanismos de acción, el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de las intoxicaciones. El médico *Mateu Orfila*, considerado como el iniciador de la toxicología (ver en tema 1, sección 1.3), comenzó a analizar los efectos de los tóxicos en los seres vivos, para lo cual en sus experimentos empleaba perros, envenenándolos con distintos agentes para determinar los daños que les producían.

La toxicología se divide en dos grandes áreas: *Toxicología Básica* o *Fundamental* y *Toxicología Aplicada*. Ésta última se llama así porque aplica los principios y conocimientos generales de la primera, junto con los de

otras disciplinas, a campos concretos de estudio, por lo que tiene una serie de ramas o especialidades: *Médica*, *Veterinaria*, *Alimentaria*, *Ambiental*, *Experimental* y *Analítica*. Entre estas especialidades hay que incidir en que la *Toxicología Analítica* constituye una herramienta imprescindible para la investigación realizada por todas las demás, pues contiene los distintos métodos de la química analítica y, sobre todo, los grandes avances de las técnicas instrumentales. Por su parte, la *Toxicología Médica* se subdivide a su vez en *Forense*, *Clínica* e *Industrial*. En este capítulo, dedicado al estudio de venenos, obviamente interesa la *Toxicología Forense*, que se entendería fundamentalmente como la ciencia que estudia las intoxicaciones y los productos que las provocan (venenos, drogas y fármacos), en respuesta a determinados requerimientos legales. La Toxicología Forense, como toda toxicología, es multidisciplinar, pues requiere la colaboración de especialistas de diferentes áreas. En consecuencia, el toxicólogo forense deberá trabajar junto a un médico, el anatomopatólogo forense. Éste, en caso de producirse la muerte, determinará la causa de ésta y será el encargado de realizar la autopsia.

10.3.1. Procesos analíticos en toxicología forense

Nos centraremos en la intoxicación producida por lo que se considera un veneno, objeto de estudio de este tema, dejando la debida a drogas y fármacos. Los materiales biológicos con los que el toxicólogo forense debe trabajar en cuanto a la detección e identificación de un veneno son, principalmente, sangre, orina, bilis, humor vítreo, fluido cerebroespinal, hígado, pulmones, cerebro, pelo y uñas. Y con estos materiales de partida, en términos generales éstas son las tareas que habrá de llevar a cabo:

- **Pretratamiento de la muestra:** ante todo es necesario tratar física y químicamente el material biológico, a fin de hacerlo más apto para su estudio posterior (centrifugación de la sangre, filtración de la orina, ajustes del pH, etc.).
- **Extracción:** dado que el veneno suele estar presente en las muestras en muy baja concentración (menos de una parte por millón), debe separarse de todo el resto de materiales de la muestra. Esto se llevará a cabo mediante un proceso de extracción de la sustancia a analizar y posterior concentración de los extractos, para lo cual se emplean

disolventes orgánicos (éter o cloroformo) o también sólidos absorbentes (generalmente preparados a base de sílice).

- **Purificación del extracto:** el extracto inicial obtenido en el paso anterior normalmente contiene aún muchas impurezas, que es necesario eliminar también a fin de evitar posibles contaminaciones.
- **Proceso analítico:** una vez purificado, para analizar el extracto que puede contener el veneno se utilizan distintas técnicas analíticas, principalmente espectrometría y cromatografía.
 - Las **técnicas de espectrometría** más usuales en toxicología son espectrofotometría ultravioleta y espectrometría de masas. La *espectrofotometría ultravioleta* proporciona un espectro que puede servir para confirmar o descartar la presencia de una sustancia de la que se sospecha pudiera estar presente en la muestra e, incluso, cuando se trata de sustancias desconocidas, puede conducir hasta su identificación. En cuanto a la *espectrometría de masas*, su eficacia en este tipo de análisis suele requerir su empleo en combinación con otras técnicas, como es por ejemplo la separación por cromatografía de gases, GC-MS (ver en tema 2, sección 2.8.6).
 - Las **técnicas cromatográficas** son muy eficaces para separar en los extractos los restos biológicos que pudieran contener. Además, si se hace un registro gráfico, éste proporciona un cromatograma, en el que aparecen una serie de picos a lo largo de una escala de tiempo. Esto constituye una información muy valiosa, ya que cada pico corresponde a cada uno de los componentes de la mezcla problema, una vez separado de los demás. El área o altura del pico es proporcional a la cantidad de ese componente, mientras que el tiempo al que aparece cada pico señala lo que ha tardado dicho componente en pasar por el sistema cromatográfico. Es decir, es el *tiempo de retención* (ver en tema 2, sección 2.5.3) que, como es característico de cada sustancia, contribuye a poder identificarla, si bien este dato por sí solo no sería suficiente.

Respecto al análisis de drogas, solamente diremos aquí (ya que no son el objeto de estudio del presente tema) que, además de las técnicas anteriores, son muy eficaces los ensayos inmunológicos, basados en el empleo de anticuerpos (ver en tema 8).

10.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS VENENOS

En los casos de envenenamiento, como siempre ocurre en investigación criminal, es imprescindible llevar a cabo una serie de pruebas. En primer lugar pruebas toxicológicas, dedicadas a la identificación del tóxico a concentraciones letales. No obstante, el toxicólogo deberá trabajar junto al médico forense, quien determinará la causa de la muerte. La prueba anatomopatológica de que se ha producido un envenenamiento mortal se basará en que no se haya encontrado ninguna otra causa de la muerte y en que los hallazgos del toxicólogo sean compatibles con un cuadro tóxico determinado.

Por otra parte, el concepto de *dosis tóxica* es relativo, ya que hay que tener en cuenta ciertas particularidades. Tales son:

- La vía de administración del tóxico y su frecuencia.
- El periodo de tiempo transcurrido hasta la muerte.
- Las alteraciones post mortem del tóxico.
- Su interacción con otros tóxicos.
- El lugar de donde procede la muestra.
- La respuesta concreta del individuo o idiosincrasia.

Asimismo, habrá de discernirse la etiología (es decir, las causas) del envenenamiento, pues éste podrá ser: a) accidental (profesional, alimentario o por medicamentos); b) voluntario (homicidio doloso, suicidio).

Dentro de las ciencias forenses y en lo que a los venenos se refiere, interesa el estudio de la intoxicación criminal, es decir, el de aquellos casos en los que se ha empleado un tóxico voluntariamente con intención de criminalidad. Muchos son los productos que a lo largo de la historia se han empleado para este fin, pero para que una sustancia tóxica sea utilizable como veneno, debería cumplir una serie de requisitos, como son:

- Fácil adquisición y precio asequible.
- Eficaz a dosis relativamente bajas.
- Los síntomas que produce en el individuo se podrán confundir fácilmente con otras enfermedades conocidas.
- Se podrá suministrar sin problemas en alimentos y bebidas.

- No debe presentar propiedades organolépticas (es decir, que no se puedan percibir por los sentidos, por ejemplo sabor, olor, textura, color...).
- Su detección en el organismo afectado debe ser muy difícil.

10.5. TIPOS DE VENENOS

El estudio de los venenos es un área sumamente amplia y diversa, dada la gran variedad de ellos en cuanto a su origen, daños causados, grado de toxicidad, componentes de los mismos, naturaleza química, estado físico... Ello da lugar a que el hacer una clasificación completa de los mismos sea una tarea sumamente compleja.

Una forma tradicional de clasificarlos se basa en el primero de esos criterios, es decir, en su procedencia u *origen*:

- Vegetal: cicuta, estricnina, ciertos hongos...
- Animal: serpientes, arañas, escorpiones...
- Mineral: arsénico, mercurio, talio, monóxido de carbono...
- Artificial: sustancias sintetizadas en el laboratorio (como los barbitúricos), o productos industriales (como insecticidas, pesticidas, anticongelantes...).

Muchos venenos, aunque se ingieran en pequeñas dosis no se eliminan, sino que se acumulan en el organismo y producen importantes efectos tóxicos irreversibles. Además, siempre hay que tener presente la idea de la dosis, ya que muchos de estos venenos a dosis pequeñas se pueden emplear en medicina, hecho frecuente en muchas plantas medicinales. Así, muchos de origen vegetal como la nicotina, colchicina, digitalina, estricnina o curare son sustancias tóxicas que también se emplean con fines terapéuticos, pero a ciertas dosis ya son mortales.

En el grupo de productos industriales se incluirían también los cáusticos e irritantes, como son ácidos y álcalis fuertes (ácidos clorhídrico, nítrico, sulfúrico, hidróxido sódico, etc.). Por otra parte, hay que tener en cuenta que otros productos industriales que se han venido empleando como venenos, deben su toxicidad a que contienen alguna o algunas de las sustancias venenosas englobadas en los grupos anteriores (por ejemplo, muchos raticidas contenían estricnina, arsénico o talio).

10.6. LOS VENENOS Y LA QUÍMICA

El estudio de la naturaleza de los venenos y su acción en nuestro organismo es uno de los temas de la ciencia forense en los que la química está más implicada. Para hallar la explicación no hay más que tener en cuenta que los tóxicos, una vez incorporados al organismo vivo en una determinada proporción, producen por su estructura química y a través de mecanismos fisicoquímicos y bioquímicos, alteraciones de la actividad celular, incompatibles con la salud y muchas veces con la vida.

En definitiva, lo que hacen los venenos en nuestro organismo es desencadenar o inhibir determinados procesos biológicos fundamentales para la vida, que en definitiva son reacciones químicas, más o menos complicadas. Por ello, quedan fuera del concepto de veneno los fenómenos que pueden provocar lesiones en los organismos pero que son de origen físico (calor, presión, etc.) y los microorganismos causantes de infecciones, objeto de estudio en otras disciplinas.

Los venenos son capaces, pues, de provocar graves daños en los tejidos vivos e incluso la muerte del organismo. Para ello se han de poner en contacto con éste, lo cual puede tener lugar de distintas formas: cuando se ingiere, se inhala, se absorbe a través de la piel, se inyecta o se introduce por otros medios (por ejemplo, a través del oído, de la vagina, del ano, etc.). Una vez que el veneno se ha introducido por cualquiera de estas vías en el cuerpo, pasa después al sistema circulatorio y a través de él es

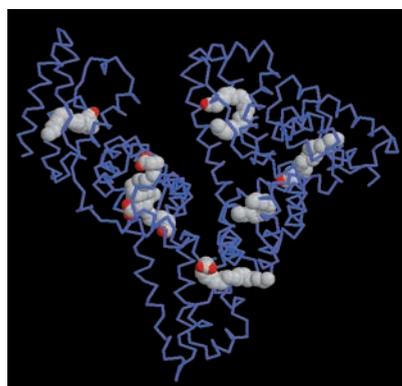


FIGURA 10.1. Estructura de la albúmina.

transportado por todo el organismo. La etapa siguiente sería el paso del veneno de la sangre a las células de los tejidos, pero este proceso no es tan sencillo, ya que hay que contar con otro factor: la albúmina de la sangre, una de las proteínas del plasma sanguíneo (figura 10.1). Si un determinado compuesto tóxico se uniese químicamente a la albúmina, entonces quedaría retenido por ésta y no podría entrar en las células. Si por el contrario, el veneno no fuera capaz (por su naturaleza química) de establecer esa unión, quedaría libre para entrar en las células e interrumpir su actividad.

