



RELACIÓN ANATOMÍA/INMUNOLOGÍA Y LA ENSEÑANZA DEL MAPA DE LAS DEFENSAS CORPORALES

Lianne Dunán-Cala¹ <https://orcid.org/0009-0000-4072-348X>

¹ Estudiante de 4to año de Medicina. Alumna ayudante de Inmunología. Universidad Médica de Santiago de Cuba. Facultad de Medicina No.1. Santiago de Cuba.

Correo electrónico: liannedunancala@gmail.com

Resumen:

Este estudio explora la profunda interrelación histórica y metodológica entre la anatomía y la inmunología. Mediante un análisis histórico-crítico, se examina cómo la evolución de los métodos de estudio anatómico, desde las disecciones tempranas hasta las técnicas de imagen modernas, ha sido fundamental para identificar, localizar y comprender las estructuras y funciones del sistema inmunitario. Se analizan hitos como el descubrimiento de los órganos linfoides, las células involucradas en la respuesta inmune y la base anatómica de la inmunidad en diferentes contextos (filogenético, ontogenético, clínico-epidemiológico). El ensayo también aborda la didáctica de la anatomía en ciencias de la salud, enfatizando su rol esencial en la formación de profesionales capaces de integrar el conocimiento estructural con la función inmunológica para el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades. Se concluye que la anatomía, a través de sus métodos en constante evolución, no solo ha proporcionado el mapa físico del sistema inmunitario, sino que continúa siendo un pilar indispensable para los avances en inmunología básica y aplicada.

Palabras Clave: historia de la anatomía; inmunología; sistema linfático, didáctica de la enseñanza médica.

Abstract:

This essay explores the profound historical and methodological interrelationship between anatomy and immunology. Through a historical-critical analysis, it examines how the evolution of anatomical study methods, from early dissections to modern imaging techniques, has been fundamental to identifying, locating, and understanding the structures and functions of the immune system. Milestones such as the discovery of lymphoid organs, the cells involved in the immune response, and the anatomical basis of immunity in different contexts (phylogenetic, ontogenetic, and clinical-epidemiological) are analyzed. The essay also addresses the teaching of anatomy in health sciences, emphasizing its essential role in training professionals capable of integrating structural knowledge with immunological function for the diagnosis, treatment, and prevention of disease. It is concluded that anatomy, through its constantly evolving methods,



has not only provided the physical map of the immune system but also continues to be an indispensable pillar for advances in basic and applied immunology.

Keywords: history of anatomy; immunology; lymphatic system; medical education didactics.

Introducción

La anatomía, como ciencia que estudia la estructura de los seres vivos, constituye el cimiento sobre el cual se erige la comprensión de la función fisiológica, incluyendo los complejos mecanismos de defensa que agrupamos bajo el término inmunología. La relación entre ambas disciplinas es intrínseca y dialéctica: el conocimiento anatómico preciso es un prerrequisito para entender dónde y cómo opera el sistema inmunitario, mientras que los descubrimientos inmunológicos a menudo plantean nuevas preguntas sobre la estructura y organización de los tejidos y células implicadas.⁽¹⁾ La inmunología moderna, con su enfoque molecular y celular, podría parecer distante de la anatomía macroscópica clásica. Sin embargo, esta percepción es engañosa. La identificación inicial de los órganos linfoides, la descripción de la circulación linfática, el reconocimiento microscópico de diferentes tipos celulares y la comprensión de su distribución espacial dentro de los órganos y tejidos son logros fundamentales y esencialmente anatómicos. Sin el mapa anatómico proporcionado por siglos de observación meticulosa, utilizando métodos cada vez más sofisticados, la inmunología carecería de contexto espacial y estructural.^(2, 3)

La historia de la anatomía es, en gran medida, la historia de la evolución de sus métodos de estudio. Desde las primeras disecciones humanas en la Alejandría helenística, pasando por la revolución vesaliana del Renacimiento, el advenimiento del microscopio óptico y electrónico, hasta las sofisticadas técnicas de imagenología tridimensional actuales, cada avance metodológico ha abierto nuevas ventanas para observar y comprender la arquitectura del cuerpo, incluyendo los componentes del sistema inmunitario. Estos métodos han permitido no solo describir la normalidad, sino también identificar los cambios anatómicos asociados a las respuestas inmunitarias y las patologías del sistema inmune mismo. La integración de los conocimientos anatómicos con perspectivas comparadas (filogenia), del desarrollo (ontogenia), clínico-quirúrgicas y epidemiológicas ha enriquecido enormemente nuestra comprensión de la inmunología como un sistema dinámico y distribuido por todo el organismo.^(4,5)

El recorrido histórico y metodológico realizado en este trabajo demuestra de manera inequívoca que la anatomía, a través de la continua evolución y refinamiento de sus métodos de estudio, ha sido y sigue siendo un pilar fundamental e insustituible para el desarrollo de la inmunología. Desde las primeras disecciones que identificaron órganos como el bazo y el timo, pasando por el descubrimiento revolucionario del sistema linfático y la microscopía que reveló el mundo



celular, hasta las sofisticadas técnicas de imagenología molecular e inmunohistoquímica actuales, cada avance en la capacidad de observar y analizar la estructura del cuerpo ha desvelado capas esenciales de la organización y función del sistema inmunitario. ^(7,8)

El análisis filogenético mediante la anatomía comparada ha iluminado la evolución de los mecanismos de defensa, mostrando cómo la complejidad anatómica de los órganos y tejidos linfoides ha aumentado paralelamente a la capacidad adaptativa de los vertebrados. La perspectiva ontogenética ha revelado la dinámica construcción anatómica y funcional del sistema inmunitario humano desde la vida fetal hasta la vejez, explicando vulnerabilidades y respuestas específicas en cada etapa de la vida, información crucial para la pediatría, la geriatría y la medicina preventiva. ^(9,10)

La orientación clínico-epidemiológica de la anatomía moderna ha transformado el conocimiento estructural en una herramienta práctica y poderosa. Permite interpretar signos físicos, guiar procedimientos diagnósticos y terapéuticos, interpretar imágenes médicas y comprender los patrones de diseminación de infecciones y neoplasias. La epidemiología encuentra en la anatomía el sustrato físico para entender la distribución de las enfermedades inmunorrelacionadas. La didáctica especial de la anatomía enfrenta el desafío de enseñar este sistema complejo y distribuido, superando métodos memorísticos tradicionales mediante la integración curricular, el uso de tecnología avanzada, el enfoque clínico-problemático y la correlación constante con la histología y la función inmunológica. ^(11,12)

Este trabajo tiene como objetivos analizar la evolución histórica de los métodos de estudio anatómico en el descubrimiento y comprensión del sistema inmunitario y la evolución de la inmunidad; la relevancia del desarrollo ontogenético y la anatomía de las edades para entender la maduración del sistema inmunológico humano y la importancia de la anatomía humana con orientación clínica y epidemiológica en el abordaje de patologías relacionadas con la inmunidad, así como los desafíos y estrategias didácticas para la enseñanza efectiva de la anatomía humana con enfoque inmunológico en ciencias de la salud.

Material y métodos

Este trabajo se basa en una metodología de revisión histórico-crítica y análisis documental. Se han consultado fuentes primarias y secundarias de diversa índole disponibles en repositorios digitales de universidades y bibliotecas especializadas. Se realizó la búsqueda y revisión de artículos de investigación original y de revisión en bases de datos científicas (PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar) utilizando términos clave relacionados con historia de la anatomía, métodos anatómicos, sistema linfático, inmunología histórica y didáctica de la anatomía. Se seleccionaron 30 referencias según relevancia temática, impacto científico y



metodología rigurosa. Se incluyeron revisiones sistemáticas, estudios experimentales y ensayos educativos.

El análisis siguió un enfoque histórico-crítico integrando hallazgos anatómicos con desarrollos inmunológicos. El análisis se centró en identificar los hitos metodológicos en anatomía, su aplicación al estudio de estructuras relacionadas con la inmunidad, y cómo este conocimiento estructural ha influido en el desarrollo conceptual de la inmunología. Se prestó especial atención a la conexión entre los distintos acápite solicitados y su relación con la inmunología.