Esos serían dos casos extremos, pero puede haber grados diferentes de unión del compuesto venenoso a la albúmina, existiendo así una relación entre la cantidad del mismo unida y la no unida, de lo cual dependerá también el daño causado por el veneno. Esta relación estará sujeta a las leyes del equilibrio químico y vendrá determinada por la constante de equilibrio de la unión veneno-albúmina, que simbólicamente podría representarse así:



10.7. DESINTOXICACIÓN: ANTÍDOTOS Y ANTAGONISTAS

El daño causado por el veneno puede ser directo, atacando a las células en su sistema enzimático, por ejemplo, o indirecto, por alteración de funciones esenciales (como el caso del monóxido de carbono o del cianuro, que inhiben el transporte de oxígeno).

Como ya se ha dicho, la variedad de venenos es enorme, su interferencia en las funciones fisiológicas es muy diferente y su entrada en el organismo tiene diversas posibilidades. Todo ello explica que no haya un procedimiento general para combatir sus efectos y que el tratamiento sea prácticamente específico para cada veneno. No obstante, hay unas reglas muy generales:

- favorecer la eliminación del veneno
- administrar antídotos y antagonistas
- intentar por todos los medios mantener las funciones vitales del individuo envenenado

Ante un caso de envenenamiento o, incluso, de una simple sospecha, obviamente debe llevarse el paciente lo antes posible a un centro médico. En cualquier caso, lo primero es eliminar el veneno provocando vómitos y diarreas y hacer un lavado de estómago. O en algunos casos, como en la picadura de una serpiente o de otro animal venenoso, succionar rápidamente la herida para conseguir extraerlo del organismo.

Además, es importantísimo contrarrestar la acción del veneno por medio de la administración de ciertas sustancias, los *antídotos* y los *antagonistas*. Es éste uno de los aspectos del estudio de los venenos donde entra

de nuevo la química y en muy alto grado, además. Pero es importante distinguir entre ambos conceptos.

10.7.1. Antídotos

Los antídotos son sustancias que actúan sobre el mismo veneno, anulando sus efectos tóxicos bien porque alteran su naturaleza químicamente o bien porque lo hacen desaparecer en mayor o menor grado. Veamos varios ejemplos:

- Por un proceso *ácido-base*, es decir, por una neutralización. Esto tiene una fácil explicación. Así, si un veneno tiene carácter ácido, se puede hacer que pierda muchas de sus propiedades, entre ellas las tóxicas, añadiéndole una base. Por ejemplo, el veneno inoculado por la picadura de una avispa es alcalino, y por tanto se puede neutralizar con una sustancia ácida. Por ello, un remedio casero es aplicarse vinagre (fundamentalmente constituido por ácido acético) sobre la picadura. Contra el veneno de las abejas, que contiene principios ácidos, puede emplearse una sustancia alcalina (una vez extraído el aguijón) como es una disolución de amoníaco.
- Otro modo de alterar la naturaleza química de ciertos tóxicos es por un proceso de *oxidación-reducción*. Así, los alcaloides (recuerden su naturaleza, ya discutida en el tema 9), son oxidados con relativa facilidad, con lo cual habrá que introducir un oxidante en el organismo: el alcaloide se oxidará y se transformará en un compuesto diferente, perdiendo con ello su toxicidad. Como agente oxidante se puede emplear permanganato de potasio, si bien en disoluciones muy diluidas, ya que es un compuesto corrosivo e irritante.
- También puede aislarse el veneno en ciertas ocasiones por un proceso de *precipitación*, introduciendo en el estómago un agente precipitante. Es el caso del talio, por ejemplo, haciendo un lavado gástrico con una solución de yoduro de sodio, ya que se forma un precipitado de yoduro de talio, compuesto insoluble.
- Cuando el veneno está integrado por un metal pesado, como el plomo, el mercurio o el talio, se puede hacer «desaparecer» mediante su captación por una sustancia *quelante*. Lo que ocurre es la formación de

un compuesto complejo al establecerse enlaces covalentes coordinados entre el quelante y el metal, con lo que éste quedaría «atrapado» y no podría ejercer su acción tóxica. Un antídoto de este tipo, y muy empleado, es la sustancia llamada EDTA, o ácido *etilendiaminotetraacético* (figura 10.2).

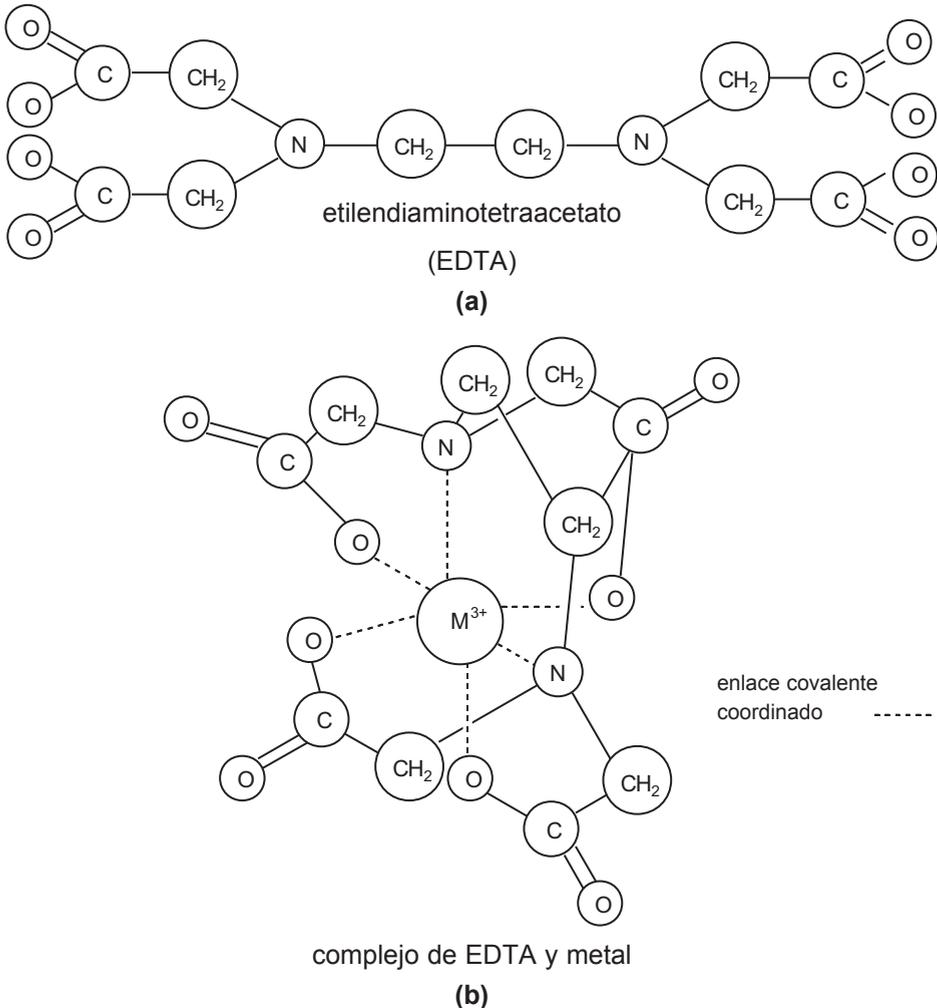


FIGURA 10.2. (a) Molécula de EDTA - (b) Molécula de EDTA envolviendo un ion metálico, M³⁺, estableciendo con él 6 enlaces covalentes coordinados (líneas de puntos), formando un quelato.

Se suele inocular por vía intravenosa en forma de una disolución de edetato de calcio disódico (CaNa_2EDTA) para quelar metales con una afinidad hacia este agente quelante mayor que la del ion calcio. Se forman en ese caso complejos con una estructura de coordinación octaédrica, ya que el EDTA generalmente se coordina con iones de metales pesados M^{2+} y M^{3+} por 6 posiciones: 4 del oxígeno de cada acetato y 2 de los dos nitrógenos amínicos. Es decir, el EDTA es así un ligando hexadentado. Es muy eficaz en las intoxicaciones por plomo.

Otro agente quelante empleado como antídoto es el hexacianoferrato (II) de hierro (III) o ferrocianuro férrico, $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$, llamado vulgarmente azul de Prusia, sal férrica en la que el anión, el ferrocianuro $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$, es un ion complejo. Es muy eficaz en envenenamientos por talio, como se volverá a discutir después.

- En otras ocasiones se emplean sustancias que *absorben* o *adsorben* el veneno (nótese que la «adsorción» es un fenómeno superficial, mientras que la «absorción» tiene lugar en todo el seno del sólido absorbente). Se necesitan así materiales con cualidades absorbentes o, más comúnmente, adsorbentes. Tal es el carbón activo o activado, producto que se presenta como polvo de partículas muy pequeñas y de una enorme superficie específica, por lo sobre ésta quedan adsorbidas sustancias que entren en contacto con él. Los tóxicos quedarían también «atrapados», en este caso por adsorción. El carbón activo es un antídoto muy eficaz, ya que además es totalmente inocuo, razón por la que es uno de los integrantes del llamado *antídoto universal*, del que se hablará más adelante. Por eso se le llama también carbón medicinal.

Muchos tóxicos, sin embargo, carecen de antídotos. Además, éstos sólo pueden tener validez en el caso de que el veneno se encuentre en el aparato digestivo y no haya penetrado aún en el torrente sanguíneo. Sin embargo, si ya ha penetrado, alcanzando las funciones fisiológicas, ya pierden su utilidad. En este caso habría que recurrir a los antagonistas.

10.7.2. Antagonistas

Los antagonistas son aquellas sustancias que al introducirse en el organismo son capaces de unirse a determinados receptores celulares sin provocar una respuesta biológica (es decir, que son inocuos). Entran así en

competencia con aquellos tóxicos que actúan sobre esos receptores, con lo que la acción fisiológica producida por dichos tóxicos quedaría bloqueada. Es decir, los antagonistas tienen afinidad por los receptores atacados por un determinado veneno y, al unirse a aquéllos, inhibirán sus efectos dañinos. Los antagonistas son también de distintos tipos:

- Por *competencia de receptores*. Son sustancias que tienen alguna similitud con el tóxico desde el punto de vista químico. Un buen ejemplo de este tipo es el caso del monóxido de carbono (CO), gas muy venenoso que produce la muerte por asfixia. Cuando este gas alcanza el torrente sanguíneo se combina con la hemoglobina, desplazando de ésta al oxígeno. Este desplazamiento se debe a que la afinidad de la hemoglobina hacia el monóxido de carbono es mucho mayor que la que tiene hacia el oxígeno. En consecuencia, éste ya no llega a las células y no se puede producir la oxidación celular. El antagonista sería en este caso el propio oxígeno, debiéndose administrar al individuo intoxicado una fuerte corriente de este gas. En este proceso de intoxicación, realmente es el hierro del grupo hemo de la hemoglobina (figura 10.3) el que se une bien a la molécula de O₂ o bien a la de CO por enlace covalente coordinado. Como en ambas moléculas existen pares de electrones sin compartir, se establece un enlace covalente coordinado, en el que el O₂ o el CO cederían un par de electrones (dador) al ion Fe²⁺ (aceptor) del grupo hemo.