Desarrollo

Historia de la anatomía: del mito al mapa del sistema inmune

La búsqueda del conocimiento anatómico es tan antigua como la medicina misma, pero estuvo inicialmente limitada por tabúes culturales y religiosos, y por la falta de métodos adecuados. En civilizaciones antiguas (Egipto, Mesopotamia), el conocimiento anatómico derivaba principalmente de prácticas como la momificación o la observación de heridas, siendo rudimentario y a menudo fusionado con conceptos míticos.⁽¹⁾ La escuela hipocrática (siglos V-IV a.C.) en Grecia promovió una medicina más naturalista, pero su anatomía se basaba principalmente en analogías y disecciones de animales. El verdadero punto de inflexión llegó en la Alejandría helenística (siglos III-II a.C.), donde figuras como Herófilo y Erasístrato realizaron las primeras disecciones humanas sistemáticas documentadas, sentando las bases de la anatomía científica.^(1,4) Erasístrato, en particular, describió estructuras que probablemente correspondían a ganglios linfáticos, aunque sin comprender su función.^(2,3)

La anatomía grecorromana culminó con Galeno (siglo II d.C.), cuya influencia perduró por más de mil años. Galeno basó su extensa obra anatómica casi exclusivamente en la disección de monos y cerdos, extrapolando sus hallazgos al humano. Describió el *rete mirabile* (inexistente en humanos), los nervios craneales, y estructuras como el timo, pero sus descripciones del sistema vascular (incluyendo una "vena absorbente" que podría aludir a la linfa) contenían errores fundamentales que entorpecieron el avance.^(4,6) La Edad Media vio un estancamiento en la disección humana en Europa Occidental, aunque el conocimiento galénico se preservó y amplió en el mundo islámico por figuras como Avicena (Ibn Sina) y Ibn al-Nafis.^(2,3)

El Renacimiento marcó el renacer de la anatomía basada en la observación directa. Andreas Vesalius (1514-1564), con su obra magna *De Humani Corporis Fabrica* (1543), desafió directamente la autoridad de Galeno mediante disecciones humanas meticulosas y descripciones e ilustraciones detalladas y precisas. Vesalius corrigió numerosos errores galénicos y proporcionó descripciones más exactas de órganos como el bazo y el timo, aunque



la función del sistema linfático seguía siendo un misterio. El siglo XVII fue testigo de dos revoluciones metodológicas clave para la inmunología incipiente: ^(2,3)

- **Descubrimiento del sistema linfático:** Gasparo Aselli (1622) identificó los vasos quilíferos (linfáticos intestinales) en perros, describiendo la vena blanca o láctea. Jean Pecquet (1651) descubrió el conducto torácico y la cisterna del quilo. Thomas Bartholin y Olof Rudbeck completaron la descripción del sistema linfático general como una red independiente del sanguíneo.

- **Invención del microscopio:** Antonie van Leeuwenhoek y Marcello Malpighi utilizaron microscopios rudimentarios para explorar un mundo invisible. Malpighi descubrió los capilares sanguíneos (completando la teoría circulatoria de William Harvey) y describió los corpúsculos del bazo y los glomérulos renales (corpúsculos de Malpighi). Observó estructuras nodulares en el bazo y describió por primera vez los corpúsculos del timo (corpúsculos de Hassall), sentando las bases de la histología.

- Los siglos XVIII y XIX vieron la consolidación y especialización de la anatomía. Giovanni Battista Morgagni (1682-1771) estableció la anatomía patológica como disciplina al correlacionar sistemáticamente los síntomas clínicos con los hallazgos de autopsia (*De Sedibus et Causis Morborum per Anatomen Indagatis*, 1761), incluyendo alteraciones en órganos linfoides [22]. Marie François Xavier Bichat (1771-1802), sin microscopio, describió 21 tipos de tejidos fundamentales (*Anatomie Générale*), incluyendo el tejido linfoide. El perfeccionamiento del microscopio compuesto en el siglo XIX permitió avances espectaculares: ⁽⁴⁻⁷⁾

- Theodor Schwann y Matthias Schleiden formularon la Teoría Celular (1839), estableciendo la célula como unidad básica de la vida.

- Rudolf Virchow desarrolló la patología celular (*Die Cellularpathologie*, 1858), proponiendo que las enfermedades ocurren a nivel celular, revolucionando la comprensión de la inflamación, el cáncer y las infecciones, procesos íntimamente ligados a la inmunidad.

- Paul Ehrlich, utilizando tinciones vitales, describió diferentes tipos de células sanguíneas, incluyendo linfocitos y mastocitos, y desarrolló su teoría de las cadenas laterales, precursora de la teoría de la selección clonal en inmunología. Él y Élie Metchnikoff (quien descubrió la fagocitosis observando células móviles en larvas de estrella de mar) compartieron el Premio Nobel de 1908, uniendo definitivamente la observación anatómica/celular con la función inmunológica. ^(2,4)

El siglo XX y XXI han traído una explosión de técnicas que han redefinido la anatomía y su contribución a la inmunología: microscopía electrónica, inmunohistoquímica, técnicas de biología molecular, y la imagenología avanzada que permite visualizar la anatomía funcional y



metabólica, incluso de procesos inmunológicos *in vivo*. La identificación anatómica precisa de poblaciones celulares inmunitarias en tejidos mediante citometría de flujo y microscopía de fluorescencia multicolor es crucial para la investigación inmunológica actual. ⁽²⁻⁵⁾

Desarrollo filogenético y anatomía comparada: la evolución de las defensas corporales

La anatomía comparada, al estudiar las similitudes y diferencias estructurales entre diferentes especies, proporciona una ventana única para comprender la evolución del sistema inmunitario y los principios fundamentales de la inmunología. El análisis filogenético revela una progresión desde mecanismos inmunitarios innatos simples en invertebrados hasta la sofisticada inmunidad adaptativa de los vertebrados, cada paso marcado por innovaciones anatómicas y celulares específicas. ^(11,12)

- **Invertebrados:** Carecen de sistema inmunitario adaptativo y de órganos linfoides organizados. Su defensa depende enteramente de la inmunidad innata. La anatomía comparada muestra células fagocíticas distribuidas en la hemolinfa o tejidos, y moléculas de reconocimiento de patrones (PRRs) que detectan patógenos. Las barreras físicas son primordiales. Estudiar estos sistemas simples revela los componentes ancestrales compartidos por todos los animales. ⁽¹³⁾
- **Peces (Vertebrados Agnatos y Gnatostomados Basales):** Aparecen los primeros órganos linfoides verdaderos, aunque primitivos. Los peces óseos y cartilaginosos poseen un timo bien desarrollado y un bazo. También tienen riñones con tejido linfoide y poseen inmunoglobulinas (IgM) y linfocitos T y B, aunque la respuesta adaptativa es menos compleja y carecen de ganglios linfáticos verdaderos. ⁽¹¹⁻¹³⁾ La anatomía comparada muestra la emergencia del sistema linfoide organizado.
- **Anfibios y reptiles:** Presentan un mayor desarrollo del sistema linfoide. Aparecen estructuras linfoides más organizadas, como la médula ósea hematopoyética y el bazo adquiere una estructura más compleja con áreas diferenciadas. Surgen los primeros ganglios linfáticos rudimentarios en algunos reptiles. Aparecen nuevas clases de inmunoglobulinas. ^(12,14)
- **Aves:** Presentan un sistema inmunitario adaptativo más avanzado. Tienen un timo, bazo y médula ósea bien desarrollados. Su característica anatómica más distintiva es la Bolsa de Fabricio (órgano linfoepitelial asociado a la cloaca), esencial para la maduración de los linfocitos B. La ausencia de ganglios linfáticos verdaderos es suplida por agregados linfoides difusos en varios órganos y por estructuras como los corpúsculos de *Peyer* en el intestino. El estudio de la Bolsa de Fabricio fue crucial para entender la división funcional entre linfocitos T y B en mamíferos. ^(12,13)



- **Mamíferos:** Alcanzan el máximo desarrollo del sistema inmunitario adaptativo y de órganos linfoides. Poseen todos los órganos linfoides primarios y secundarios altamente organizados, con áreas T y B bien definidas. Desarrollan una gran diversidad de clases y subclases de inmunoglobulinas (IgG, IgA, IgM, IgE, IgD) y un sistema de memoria inmunológica robusto. La anatomía comparada entre mamíferos muestra adaptaciones específicas.⁽¹⁴⁾