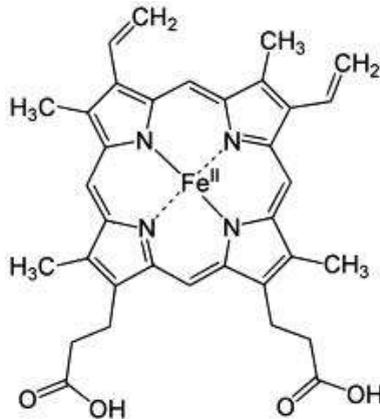


FIGURA 10.3. Grupo hemo de la hemoglobina: ion Fe²⁺ que se combina con especies químicas como el O₂ o el CO.

- Compuestos que dan lugar a un *efecto contrario* al producido por el veneno. Por ejemplo, la estricnina es un veneno que produce tremendos espasmos en la médula espinal, por lo que se emplearían como antagonistas sedantes que anulasen esos espasmos.

10.7.3. Antídoto universal

Dada la complejidad de los venenos, es imposible disponer de un antídoto universal, es decir, de un producto único que valga para contrarrestar la acción de todos los tóxicos. Hay que recurrir por ello a antídotos específicos de cada veneno, teniendo en cuenta además que la gran mayoría de ellos carece de antídoto. En general, los antídotos son productos de síntesis, es decir, compuestos de laboratorio obtenidos partiendo de determinadas sustancias químicas. No obstante, su preparación se consigue a menudo partiendo del mismo veneno, como es el caso del de muchas serpientes. Así, es famoso el Instituto Pasteur de Bangkok por su colección de serpientes venenosas de Tailandia (la «Granja de Serpientes»), a partir de cuyos venenos preparan los antídotos correspondientes. Así se han salvado muchas vidas, sobre todo de los cultivadores de arroz tailandeses.

No obstante se viene empleando lo que se conoce como *antídoto universal*, una fórmula empleada en primeros auxilios, a fin de neutralizar el veneno que ha penetrado en un organismo. Está especialmente indicado cuando las sustancias venenosas hayan sido ingeridas y estén contenidas aún en el estómago, dentro de un corto periodo de tiempo de la ingesta. Sin embargo, no es efectivo si el veneno está ya en el torrente sanguíneo y, en cualquier caso, no siempre da buenos resultados, dependiendo entre otros factores de las características del veneno y de su concentración. Su principal componente es el carbón activo, gracias a sus propiedades adsorbentes ya descritas que lo hacen muy efectivo sobre todo en el caso de sustancias tóxicas de carácter orgánico.

En general, esta fórmula (de carácter empírico) consiste en:

- Carbón activo: 2 partes – propiedades adsorbentes.
- Hidróxido de magnesio u óxido de magnesio: 1 parte – carácter básico, por lo que se neutralizan los venenos ácidos.

- Ácido tánico, 1 parte – carácter ácido, por lo que se neutralizan los venenos básicos (puede ser también ácido tartárico).
- Agua potable, 6 partes.

El primer antídoto conocido, ya en la Antigüedad, fue el «mitridatus» o *mitridato*, llamado así en honor de Mitrídates (132-63 a.C.), el temible y cruel rey del Ponto Euxino, país situado en Asia Menor, al sur del Mar Negro. Mitrídates vivía obsesionado por su miedo a ser envenenado, por lo que encargó a sus médicos la búsqueda de un antídoto que sirviera para cualquier veneno. Elaboraron así un brebaje que consistía en una mezcla de una gran cantidad de productos de origen vegetal, una secreción glandular de castor, miel y vino. Llegó a tener una enorme difusión, de tal manera que los romanos lo adoptaron e incluso intentaron mejorarlo, consiguiendo otro antídoto al que llamaron «theriaca» (teriaca o triaca en español), aunque realmente no difería mucho del antídoto de Mitrídates.

■ VENENOS: ASPECTOS ESPECÍFICOS ■

A continuación, se hará una revisión de algunos de los venenos más empleados a lo largo de los tiempos, incidiendo en su naturaleza desde el punto de vista químico y desde el punto de vista de su actividad como veneno. Es decir, de los efectos que produce, de los síntomas del envenenamiento y de su detección en el organismo. Asimismo, se analizarán algunos casos de interés histórico o sociológico. Dada la enorme cantidad de venenos y los múltiples aspectos a tener en cuenta en cada uno de ellos, se hará tan sólo una revisión, seleccionando aquéllos que por una causa u otra se han considerado más representativos.

10.8. VENENOS DE ORIGEN MINERAL

Desde el punto de vista químico, son sustancias inorgánicas. Los más importantes son los venenos de arsénico, talio, fósforo, mercurio, plomo y monóxido de carbono. Seleccionaremos para su estudio algunos de ellos, extendiéndonos más en el que fue el veneno por excelencia, el *arsénico*.

10.8.1. Arsénico

El arsénico tiene como símbolo químico As y su número atómico es 33. Pertenece al grupo 15 de la Tabla Periódica (nitrógeno, fósforo, arsénico, antimonio y bismuto), periodo cuarto. Es un semimetal (o metaloide), lo cual significa que como elemento tiene propiedades intermedias entre metales y no metales. Existe en la naturaleza en estado metálico, aunque en muy baja proporción, y en este caso se presenta en varias formas alotrópicas, como ocurre en muchos de sus compañeros de grupo. Sin embargo, es más abundante en forma de compuestos, sobre todo sulfuros, siendo los números de oxidación del arsénico más frecuentes +3 y +5.



FIGURA 10.4. Cristales de oropimente, As_2S_3 , donde se aprecia su intenso color amarillo.

El arsénico y sus compuestos se conocen desde tiempos remotos. Hacia el 2500 a.C. se empleaban en ciertos procesos metalúrgicos. Los alquimistas griegos trabajaban frecuentemente con sulfuros de este elemento, el rejalgar, de color rojo (As_4S_4), y sobre todo el oropimente (As_2S_3), llamado así por su color amarillo que recordaba al del oro, y precisamente de ahí su nombre en latín, *auri pigmentum* (figura 10.4). No es extraño así que ya desde los primeros tiempos de la alquimia fuera empleado por los alquimistas en sus experimentos de transmutación para fabricar oro. No obstante, el primero en aislar el arsénico puro parece ser que fue **Alberto Magno** (1193-1280), hacia 1250.

• *Arsénico como medicina y como veneno*

Es uno de los elementos químicos esenciales para la vida (bioelementos) aunque en bajísimas cantidades (elemento ultratraza), por lo que se emplea en fertilizantes. Pero, paradójicamente, tanto el arsénico como sus compuestos son muy venenosos. La primera de esas características tal vez sea la causa por la que el arsénico se haya venido utilizando con fines terapéuticos a lo largo de la historia. Así, los romanos lo aplicaban contra la tos, afecciones de la voz y disneas. Los médicos árabes emplearon los compuestos de arsénico para uso externo formando parte de pociones para problemas

de piel, y Paracelso preparaba con ellos sus famosos arsenicales. Y sobre todo, a principios del siglo XX surgió el «salvarsán», medicamento creado por el médico y biólogo alemán **Paul Ehrlich** (1854-1915), elaborado con compuestos de azufre y que tuvo un enorme éxito en la lucha contra la sífilis. Por otra parte, a Ehrlich se le considera como fundador de la quimioterapia, por lo que recibió el Premio Nobel de Medicina en 1908. Después, debido a la toxicidad de los compuestos de arsénico, se ha ido abandonando este tipo de aplicaciones médicas, si bien en los últimos tiempos se ha renovado su interés en el tratamiento para ciertos tipos de leucemias.

Por otra parte, por su toxicidad se empleó en fumigaciones, raticidas e insecticidas y, sobre todo, para matar seres humanos, es decir, como veneno en el sentido más tradicional del término. A lo largo de la historia se encuentran multitud de ejemplos de envenenamientos con arsénico. Tal fue entre los romanos, en época de Nerón una mujer llamada Locusta era especialista en este tipo de venenos, y el mismo emperador y su madre, Agripina, utilizaron sus servicios.

En tiempos del Renacimiento, los Borgia, sobre todo César, se convirtieron en asiduos clientes de un veneno, la *cantarella*, que estaba constituido por arsénico dentro de una extraña mezcla. Se preparaba con vísceras de un cerdo, que una vez rociadas con arsénico se dejaban pudrir durante unos tres días, se recogían después los líquidos y se desecaban. Se obtenía así un polvo blanco e insípido..., pero de fatales consecuencias si se ingería.

Otro ejemplo es el del *Acqua Toffana* o Agua Toffana, creada por una mujer de Sicilia, donde tuvo gran difusión y que luego llegó a Nápoles, tomando allí el nombre de *Acqua di Napoli*. En principio se vendía como cosmético en unos frasquitos, pero que más que a las mujeres estaba dedicado a muchos maridos, pues lo que contenía era arsénico mezclado con plomo, belladona y algún otro producto de gran toxicidad. Se ha postulado también que Napoleón podía haber muerto no a causa del cáncer que padecía, sino por envenenamiento por arsénico. Esto fue motivado por los restos de arsénico detectados en los análisis de su pelo, pero muy probablemente fueran debidos a que empleara algún producto para combatir su calvicie.

Los casos de empleo del arsénico como veneno son múltiples a lo largo de los tiempos, pero tal vez los momentos álgidos sean durante el siglo XIX. El compuesto de arsénico más empleado como veneno es el trióxido, As_2O_3 , polvo de color blanco, por lo que se puede confundir con el azúcar o la sal

común. Resultaba así casi el veneno perfecto: inodoro, insípido, sencillo de administrar en alimentos y bebidas... y de fácil adquisición, ya que formaba parte de raticidas, pinturas e incluso, de algunos medicamentos.

- **Toxicidad del arsénico: efectos y síntomas**

Como en muchos venenos, la intoxicación por arsénico es de dos tipos:

Intoxicación aguda: la producida por una dosis letal, de tal manera que el organismo en poco tiempo muere. Entre 100 y 150 mg de arsénico (dosis letal en seres humanos para el trióxido de arsénico ingerido por un adulto de peso medio) son suficientes para provocar la muerte.

Intoxicación crónica: producida por pequeñas dosis que dan lugar a una serie de trastornos pero no a la muerte inmediata. No obstante, como se va acumulando en el organismo (bioacumulación), a la larga los efectos dañinos pueden ocasionar lesiones de importancia impredecible. Esta intoxicación se produce sobre todo por beber aguas contaminadas con arsénico o por respirar vapores de éste. La presencia de arsénico en el agua potable puede ser de origen natural, por disolución de minerales de arsénico de cuencas hidrográficas, generalmente de terrenos volcánicos, o por contaminación producida por determinadas industrias y por pesticidas.