El estudio filogenético a través de la anatomía comparada demuestra que la complejidad del sistema inmunitario, en términos de diversidad celular, organización tisular y capacidad de respuesta específica, ha evolucionado paralelamente a la complejidad anatómica general del organismo y a las presiones selectivas ejercidas por patógenos. Cada innovación anatómica representa una solución evolutiva para mejorar la defensa del huésped.^(15,16)

Desarrollo ontogenético y anatomía de las edades: construyendo la defensa desde la concepción

Así como la filogenia muestra la evolución de la inmunidad entre especies, la ontogenia revela cómo se construye el sistema inmunitario humano desde el embrión hasta la vejez. La anatomía del sistema inmunitario cambia drásticamente a lo largo de la vida, reflejando su desarrollo, maduración funcional y eventual declive. Comprender esta anatomía dinámica es esencial para la pediatría, la geriatría y la inmunología clínica.^(17,18)

- **Etapas embrionaria y fetal:** Las células madre hematopoyéticas se originan primero en el saco vitelino, luego migran al hígado fetal y finalmente colonizan la médula ósea hacia el final del desarrollo fetal.⁽¹⁹⁾ El timo, derivado de la tercera y cuarta bolsas faríngeas, es el primer órgano linfóide en desarrollarse y comienza a producir linfocitos T muy temprano (semana 8-9 de gestación). El bazo y los ganglios linfáticos primordiales aparecen también durante el primer trimestre, pero permanecen inmaduros. El sistema inmunitario fetal está predominantemente polarizado hacia la tolerancia (para evitar reacciones contra la madre) y depende principalmente de la inmunidad innata y de anticuerpos maternos transferidos pasivamente a través de la placenta (principalmente IgG) hacia el final de la gestación. La anatomía microscópica muestra órganos linfoides en desarrollo, con áreas de linfopoyesis activa pero aún sin la organización zonada (áreas T/B) completa del adulto.^(19,20)

- **Recién nacido e infancia:** Al nacer, el sistema inmunitario es funcional pero inmaduro. Los órganos linfoides son relativamente grandes en proporción al tamaño corporal. El timo alcanza su máximo peso relativo al nacer y en la primera infancia, reflejando su intensa actividad en la producción de linfocitos T. Los ganglios linfáticos y el bazo están presentes, pero las respuestas inmunitarias adaptativas son más lentas, menos específicas y con menor memoria que en el adulto. La producción propia de IgG alcanza niveles adultos alrededor de los



5-6 años, e IgA aún más tarde. Esta inmadurez anatómico-funcional explica la mayor susceptibilidad a ciertas infecciones y las respuestas diferentes a las vacunas en los primeros años de vida. El tejido linfoide asociado a mucosas (MALT) también se desarrolla activamente en respuesta a la colonización microbiana postnatal. ^(21,22)

- **Adolescencia y edad adulta joven:** El sistema inmunitario alcanza su máxima competencia. Los órganos linfoides están completamente desarrollados y organizados anatómicamente. La médula ósea y el timo mantienen un repertorio diverso de linfocitos. Las respuestas inmunitarias son robustas, específicas y generan una memoria eficaz. La anatomía macroscópica y microscópica refleja un sistema en pleno funcionamiento, con ganglios linfáticos reactivos ante estímulos, un bazo con pulpa blanca bien definida y tejido MALT activo. ^(23,24)

- **Edad adulta y senectud (inmunosenescencia):** El proceso de envejecimiento afecta profundamente al sistema inmunitario, un fenómeno conocido como inmunosenescencia. Anatómicamente, se observa una involución progresiva del timo, que es reemplazado por tejido adiposo y pierde su capacidad para producir nuevos linfocitos T. La médula ósea puede volverse menos eficiente en la hematopoyesis. Los ganglios linfáticos y el bazo pueden mostrar cambios fibrosos y una reducción en el tejido linfoide funcional. Microscópicamente, hay una disminución en la celularidad linfoide y alteraciones en la arquitectura de los órganos. Funcionalmente, esto se traduce en: menor diversidad del repertorio de linfocitos T, aumento de células de memoria agotadas, disminución de la respuesta a nuevos antígenos (vacunas), aumento de la autoinmunidad basal y mayor susceptibilidad a infecciones, cáncer y enfermedades inflamatorias crónicas. ^(16,18)