- **Mecanismo de toxicidad: acción y daños en el organismo**

Los compuestos de arsénico interfieren con el metabolismo celular. En los compuestos de arsénico trivalente esto se debe a que reacciona con los grupos sulfhidrilo (-SH) de los aminoácidos sulfurados existentes en las proteínas, mientras que el pentavalente sustituye a fosfatos de las enzimas mitocondriales. El resultado final es la inhibición de la actividad enzimática, lo que conduce a su vez a la inhibición de la fosforilación oxidativa y de toda la respiración celular, con lo que se produce finalmente un fallo multiorgánico.

- **Sintomatología**

Los síntomas que se presentan en los casos de envenenamiento agudo son, sobre todo, náuseas, vómitos y dolor abdominal, hipotensión arterial, vasodilatación, disminución de la función miocárdica, edema agudo de pulmón, arritmias y daños en los riñones. Además, problemas en las mucosas y en la piel, hematológicos y daños en el sistema neurológico. La intoxicación

crónica, por su parte, produce debilidad, enfermedades de la piel, anemia y trastornos del sistema nervioso, y tiene relación directa con la aparición de varios tipos de cáncer. Además, tienen la característica común de que se acumula en el pelo y en las uñas.

- **Detección del arsénico: test de Marsh**

La situación empezó a cambiar con el británico **James Marsh** (1789-1864), químico asistente del gran electroquímico **Michael Faraday** (1791-1867). En 1836 pone a punto un método para detectar arsénico en las vísceras de las posibles víctimas de envenenamiento (figura 10.5). Desde entonces, dado el éxito de su método, llamado prueba o *test de Marsh*, las cosas se pusieron más difíciles para los usuarios de este veneno:

Se trata la muestra sospechosa de contener arsénico con una corriente del gas hidrógeno, con lo cual el arsénico se convierte en el gas arsenamina o arsina (AsH_3). Con el calor la arsenamina se descompone en arsénico elemental puro, que se deposita sobre una superficie fría como un sólido de color plata-negro.

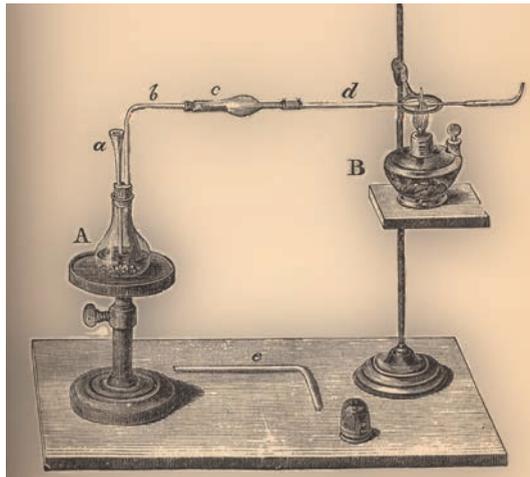


FIGURA 10.5. Aparato ideado por Marsh para realizar el test de arsénico.

Esta prueba es tan sensible que es capaz de detectar cantidades de arsénico sumamente pequeñas (hasta de 0,1 mg). Por esta razón, no basta con hallar arsénico en la muestra, sino que debe haber una cantidad suficiente para causar la muerte. Además, hay que tener en cuenta el arsénico

«natural», presente en nuestro organismo (como bioelemento, aunque en bajísima cantidad), y también el que puede provenir de los terrenos que circundan las tumbas en los cementerios, en caso de que se hubiera hecho la exhumación del cadáver.

El conocido médico forense Orfila fue un entusiasta partidario del test de Marsh, que difundió a través de numerosas conferencias en la Academia de Medicina de París y, sobre todo, con su empleo en el famoso caso Lafarge (ver en Lecturas).

10.8.2. Talio

El número atómico del talio, Tl, es 81 y se encuentra en el grupo 13 de la Tabla Periódica, sexto periodo, encontrándose así entre dos elementos también muy tóxicos, el mercurio y el plomo. Su descubrimiento tuvo lugar en 1861, por lo que es relativamente reciente si lo comparamos con el de esos otros elementos. Se le dio ese nombre por la palabra griega *thallos*, que significa «rama verde», debido al color verde que dan sus sales cuando arden. Su ion más estable es el catión Tl^+ , y con el tiempo se comprobó que las sales de este ion eran muy tóxicas. Sin embargo, en un principio no se conocía su toxicidad, por lo que se empleaba mucho en cremas depilatorias y en algunas enfermedades de la piel, como la tiña. Curiosamente, unos de los efectos de la intoxicación por talio es la caída del cabello. También se empleó como raticida e insecticida, aunque cuando se conoció su enorme toxicidad para los seres humanos este tipo de productos quedó prohibido.

Como curiosidad, y debido también a esa gran toxicidad, fue empleado por Sadam Husein para deshacerse de algunos importantes opositores a su régimen. Y también se intentó el envenenamiento con talio de este dirigente irakí, lo mismo que hubo tentativas de emplearlo contra Nelson Mandela y Fidel Castro.

• Toxicidad

Hasta que oficialmente se prohibieron estos productos, el talio resultaba un veneno de muchas cualidades, un veneno casi perfecto, ya que sus sales son incoloras, insípidas, fáciles de conseguir y además su efecto no se hace patente hasta días después de ingerir el veneno. Se fija en el hígado, huesos y cerebro.

Pero, ¿por qué es tan tóxico el talio, o mejor dicho, el ion Tl^+ ? Porque es muy similar al ion K^+ , ya que ambos iones tienen una carga igual y tamaños muy parecidos. El Tl^+ , una vez dentro del organismo, «sustituye» al K^+ en los tejidos, pero no puede cumplir la función de éste, que es fundamental en la transmisión de impulsos nerviosos. Interfiere, pues, en los procesos metabólicos en los que interviene el potasio, por lo que afecta al cerebro, nervios y músculos. Este problema se ve incrementado por el hecho de que además el talio reacciona con los restos de azufre de muchas proteínas, con lo que queda afectado el funcionamiento de otros importantes procesos metabólicos y del sistema nervioso central.

Su antídoto, como ya se ha dicho, es el *ferrocianuro férrico* o azul de Prusia, mejor llamado según la IUPAC hexacianoferrato (II) de hierro (III), $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ o mejor aún por el llamado azul de Prusia soluble o azul de Berlín, el *ferrocianuro férrico-potásico*, $KFe[Fe(CN)_6]$. En este segundo antídoto, a la acción quelante del anión complejo se añade el hecho de que el Tl^+ reemplaza al K^+ de esta sal por formar un complejo más estable, con lo que el organismo se va liberado de este mortífero catión.

• *Sintomatología y detección*

Similares a los de la gripe (decaimiento y dolor de huesos). Además, produce psicosis y alteraciones graves del sistema nervioso, síntomas que pueden confundirse con otras enfermedades neurológicas, así como dolores de estómago y en las extremidades, y problemas de piel (necrosis, eritema y la ya mencionada caída del cabello). Entre 6 y 20 días conduce al coma y a la muerte. La dosis letal es de 12-15 mg/kg de peso. Se detecta en la orina y en las deposiciones, precisamente por el color verde que da a la llama. Como se fija en los huesos, puede detectarse hasta en cadáveres incinerados.



FIGURA 10.6. La novela *El Misterio de Pale Horse*, de Agatha Christie, donde se describe una detallada sintomatología del envenenamiento por talio.

Los efectos y el poder de este veneno fueron popularizados por Agatha Christie, en su novela *The Pale Horse* (*El Misterio de Pale Horse*, en la traducción española) donde describe con precisión los síntomas de la intoxicación por talio (figura 10.6).

10.8.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro que se genera cuando se queman materiales combustibles, como por ejemplo la gasolina, el petróleo, el tabaco o la madera, en presencia de una cantidad insuficiente de oxígeno, como resultado de la combustión incompleta del carbono presente en ellos. Un átomo de carbono se puede combinar con dos átomos de oxígeno o bien con uno sólo:



La formación de monóxido de carbono es muy corriente en los automóviles, por lo cual presenta altos niveles en las zonas urbanas. También se produce por el mal funcionamiento de ciertos aparatos domésticos, como calentadores, hornos o estufas. Es muy peligroso, constituyendo un verdadero veneno, debido a que se combina con la hemoglobina. Para comprender mejor este hecho, hay que analizar cómo tiene lugar el proceso respiratorio, es decir, las bases químicas de dicho proceso.

La hemoglobina es una proteína que se encuentra en la sangre, concretamente en los glóbulos rojos, y es la encargada de llevar el oxígeno que inhalamos al respirar a todas las células del organismo para que tenga lugar la oxidación biológica. Para ello la hemoglobina se combina con el oxígeno en los pulmones (oxihemoglobina, que representaremos como Hb-O₂) mediante un enlace covalente coordinado, en una reacción que es en realidad un equilibrio químico:



La sangre circula por nuestro organismo bombeada por el corazón y así, a través del torrente sanguíneo, es como llega el oxígeno a todas las células, ya que hay una pequeña cantidad de oxígeno libre, disponible para éstas

gracias al equilibrio anterior. Pero si el monóxido de carbono penetrara en los pulmones, se combinaría rápidamente con la hemoglobina (Hb-CO, carboxihemoglobina) ya que el hierro de ésta tiene unas 320 veces más afinidad por el CO que por el O₂ (figura 10.7), con lo que su enlace con la hemoglobina es más fuerte que en el caso del oxígeno.



Recordemos que la molécula de monóxido de carbono, CO, se puede representar como



que sería un híbrido de resonancia entre tres formas resonantes. El resultado es que por el par de electrones sin compartir del átomo de carbono esta molécula puede formar compuestos complejos con metales.

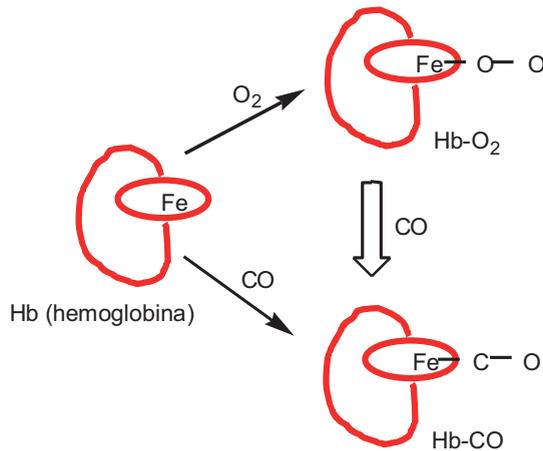


FIGURA 10.7. Combinación de la hemoglobina con el oxígeno (oxihemoglobina) y con el monóxido de carbono (carboxihemoglobina).

En consecuencia, la hemoglobina ya no podría combinarse con el oxígeno (pues está bloqueada por el CO) y el oxígeno no sería transportado hasta las células, con lo que se producen diversos trastornos (dolores de cabeza, fatiga, lentitud de reflejos, problemas respiratorios...) y, a altas concentraciones, hasta la muerte. Estos peligros son tanto mayores en espacios cerrados, como túneles donde haya acumulación de tráfico y en garajes.

Ya dijimos en el apartado de antídotos que en este caso el antídoto sería el propio oxígeno. Si se introduce una fuerte corriente de oxígeno en el organismo envenenado, el equilibrio [2] se desplazaría hacia la izquierda, es decir, que disminuiría la concentración de carboxihemoglobina y aumentaría la de oxihemoglobina. Para introducir oxígeno se emplean varios procedimientos: mediante una mascarilla o, incluso, para casos graves, con una cámara hiperbárica de oxígeno.