La comprensión de estos cambios anatómicos y funcionales asociados a la edad es crucial para la medicina. Explica por qué los niños necesitan esquemas de vacunación diferentes, por qué los ancianos responden peor a las vacunas de la gripe o el COVID-19, y por qué ciertas enfermedades autoinmunes o neoplasias linfoides son más frecuentes en determinadas etapas de la vida. La anatomía ontogenética del sistema inmune es fundamental para la medicina personalizada según la edad. ^(20,25)

El sistema inmune en la práctica

La enseñanza y aplicación de la anatomía humana en ciencias de la salud ha evolucionado desde una descripción puramente morfológica hacia una disciplina integrada con clínica y epidemiología, esencial para comprender, diagnosticar y tratar enfermedades relacionadas con la inmunidad. Esta anatomía clínica o aplicada pone el énfasis en la relevancia funcional y patológica de las estructuras. ^(24,25)



Diagnóstico clínico: El conocimiento anatómico preciso es vital para interpretar signos y síntomas relacionados con el sistema inmune: ^(22,25)

- ✓ **Palpación de ganglios linfáticos:** son claves para diagnosticar infecciones locales, enfermedades autoinmunes o neoplasias. Saber los territorios de drenaje linfático es esencial para localizar el origen de una patología.
- ✓ **Esplenomegalia/hepatomegalia:** detectado en el examen físico o por imagenología puede indicar infecciones, enfermedades hematológicas, enfermedades de depósito o alteraciones inmunológicas. Conocer sus relaciones anatómicas es crucial para la exploración y diagnóstico diferencial.
- ✓ **Localización del dolor:** en el hipocondrio izquierdo puede sugerir patología esplénica. El dolor abdominal puede relacionarse con apendicitis o linfadenopatías mesentéricas.

Procedimientos diagnósticos y terapéuticos: ^(18,20)

- ✓ **Biopsias:** La obtención de muestras de tejido linfoide para diagnóstico requiere un conocimiento anatómico exacto para acceder al sitio correcto, evitar estructuras vitales y obtener una muestra representativa. Las biopsias de ganglio centinela en cáncer dependen de la comprensión precisa de las vías de drenaje linfático regional.
- ✓ **Aspirado/ biopsia de médula ósea:** Conocer la anatomía de la cresta ilíaca posterior o del esternón es esencial para realizar este procedimiento de forma segura y eficaz para evaluar enfermedades hematológicas e inmunológicas.
- ✓ **Esplenectomía:** La cirugía de extirpación del bazo demanda un conocimiento profundo de su localización, relaciones vasculares, ligamentos de fijación y estructuras adyacentes para minimizar riesgos.
- ✓ **Acceso vascular y administración de fármacos:** La ubicación de grandes vasos es crucial para accesos venosos centrales o para terapias avanzadas como la inmunoterapia CAR-T, que implica leucoféresis y su posterior reinfusión.

Imagenología: Técnicas como la ecografía son fundamentales para visualizar la anatomía del sistema linfático y detectar anomalías. Interpretar estas imágenes requiere un sólido conocimiento anatómico tridimensional. ⁽²¹⁾

Epidemiología y anatomía funcional: La epidemiología estudia la distribución y determinantes de las enfermedades en poblaciones. La anatomía proporciona el sustrato físico para entender esta distribución: ^(16,19)

- ✓ **Puertas de entrada:** La anatomía de las mucosas y la piel explica las vías de entrada de patógenos y la localización inicial de las infecciones. El MALT es la primera línea de defensa en estas interfaces.



- ✓ **Diseminación:** El conocimiento de las vías linfáticas y sanguíneas es esencial para comprender cómo se diseminan las infecciones o las células tumorales.
- ✓ **Distribución de enfermedades:** La epidemiología de enfermedades como el linfoma de Hodgkin muestra patrones anatómicos característicos de afectación ganglionar. La comprensión de la anatomía regional es clave para mapear la propagación de enfermedades.