10.9. VENENOS DE ORIGEN VEGETAL

Son muy numerosas las especies vegetales que contienen sustancias tóxicas que causan lesiones de distinto tipo o la muerte, incluso, cuando penetran en nuestro organismo, pudiendo constituir aproximadamente más de un 1% del conjunto del mundo vegetal. Su naturaleza es muy diversa (hierbas, arbustos, árboles...) y además tienen una variada distribución en cuanto al suelo y zonas geográficas donde se desarrollan. Pueden ser tanto silvestres como especies cultivadas y, por ejemplo, son venenosas muchas plantas ornamentales a las que estamos acostumbrados en nuestra vida cotidiana, como son el muérdago, la adelfa o el laurel cerezo. Entre los venenos vegetales, no puede olvidarse los existentes en algunos hongos, como el de la seta *Amanita phalloides*, muy común en España, que pese a su bella apariencia ocasiona la muerte en pocas horas. Los principios activos a los que deben su toxicidad son en su mayoría de tipo orgánico, sobre todo alcaloides como el beleño, la belladona, la mandrágora... o el opio, que contiene más de 30 alcaloides, entre ellos la heroína y la morfina, que aparte de sus propiedades narcóticas, son venenos muy potentes. Y también son principios activos de otras plantas glucósidos, oxalatos, saponinas, resinas, etc., así como algunos de origen mineral (principalmente selenio o nitratos) que la planta toma del suelo y acumula en determinadas zonas. En este sentido, la localización de los agentes venenosos es muy diversa, según la planta: así, pueden estar distribuidos por todas las partes (cicuta), o concentrarse en ciertas zonas, como raíz, hojas, semillas...

Para que estos venenos produzcan una mayor agresión al organismo, en general deben penetrar por ingestión, tras lo cual pueden actuar directamente sobre el aparato digestivo, o bien pasar al sistema circulatorio y a través de la sangre llegar al hígado, dañando después a determinados órga-

nos, según el caso (corazón, riñones, sistema nervioso...). En el caso de los alcaloides, por ejemplo, suelen ejercer su acción nociva en el sistema nervioso, dando lugar a distintos efectos. Así, producen parálisis (cicuta), paro cardíaco (tejo), alucinaciones (estramonio), etc. Otros tóxicos, sin embargo, actúan directamente sobre determinadas células del organismo, como es el originado a partir de las plantas cianogénicas, el cianuro de hidrógeno, el cual impide que las células tomen oxígeno, ya que incapacita a la hemoglobina de la sangre a transportarlo hasta aquéllas (algo parecido al efecto del monóxido de carbono). Comenzaremos por estas plantas.

10.9.1. Cianuro de hidrógeno: plantas cianogénicas

El cianuro de hidrógeno o ácido cianhídrico, vulgarmente denominado ácido prúsico, tiene una fórmula muy sencilla, HCN ($\text{H}-\text{C}\equiv\text{N}$). Es un líquido incoloro, sumamente volátil, ya que en condiciones normales tiene un punto de ebullición de 26°C ., de intenso olor característico a almendras amargas. Forma parte de la estructura de los *glucósidos cianogénicos*, llamados así porque al ser hidrolizados por ciertas enzimas liberan cianuro de hidrógeno. Esos glucósidos se encuentran en gran variedad de plantas (toda la planta del laurel cerezo, semillas de melocotón, de albaricoque, de almendro silvestre, raíz de la mandioca, etc.), que por ello se conocen como *plantas cianogénicas*. Un glucósido de este tipo es la *amigdalina* (figura 10.8), presente en muchas plantas del género *Prunus* y que en contacto con la saliva se hidroliza a glucosa, benzaldehído y cianuro de hidrógeno.

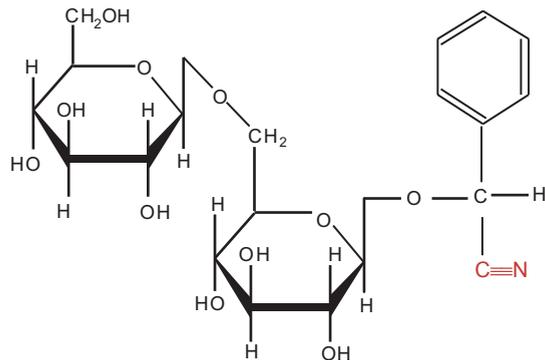


FIGURA 10.8. Estructura química de la *amigdalina*, donde se observa fácilmente el resto $\text{C}\equiv\text{N}$, que por hidrólisis dará lugar al HCN.

El cianuro de hidrógeno se utiliza en gran número de áreas de la industria química (tintes, plásticos, explosivos, etc.). Pese a esta ventaja desde el punto de vista de sus aplicaciones, tiene un gravísimo inconveniente, su elevada toxicidad. Es uno de los venenos más potentes y de efectos más rápidos de los que existen hasta el momento. Una concentración de 300 partes por millón de este gas en el aire es suficiente para matar a una persona en cuestión de minutos.

La causa de su enorme toxicidad reside en que inhibe la respiración celular. Entra en el organismo por inhalación y cuando llega a la sangre provoca la inhibición de una de las enzimas necesarias para el transporte del oxígeno en las células, la citocromooxidasa, por cuyo ion Fe^{3+} tiene el cianuro gran afinidad. Provoca por ello una especie de asfixia interna o celular y, consiguientemente, la muerte fulminante del intoxicado. Por esta enorme rapidez, aunque existen antídotos específicos sólo resultan eficaces si se administran casi inmediatamente después de la intoxicación.

Este veneno también puede introducirse en el organismo ingiriendo una disolución de una de sus sales, como el cianuro potásico. Esto se debe a que el ion cianuro NC^- de ésta reacciona con el ácido clorhídrico del estómago y produce cianuro de hidrógeno:



Cuando se inhalan dosis letales de este gas o se ingiere en forma de disolución de una de sus sales, como el cianuro potásico, se produce una pérdida de la consciencia, rigidez corporal, grave dificultad respiratoria y muy rápidamente, en dos o tres minutos, sobreviene la muerte. A veces estos efectos son tan acentuados que se confunden con un ataque epiléptico. Los vapores de cianuro de hidrógeno tienen un olor característico a almendras amargas, lo que le hace fácilmente detectable, ya que en la persona envenenada con esta sustancia se percibe el mismo olor.

Es uno de los venenos más empleados en envenenamientos y suicidios. Por ejemplo, fue el que se empleó en el asesinato de Rasputín, en la corte del zar de Rusia Nicolás II. También Goebbels y su mujer lo eligieron para el suicidio colectivo de su familia cuando cayó el régimen nazi. Uno de los últimos casos de empleo de este veneno fue en la muerte de Ramón Sampedro, en 1998.

10.9.2. Otras plantas venenosas

- *Cicuta*

La cicuta es una planta herbácea muy tóxica, famosa porque con ella se llevó a cabo a ejecución del filósofo griego Sócrates en 399 a.C., condenado a muerte por las autoridades de Atenas. Su toxicidad la debe al alcaloide de estructura muy sencilla, *coniina*, o 2-propil piperidina, muy venenoso, que se encuentra en las semillas de la planta (figura 10.9), siendo su dosis letal en un adulto de 1 mg por kilogramo de peso.

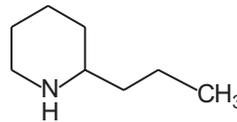


FIGURA 10.9. Planta de cicuta y estructura del alcaloide *coniina*.

- *Nicotina*

Es un alcaloide tóxico que procede de las plantas *Nicotiana tabacum* y *Nicotiana rustica* (figura 10.10). Es un líquido denso y oleoso, de color amarillo pálido. Por su toxicidad se utiliza como insecticida. La dosis letal para los humanos es de 1 mg/Kg de peso.

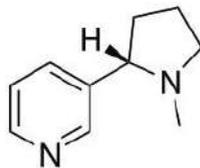


FIGURA 10.10. Estructura del alcaloide *nicotina*.

- **Aconitina**

Es el alcaloide responsable de la toxicidad del acónito (*Aconitum napellus*), planta ornamental utilizada frecuentemente como veneno desde la Antigüedad, sobre todo por los romanos (ver imagen de la portada). De sabor amargo y picante, se absorbe en la ingesta y produce molestias gastrointestinales, estado de excitación general, parálisis del aparato respiratorio y fallo cardiaco. Su estructura (figura 10.11) es ya más compleja que la de los alcaloides anteriores.

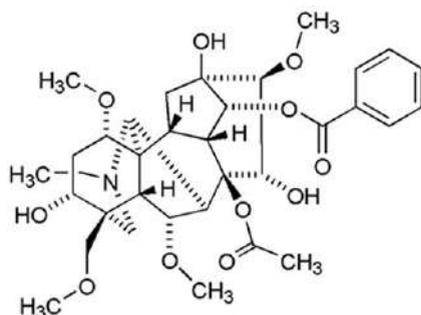


FIGURA 10.11. Estructura del alcaloide *aconitina*.

- **Estricnina**

Es uno de los venenos clásicos, de los más utilizados posiblemente por su fácil acceso, ya que se ha empleado mucho en raticidas. Es un alcaloide de sabor muy amargo, que se extrae de las semillas de la nuez vómica, *Strychnos nux vomica* (figura 10.12).

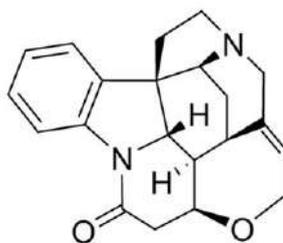


FIGURA 10.12. Rama y semilla del árbol nuez vómica y estructura del alcaloide *strychnina*.

La dosis mortal es de 0,35 mg/kg. Rápidamente afecta a la médula espinal, produciendo tremendos espasmos con fuertes contracciones que dan lugar a que la espalda se arquee violentamente (figura 10.13). La muerte ocurre por parada cardiorrespiratoria. En el cadáver aparece la «risa sardónica» característica, debida a la contracción de los músculos faciales.



FIGURA 10.13. Contracción provocada por la estricnina, dando lugar al arqueamiento de la espalda.

10.10. VENENOS DE ORIGEN ANIMAL

Entre los venenos de origen animal todos conocemos los de serpientes (víboras, de cascabel, cobras...), arañas, escorpiones, abejas, medusas, peces o anfibios. No obstante, en comparación con los anteriores, los venenos animales son menos numerosos. No entraremos en muchos detalles y solamente trataremos brevemente de un veneno de interés desde el punto de vista histórico, las *cantáridas* (no confundir con la cantarella, antes mencionada en la sección dedicada al arsénico).

• *Cantáridas*

La cantárida (*Lytta vesicatoria*) es un insecto coleóptero, de color verde esmeralda metalizado y de 12 a 22 mm de largo (figura 10.14), que aunque también se conozca como mosca española es en realidad un escarabajo. También se llamaba cantárida a su extracto, que se presentaba en polvo (polvo de cantáridas), obtenido por desecación del insecto y posterior trituración. Desde la Antigüedad se ha empleado en medicina principalmente

por su poder vesicante, para tratar ulceraciones y otros problemas de la piel mediante emplastos de ese producto. También para la alopecia y, por vía oral, se ha prescrito como diurético. Asimismo, se ha empleado como afrodisíaco, constituyendo durante mucho tiempo el material por excelencia para preparar filtros de amor para todas las capas sociales, desde campesinos hasta la nobleza. Así, se dice que el Infante Don Juan, hijo de los Reyes Católicos, murió a causa del empleo habitual de este producto (e, incluso, parece ser que ésta fue también la causa de la muerte de su propio padre, Fernando II de Aragón). El efecto afrodisíaco de las cantáridas (algo parecido a la actual «viagra») se produce a muy pequeñas dosis, pero ya con uno o dos gramos del extracto se convierten en un poderoso veneno. Ello se debe a su efecto corrosivo en vejiga y riñones, produciendo además la inflamación del hígado, con lo que se llega a la muerte en pocos días.

El principio activo de la cantárida es la *cantaridina*, $C_{10}H_{12}O_4$, cuya dosis letal es de 10-50 mg para un adulto de peso medio.

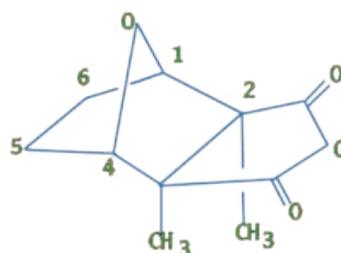


FIGURA 10.14. Coleóptero cantárida y *cantaridina* ($C_{10}H_{12}O_4$), principio activo.

10.11. VENENOS DE ORIGEN ARTIFICIAL

Dentro de este amplio grupo discutiremos unos compuestos sintetizados en el laboratorio, pero que a una determinada dosis son un veneno bastante eficaz. Se trata de los barbitúricos.

• *Barbitúricos*

Pertencen al grupo de medicamentos que actúan modificando selectivamente el sistema nervioso central, por lo que también se conocen como *psicotrópicos*. La acción psicotrópica consiste en que estos fármacos modifican el estado de ánimo. En conjunto hay cuatro categorías, aunque su

separación a veces no es tan nítida: tranquilizantes; antidepressivos; estimulantes y depresores del apetito, y psicotomiméticos.

Dentro de la categoría de los tranquilizantes los más antiguos son los *barbitúricos*, que se conocen desde los primeros años del siglo XX. Son hipnóticos e inductores del sueño, y se obtienen por una sencilla y corta síntesis orgánica, en la que se parte de dos compuestos muy simples, urea y ácido malónico sustituido. Como puede observarse en la figura 10.15, se obtiene un ácido barbitúrico sustituido y, según cuáles sean los sustituyentes (R_1 y R_2), resultan distintos barbitúricos. Por ello se consideran derivados del ácido barbitúrico ($C_4H_4N_2O_3$).

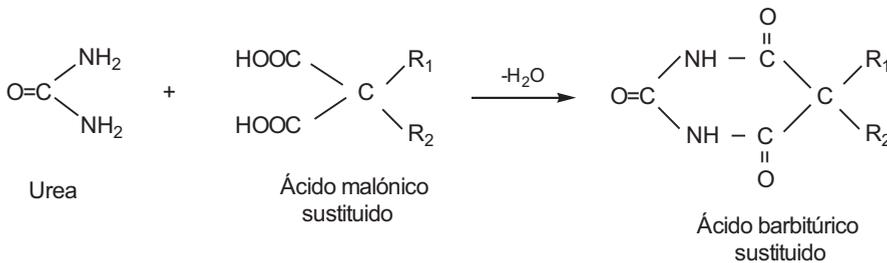


FIGURA 10.15. Síntesis de barbitúricos.

Los barbitúricos producen depresión cerebral y según la dosis y el tipo de barbitúrico pueden presentar efecto sedante (tranquilizante), hipnótico (inductor del sueño), anticonvulsivo o anestésico. Por ello algunos se emplean actualmente para prevenir las crisis epilépticas y otros en anestesia quirúrgica. Se han utilizado sobre todo como ansiolíticos, (para evitar los estados de ansiedad) y para el tratamiento del insomnio. A veces se emplean como drogas de abuso (ver tema 9), pues tanto por vía intravenosa como por vía oral producen síntomas similares al alcohol (borrachera barbitúrica).

A pesar de su actividad tienen serios inconvenientes: producen hábito y, además, se alcanza fácilmente la dosis letal (la sobredosis puede causar shock, depresión respiratoria, coma y llegar a la muerte), sobre todo cuando se ingiere alcohol al mismo tiempo.

Por esta razón, han sido las piezas clave de suicidios (recuérdese el caso de Marilyn Monroe) o de intentos de suicidio. Debido a estos inconvenientes, en algunas de sus aplicaciones se les sustituye últimamente por las benzodiacepinas.

10.12. POLONIO, UN VENENO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

Los venenos estudiados anteriormente producían una interferencia en el metabolismo celular por reacciones de tipo químico, en definitiva, con las células del organismo afectado. Sin embargo, en este caso, el de envenenamiento con polonio, la causa va a ser distinta: se debe a las emisiones de tipo radiactivo que esta sustancia emite desde el interior del organismo al que se le ha administrado. Veamos por qué, a través del tristemente famoso caso de Alexis Litvinenko, ex espía ruso que había pertenecido en su día a la KGB, exiliado en el Reino Unido y que vivía en Londres. Fue envenenado con polonio, elemento altamente radiactivo.



FIGURA 10.16. Alexis Litvinenko, envenenado con polonio.

Litvinenko cayó enfermo el 1 de noviembre, después de una serie de reuniones con contactos rusos e italianos en la capital británica, y murió el 23 de ese mes, tras una agonía de casi cuatro semanas provocada por un altísimo nivel de radiación. Tenía sólo 43 años (figura 10.16). Todavía en vida, los análisis de orina revelaron la presencia de un material radiactivo que, en principio, se pensó que era el talio. Pero el resultado de la autopsia reveló trazas de polonio-210 en su cuerpo, y, además, mostró dos focos de radiación en el cadáver, lo que indicaba dos envenenamientos con polonio 210 en distintos días. Parece ser que la primera vez se le suministró el isótopo letal en una taza de té en el bar del famoso Hotel Millenium, en un lujoso barrio londinense, en el que, además, ocho camareros resultaron contaminados con

polonio. El segundo envenenamiento pudo haberse producido días después en un restaurante japonés, mezclado en el «sushi».

Por otra parte, en noviembre de 2013 los medios de comunicación publicaron la noticia de que los últimos análisis forenses de los restos del líder palestino Yaser Arafat parecen revelar que también murió a causa de un envenenamiento con polonio.

Analicémoslo desde el punto de vista químico:

El polonio, Po, tiene como número atómico 84 y, al tener tantos protones, es un núcleo inestable, como lo son todos a partir del elemento bismuto, justamente el elemento anterior (83). Por ello, todos sus isótopos son radiactivos. De los isótopos que se le conocen es el polonio 210 el único que está disponible en la naturaleza, aunque en muy pequeñas cantidades, y proviene de la desintegración del uranio 238, muy común, por ejemplo, en los suelos graníticos. Este isótopo de polonio tiene un periodo de semidesintegración de 138,39 días, es decir, que sus efectos radiactivos duran bastante tiempo. Además, es un fuerte emisor de partículas alfa (núcleos de helio, ${}^4_2\text{He}$).

Las partículas alfa externamente no son muy nocivas, ya que pueden ser detenidas por la ropa o incluso por las capas de la piel, pero son más peligrosas (y mucho más) cuando se introducen en el interior del organismo, como fue en este caso, por ingestión. Pero, *¿cuál es la justificación, desde un punto de vista químico, de la producción de estos daños en el organismo?* La causa es el carácter ionizante de las radiaciones. Por su elevada energía son capaces de arrancar electrones a los átomos y moléculas que se encuentran a su paso, formando así iones y radicales. Los radicales, llamados también radicales libres, son especies químicas con uno o más electrones desapareados, que les hacen ser sumamente reactivos. Se forman así los radicales hidroxilo, $\bullet\text{OH}$, átomos de hidrógeno, $\bullet\text{H}$, o el ion superóxido, O_2^- . Los radicales libres atacan las membranas celulares de los tejidos, las funciones orgánicas de enzimas y ADN, etc., con lo cual las biomoléculas se ionizan y terminan destruyéndose.

Hacia noviembre de 2013 apareció en los medios de comunicación la noticia de que los últimos análisis forenses de los restos del líder palestino Yaser Arafat parecen revelar que también murió a causa de un envenenamiento con polonio.

10.13. VENENOS: NUEVAS PERSPECTIVAS

Como ya se ha comentado, el empleo intencionado de los venenos contra la vida humana ha tenido su campo de aplicación en suicidios y homicidios. Para este último objetivo, sin embargo, su uso se está restringiendo enormemente en la actualidad, debido sobre todo a la enorme mejora de los

análisis toxicológicos post mortem, capaces de detectar cantidades mínimas de veneno en los cadáveres. No obstante, desde hace unos cien años ha tomado nuevas perspectivas. En este sentido, se han empleado como «solución» legal en muchos casos de condena a muerte por los tribunales de ciertos países. Tales son la «cámara de gas» (constituido fundamentalmente por cianuro de hidrógeno) o la inyección letal en algunos estados norteamericanos.

No obstante, los venenos también han sido utilizados para causar la muerte simultánea de gran número de personas, es decir, para el asesinato en masa. Así, como arma para la guerra química, uno de cuyos primeros ejemplos es la *lewisita*, gas que contenía arsénico (compuesto derivado del dimercaptopropanol), poderoso veneno empleado en la Primera Guerra Mundial por los alemanes, y para el que los británicos consiguieron un antídoto (**British Anti Lewisite**, más conocido por las siglas BAL). También en los campos de exterminio nazi, durante la Segunda Guerra Mundial, para producir el asesinato masivo de los prisioneros en las cámaras de gas, los alemanes emplearon el producto conocido como Zyklon B, insecticida constituido principalmente por ácido cianhídrico.

Y además, hay una nueva perspectiva en el empleo de venenos, la del *terrorismo*. Un interesante ejemplo lo constituye el atentado con «gas sarín» (compuesto organofosforado de síntesis, desarrollado inicialmente en Alemania, en 1939, como pesticida) llevado a cabo en 1955 en el metro de Tokio.

EJERCICIOS Y SOLUCIONES

Planteamiento

1. Explique brevemente la *diferencia* entre:
 - a) Antídoto y antagonista.
 - b) Dosis letal y dosis tóxica.
2. Se señalan una serie de venenos y una serie de características. Empareje cada *item* de una serie con uno de la otra, según corresponda:

Venenos: talio; monóxido de carbono; cianuro de hidrógeno; estricnina.

Características: es un alcaloide; uno de sus antídotos es el ferrocianuro férrico; se combina rápidamente con la hemoglobina; inhibe la acción de la enzima citocromooxidasa.

3. Se sospecha de una muerte por envenenamiento con arsénico. Por este motivo, se ha exhumado el cadáver de la posible víctima y realizado los análisis pertinentes. Éstos revelan restos de arsénico. Con sólo este dato, ¿puede afirmarse con seguridad que la muerte fue debida a envenenamiento por arsénico?

Justifique su respuesta.

4. El talio es un veneno muy activo. Explique brevemente el mecanismo de acción de este veneno y a qué se debe su gran toxicidad.

Resolución

1. a) El antídoto es una sustancia que actúa sobre el mismo veneno anulando sus efectos tóxicos, bien porque altera su naturaleza químicamente o bien porque lo hace desaparecer en mayor o menor grado. Sin embargo, la acción del antagonista consiste en que, al introducirse en el organismo, se une a determinados receptores celulares sin provocar una respuesta biológica, entrando así en competencia con aquellos tóxicos que actúan sobre esos mismos receptores (así, la acción fisiológica dañina producida por estos tóxicos quedará bloqueada).
- b) Para un tóxico determinado, la diferencia entre dosis letal y dosis tóxica consiste en que la primera es una cantidad tal que produce la muerte al organismo, mientras que la segunda causa un efecto dañino, pero no llega a ocasionar la muerte.

2. *Talio* - uno de sus antídotos es el ferrocianuro férrico.

Monóxido de carbono - se combina rápidamente con la hemoglobina.

Cianuro de hidrógeno - inhibe la acción de la enzima citocromooxidasa.

Estricnina - es un alcaloide.

3. No basta con hallar arsénico en la muestra, sino que debe encontrarse en cantidad suficiente para causar la muerte. Además, como es el caso de exhumación de un cadáver, hay que tener en cuenta el arsénico que puede provenir de los terrenos que circundan la tumba, y también el arsénico «natural» presente en nuestro organismo (como bioelemento que es, aunque se encuentra en bajísima proporción).
4. Habría que hablar mejor del ion Tl^+ . Este ion es muy similar al K^+ , ya que ambos iones tienen la misma carga y tamaños muy parecidos. Por esta razón, una vez dentro del organismo el Tl^+ «sustituye» al K^+ en los tejidos, pero no puede cumplir la función de éste, fundamental en la transmisión de impulsos nerviosos. En definitiva, el Tl^+ interfiere en los procesos metabólicos en los que interviene el K^+ , por lo que afecta al cerebro, nervios y músculos. Por otra parte, el talio reacciona además con los restos de azufre de muchas proteínas, con lo que el funcionamiento de otros importantes procesos metabólicos y el sistema nervioso central se ven también afectados.

LECTURA**«El caso Lafarge y la difusión del test de Marsh»**

Este caso de envenenamiento con arsénico conmocionó la sociedad francesa de mediados del siglo XIX. Una de sus protagonistas fue Marie, joven viuda que a los 24 años vuelve a casarse a instancias de su familia, que concierta su nuevo matrimonio. Pero al poco tiempo su segundo marido, Charles Lafarge, muere tras una corta enfermedad, aquejado de intensos dolores de estómago y fuertes vómitos. Esto sucede en 1840, época en que eran frecuentes los envenenamientos por arsénico, por lo que ante síntomas tan evidentes se piensa que Charles podría haber muerto de esta manera. Las sospechas recaen rápidamente en su joven esposa y, tras unos primeros análisis en los que se encuentra arsénico en el estómago de la víctima, se la acusa de haber puesto este veneno en las comidas de su marido, sobre todo en unos pasteles preparados por ella misma. Médicos y farmacéuticos realizan análisis en el cuerpo de la víctima y en diversos alimentos, pero los resultados son contradictorios y no se puede llegar a pruebas consistentes.

Es en estos momentos cuando aparece el otro protagonista de esta historia, el médico Mateu Orfila, consolidado como gran forense y toxicólogo. Orfila, empleando el método más moderno en esos días para detectar arsénico, el test de Marsh, analizó de nuevo las vísceras de Charles Lafarge, cuyo cadáver debió ser exhumado nuevamente (figura).

De esta manera, encontró arsénico en el cuerpo de la víctima en una cantidad superior a la que podría corresponder al arsénico natural presente en el organismo humano. Además, analizó muestras de la tierra próximas al lugar del enterramiento, con lo que demostró que ese arsénico no podía provenir de allí. Con todos estos resultados, la señora Lafarge fue declarada culpable de matar a su marido por envenenamiento con arsénico. Y así, se la condenó a cadena perpetua. Sin embargo, no todos admitieron las conclusiones de Orfila, estallando una fuerte polémica que incendió la opinión pública. Hubo enérgicos ataques contra Orfila en la prensa, lo que dio lugar a la llamada «batalla del arsénico». Unos condenaban abiertamente a Marie, pero otros creían firmemente en su inocencia. Con todo, fue una magnífica publicidad para el método analítico de James Marsh... y también para Orfila y una nueva ciencia, la toxicología. En cuanto a Marie Lafarge, tras diez años de reclusión fue indultada por Napoléon III. Pero murió muy poco después, en 1852, enferma de tuberculosis, declarándose inocente hasta el último momento de su vida.



LECTURA

«Alan Turing y la manzana envenenada con cianuro»

A Alan Turing se le considera el padre de la informática e inventor de los ordenadores. Y no sin motivo. De familia acomodada, nació en Londres, en Paddington por más señas, en 1912. Ya desde la enseñanza secundaria destacó por su afición a los problemas de cálculo y a los crucigramas. Debido a su atracción por las matemáticas descuidó sus estudios en las disciplinas de clásicas, por lo cual no consiguió ser aceptado en el Trinity College de la Universidad de Cambridge, teniendo que conformarse con su segunda opción, el King's College de la misma universidad. En la Universidad de Princeton (Estados Unidos), donde permaneció dos años, defendió su Tesis Doctoral.

Un artículo publicado en 1936 sobre los números computables y en el que presentó lo que se conoce como «máquina de Turing», le abrió las puertas del éxito en el mundo de las matemáticas. Tanto fue así que en los inicios de la Segunda Guerra Mundial fue requerido por el ejército británico para descifrar el lenguaje codificado Enigma, empleado por los nazis como sistema de comunicación en sus ataques bélicos. Gracias en gran parte a la construcción de una máquina electromecánica para realizar los cálculos necesarios a una mayor velocidad, Turing logró ese objetivo casi inalcanzable, con lo cual la guerra se acortó al menos en dos años. Podemos decir con justicia que gracias a Turing se salvaron así millones de vidas. Pero todos estos trabajos se mantuvieron en el más riguroso secreto, y hasta los años setenta no hicieron públicos, cuando fueron desclasificados.

Tras la guerra Turing se dedicó plenamente a su brillante investigación. Pero en 1952 se inicia la gran tragedia de su vida, cuando es acusado de prácticas homosexuales. Salta el escándalo y, condenado a dos años de prisión, se le ofrece como alternativa la castración química. Lo acepta, sometiéndose a un tratamiento con estrógenos, lo que le afecta físicamente, produciéndole impotencia, crecimiento de los senos y aumento notable de peso. Intelectualmente sigue tan creativo como siempre, pero sufre el rechazo social y el vacío de colegas y amigos. En 1952, cuando no contaba aún 42 años de edad, muere de forma misteriosa al comer parte de una manzana envenenada con cianuro. ¿Suicidio, accidente o, incluso, asesinato? Oficialmente se aceptó la primera hipótesis, aunque en realidad no hay razones consistentes para rechazar las otras dos.

Se ha especulado con la simbología de la manzana. En primer lugar, con el relato bíblico de Adán y Eva y su expulsión del Paraíso, pero también con la manzana envenenada del

cuento de Blancanieves. Asimismo, se llegó a ver en el logo de la marca de ordenadores Apple (la manzana mordida) un homenaje a Turing, si bien sus diseñadores y la firma lo han negado. Además de la exoneración y «perdón» póstumo por parte del gobierno británico, son numerosísimos los homenajes y tributos en su honor en todo el mundo, tanto en el ámbito científico como incluso en el del espectáculo. Tales son una pieza de teatro, telefilms, musicales... El último, en los momentos de escribir estas líneas, es la película The Imitation Game (2014), sobre la vida de Turing, centrada principalmente en su participación en el trabajo sobre Enigma.

BIBLIOGRAFÍA

Química Forense

- ANADÓN, M. J. y ROBLEDO, M. M. (Coordinadoras). *Manual de Criminalística y Ciencias Forenses: Técnicas forenses aplicadas a la investigación criminal*. Editorial Tébar, Madrid, 2010. ISBN: 978-84-7360-338-6.
- BELL, S. *Forensic Chemistry*. 2.^a ed., Ed. Pearson, Madrid, 2013. ISBN: 978-0-321-81687-0.
- CADDY, B. (Editor). *Forensic Examination of Glass and Paint. Analysis and Interpretation*. Taylor & Francis. London. 2001. ISBN: 0-7484-0579-8
- CASTELLÓ PONCE, A. *Manual de Química Forense*. Editorial Comares, 2009. ISBN: 978-84-9836-625-9.
- HAWTHORNE, M. R. *Fingerprints. Analysis and understanding*. Taylor & Francis Group. 2009. ISBN: 978-1-4200-6864-1.
- DONÍS, M. *Envenenadoras*. Editorial La Esfera de los Libros, Madrid, 2002. ISBN: 849-73-4063-9.
- JACKSON, A. R. W. y JACKSON, J. M. *Forensic Science*. 3.^a ed., Pearson Education, Essex, UK. 2011. ISBN: 978-0-273-73840-4.
- JOHLL, M. E. *Química e Investigación Criminal. Una perspectiva de la Ciencia Forense*. Editorial Reverté, Barcelona, 2008. ISBN: 978-84-291-5512-9.
- KOBILINSKY, L. (Editor). *Forensic Chemistry Handbook*. Wiley, New Jersey, USA, 2012. ISBN: 978-0-471-73954-8.
- MUÑOZ PÁEZ, A. *Historia del Veneno*. 2.^a ed., Editorial Debate, Barcelona, 2012. ISBN: 978-84-9992-088-7.
- PLATT, R. *En la escena del Crimen*. Editorial Pearson Education, Madrid, 2003. ISBN: 84-205-4057-9.
- ROBERTSON, J. y GRIEVE (Editores), M. *Forensic Examination of Fibres*. 2.^a ed. Taylor and Francis. UK. 1999. ISBN 0-203-79275-0.
- SAFERSTEIN, R. *Criminalistics. An Introduction to Forensic Science*. 8.^a ed., Pearson Education International, New Jersey, USA, 2004. ISBN: 0-13-122889-7.
- THOMPSON, R. B. y THOMSON, B. F. *Illustrated Guide to Home Forensic Science Experiments*. 1.^a ed. O'Reilly Media Inc. 2012. ISBN: 978-1-449-33451-2.
- WHITE, P. C. (Editor). *Crime Scene to Court. The Essentials of Forensic Science*. 2.^a ed., Lincoln, UK, 2004. ISBN: 0-85404-656-9.
- YOUNT, L. *Forensic Science. From Fibers to Fingerprints*. Chelsea House. New York. 2007. ISBN 0-8160-5751-6.

Análisis Químico e Instrumental

SKOOG, D.; WEST, D. M.; CROUCH, S. R.; HOLLER, J. *Fundamentos de Química Analítica*. 8.^a ed., Editorial Thomson Paraninfo, S.A. Madrid, 2005. ISBN: 978-84-9732-333-8.

SKOOG, D.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R., *Principios de análisis instrumental*. 6.^a ed., Editorial Cengage Learning. Méjico, 2008. ISBN: 978-97-0686-829-9.

SMITH, E. y DENT, G. *Modern Raman Spectroscopy. A Practical Approach*. John Wiley and Sons, Ltd, 2005. ISBN 0-471-49668-5.

Química Orgánica

CAREY, F. A. *Química orgánica*. 6.^a ed., Editorial Mc Graw Hill, México, 2006. ISBN: 978-970-10-5610-3.

HART, H.; HART, D. J.; CRAINE, L. E. y HADAD, C. M. *Química Orgánica*. 12.^a ed., Editorial Mc Graw Hill, Madrid, etc., 2007. ISBN: 978-84-481-5657-2.

Bioquímica

DÍAZ ZAGOYA, J. C.; JUÁREZ OROPESA, M. A., *Bioquímica, un enfoque básico aplicado a las ciencias de la vida*. Editorial Mc Graw Hill, México, 2007. ISBN: 978-97-010-4818-4.

TEIJÓN RIVERA, J. M.^a; GARRIDO PERTIERRA, A. *Fundamentos de bioquímica estructural*. 2.^a ed., Editorial Tébar, Madrid 2006. ISBN: 84-7360-228-5.

Química Inorgánica

ATKINS, P. *et al. Química Inorgánica*. 4.^a ed. Editorial Mac Graw Hill, México, 2006. ISBN: 978-01-992-6463-6.

RAYNER-CANHAM, G. *Química Inorgánica descriptiva*. 2.^a ed., Editorial Pearson Educación, México, 2000. ISBN: 978-96-844-4385-3.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

A	Adenina
AA o AAS	Espectroscopía de Absorción Atómica (del inglés Atomic Absorption Spectroscopy)
AAN	Análisis por Activación de Neutrones
ADN	Ácido Desoxirribonucleico (en inglés DNA, Desoxiribonucleic Acid)
Ala	Alanina
ARN	Ácido Ribonucleico (en inglés RNA, Ribonucleic Acid)
Arg	Arginina
Asp	Ácido aspártico
BAL	British Anti Lewisite
BP	Black Power
C	Citosina
CE	Electroforesis Capilar (del inglés Capillary Electrophoresis)
CODIS	Sistema de Índice Combinado de ADN (del inglés Combined DNA Index System)
CSI	Investigación en la Escena del Crimen (del inglés Crime Scene Investigation)
DA	Drogas de Abuso
DFO	1,8-Diazafluoren-9-ona
DHS	Dynamic Headspace
DMA	Dimetilaminocinamaldehído
<i>p</i> -DMAB	<i>p</i> -Dimetilaminobenzaldehído
DMNB	2,3-Dimetil-2,3-dinitrobutano
DOB	4-Bromo-2,5-dimetoxi- α -metilfenilamina
EDTA	Ácido Etilendiaminotetraacético (del inglés Ethylenediaminetetraacetic acid)
EDX	Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X (del inglés Energy Dispersive X-Ray Spectrometry)
EGDN	1,2-Dinitroxietano o Dinitrato de etilenglicol
ENFSI	Red Europea de Institutos de Ciencia Forense (del inglés European Network of Forensic Science Institutes)
ESDA	Aparato de Detección de Energía Estática (del inglés Electro-Static Detection Apparatus)

FBI	Oficina Federal de Investigación (del inglés Federal Bureau of Investigation)
FID	Detector de Ionización de Llama (del inglés Flame Ionization Detector)
μFRX	Micro-fluorescencia de Rayos X
FTIR	Espectroscopia IR con Transformada de Fourier (del inglés Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
G	Guanina
GC	Cromatografía de Gases (del inglés Gas Chromatography)
GC-GC	Cromatografía de Gases bidimensional
GC-MS	Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (del inglés Gas Chromatography-Mass Spectrometry)
GC-MS/MS	Cromatografía de Gases con Espectrometría de Masas en tándem
GE	Electroforesis en Gel (del inglés Gel Electrophoresis)
GHB	Ácido γ-Hidroxibutírico
Gln	Glutamina
Glu	Ácido glutámico
Gly	Glicina
Hb	Hemoglobina
His	Histidina
HMX	1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazocano
HPLC	Cromatografía Líquida de Alta Eficacia (del inglés High-Performance Liquid Chromatography o High-Pressure Liquid Chromatography)
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (del inglés Inductively-Coupled-Plasma-Mass-Spectrometry)
Ile	Isoleucina
IMS	Espectrometría de Masas de Movilidad Iónica (del inglés Ion-mobility Spectrometry)
INTCF	Instituto Nacional de Toxicología y Ciencias Forenses
IP	Power Index

IR	Espectroscopía Infrarroja
JIFE	Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes
LA	Ablación Láser
LA-ICP-MS	del inglés Laser Ablation-Inductively-Coupled-Plasma-Mass-Spectrometry
LC	Cromatografía Líquida (del inglés Liquid Chromatography)
Leu	Leucina
L.I.I	Límite Inferior de Inflamabilidad (en inglés L.E.L., Lower Explosive Limit)
LSD	Dietilamida del Ácido Lisérgico (del inglés Lysergic Acid Diethylamide)
L.S.I	Límite Superior de Inflamabilidad (en inglés U.E.L, Upper Explosive Limit)
Lys	Lisina
MBDB	N-metil-1,3-benzodioxolilbutanamine
MDA	3-4-Metilenodioxianfetamina
MDEA	3-4-Metilenodioxietilamfetamina
MDMA	3-4-Metilenodioximetamfetamina
MEFS	Microextracción en Fase Sólida (SPME en inglés, Solid Phase Microextraction)
<i>o</i> -MNT	<i>o</i> -Mononitrotolueno
5-MTN	5-Metiltioninhidrina
<i>p</i> -MNT	<i>p</i> -Mononitrotolueno
Met	Metionina
MS	Espectrometría de Masas (del inglés Mass Spectrometry)
MSP	Microespectrofotometría (del inglés Micro-Spectrophotometry)
NG	Nitroglicerina
OB	Balance de Oxígeno (del inglés Oxygen Balance)
OMS	Organización Mundial de la Salud
p.e	Punto de ebullición
p.f	Punto de fusión
Pa	Pascal
PCR	Reacción en Cadena de la Polimerasa (del inglés Polymerase Chain Reaction)

PD	Physical Developer
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidad (HDPE en inglés, High Density Polyethylene)
PEBD	Polietileno de Baja Densidad (LDPE en inglés Low Density Polyethylene)
PENT	1,3-Dinitrato-2,2-bis(nitratometil)propano
PGC o Py-GC	Pirólisis acoplada a la Cromatografía de Gases (del inglés Pyrolysis-Gas Chromatography)
Phe	Fenilalanina
PMA	p-Metoxianfetamina
PP	Polipropileno
Pro	Prolina
PSA (o P30)	Antígeno Prostático Especifico (del inglés Prostate-Specific Antigen)
PTFE	Politetrafluoroetileno
PVC	Policloruro de Vinilo (del inglés Polyvinyl Chloride)
QDE	Examen de Documentos Cuestionados (del inglés Questioned Documents Examination)
RAE	Real Academia Española
RES	Resonancia de Spin Electrónico
R_f	Ratio of front
RFLPs	Polimorfismos de Longitud de Fragmentos de Restricción (del inglés Restriction Fragment Length Polymorphisms)
RMN	Resonancia Magnética Nuclear (en inglés NMR, Nuclear Magnetic Resonance)
RTX	Tetróxido de Rutenio
RUVIS	Sistema de Procesamiento de Imágenes por Reflejo Ultravioleta (del inglés Reflected Ultra-Violet Imaging System)
S&W	Smith and Wesson
SAID	Sistema Automático de Identificación Dactilar (AFIS en inglés Automated Fingerprint Identification System)

SEM	Microscopía Electrónica de Barrido (del inglés Scanning Electron Microscope)
SEM-EDX	Microscopía Electrónica de barrido acoplada a espectrómetro de Energía Dispersiva de rayos X (del inglés Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray spectrometry)
Ser	Serina
SERRS	Surface Enhanced Resonance Raman Scattering
SF	Fluido Supercrítico (del inglés Supercritical Fluid)
SFC	Cromatografía de Fluidos Supercríticos (del inglés Supercritical Fluids Chromatography)
SNC	Sistema Nervioso Central
SPR	Small Particle Reagent
STR	Repetición de Tandems Cortos (del inglés Short Tandem Repeat)
T	Timina
TATP	2,4,6-Trinitrobenceno-1,3,5-triamina
TEA	Thermal Energy Analyser
THC	TetraHidroCannabinol
Thr	Treonina
TLC	Cromatografía en Capa Fina (del inglés Thin Layer Chromatography)
TNT	2,4,6-Trinitrotolueno
TPE	Tereftalato de Polietileno
T _R	Tiempo de Retención
Trf	Triptófano
Tyr	Tirosina
U	Uracilo
UV	Espectroscopía Ultravioleta
Val	Valina
VDM	Deposición de Metales a Vacío (del inglés Vacuum Metal Deposition)
XRD	Difracción de Rayos X (del inglés X-Ray Diffraction)
XRF	Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (del inglés X-Ray Fluorescence Spectroscopy)



Juan del Rosal, 14
28040 MADRID
Tel. Dirección Editorial: 913 987 521

La Química Forense es una disciplina que en los últimos tiempos está alcanzando un elevado nivel de interés debido al importante papel que juega en la investigación criminal. Pese a esto, no existen muchas obras en castellano sobre esta disciplina, la mayoría están publicadas en lengua inglesa, y es esta una de las razones por las que se elaboró este texto, pensado, en principio, para la asignatura del mismo nombre perteneciente al grado en Química de la UNED. No obstante, su aplicación puede ser más extensa, pues proporciona una base de conocimientos a todos aquellos interesados en la especialización de Criminología.

M.ª del Pilar Cornago Ramírez es doctora en Ciencias Químicas y licenciada en Farmacia por la UCM. Profesora titular del área de Química Orgánica de la UNED, es coautora de diversos materiales didácticos específicos de la enseñanza a distancia, e imparte docencia en asignaturas del grado en Química y del máster en Ciencia y Tecnología Química. Su labor investigadora, desarrollada en la UNED y el CSIC, ha dado lugar a numerosas publicaciones en revistas internacionales y en congresos nacionales e internacionales.

Soledad Esteban Santos es doctora en Ciencias Químicas y licenciada en Sociología por la UCM. Profesora titular de Química Orgánica y profesora emérita de la Facultad de Ciencias de la UNED, ha impartido docencia en asignaturas de grado y másteres, y también ha diseñado y dirigido cursos de formación continua para profesores de Ciencias. En investigación, ha publicado numerosos artículos en revistas especializadas y participado en congresos. Es autora de materiales didácticos de diversos tipos y ha realizado frecuentemente actividades de divulgación científica.



ISBN: 978-84-362-6982-6



9 788436 269826

6103415GR02A01