La anatomía con enfoque clínico-epidemiológico transforma el conocimiento estático de las estructuras en una herramienta dinámica para resolver problemas de salud reales relacionados con el sistema inmunitario, integrando la estructura con la función, la patología y el contexto poblacional.^(22,24)

La didáctica especial de la anatomía humana en ciencias de la salud: enseñando el mapa de la defensa

La enseñanza de la anatomía humana, particularmente la relacionada con el complejo y distribuido sistema inmunitario, enfrenta desafíos únicos en la formación de profesionales de la salud. La didáctica especial debe superar la mera memorización de estructuras para fomentar una comprensión profunda, integrada con la función inmunológica y aplicable a la práctica clínica. Existen desafíos específicos:⁽²⁶⁻³⁰⁾

- ✓ **Complejidad y distribución:** El sistema inmunitario no es un órgano único y compacto, sino una red de células y tejidos dispersos por todo el cuerpo.
- ✓ **Dinamismo:** Es un sistema altamente dinámico, con células en constante circulación y tráfico entre tejidos, difícil de apreciar en preparaciones estáticas.
- ✓ **Escala:** Abarca desde estructuras macroscópicas hasta células y moléculas microscópicas, requiriendo saltos de escala conceptual.
- ✓ **Integración funcional:** Su comprensión requiere integrar estrechamente la anatomía con la fisiología, bioquímica e inmunología celular/molecular.
- ✓ **Ética y acceso a material cadavérico:** La disponibilidad y regulaciones éticas sobre el uso de cuerpos humanos para disección limitan la experiencia práctica directa con tejido linfoide fresco, que a menudo se altera post-mortem.

Estrategias didácticas Innovadoras:⁽²⁶⁻²⁷⁾

- ✓ **Integración horizontal y vertical:** Enseñar la anatomía del sistema inmune no de forma aislada, sino integrada con histología, fisiología, inmunología y patología desde los primeros años y reforzando su relevancia clínica a lo largo del.
- ✓ **Enfoque clínico-problémico:** Utilizar casos clínicos reales o simulados como punto de partida para estudiar la anatomía relevante, fomentando el razonamiento aplicado.



✓ **Uso de tecnología:** ^(20,26)

Modelos 3D y realidad virtual/aumentada: Permiten visualizar interactivamente la ubicación, relaciones y estructura interna de órganos linfoides y la red vascular/linfática en 3D, superando las limitaciones de los atlas 2D.

Software de simulación: Programas que simulan el tráfico de células inmunitarias entre tejidos o la respuesta inflamatoria en un contexto anatómico.

Plataformas interactivas y recursos en línea: Sitios web con atlas anatómicos detallados, módulos de autoaprendizaje, videos de disecciones y procedimientos.

Disección y proyección guiada: Aunque con limitaciones para el tejido linfóide, sigue siendo invaluable para comprender la ubicación, relaciones y acceso quirúrgico a órganos como el bazo y los grandes grupos ganglionares.

Histología e inmunohistoquímica: El estudio microscópico de cortes histológicos de órganos linfoides y el uso de tinciones específicas para marcar poblaciones celulares inmunes son esenciales para entender la microarquitectura funcional.

Imagenología como herramienta anatómica: para identificar estructuras linfoides normales y patológicas, integrando la anatomía radiológica desde el principio.

El objetivo final de la didáctica especial de la anatomía del sistema inmunitario es formar profesionales que no solo conozcan los nombres y ubicaciones, sino que comprendan el *significado funcional* de estas estructuras en la defensa del organismo, puedan *aplicar* este conocimiento a la interpretación de signos clínicos y pruebas diagnósticas, y lo utilicen como base para el aprendizaje continuo en inmunología y disciplinas clínicas. Es un pilar fundamental para una atención sanitaria basada en una comprensión integral del cuerpo humano.⁽²⁸⁻³⁰⁾

Una limitación relevante de este estudio es el uso de inteligencia artificial generativa para la creación de ciertos contenidos, lo que podría afectar la originalidad y exactitud de algunas secciones. En particular, se utilizaron las herramientas Perplexity y DeepSeek para facilitar la recopilación y el resumen de información, reconociendo que, aunque estas tecnologías agilizan el proceso, también pueden introducir sesgos inherentes a sus algoritmos y dependen de la calidad de los datos con los que fueron entrenadas. Por ello, se aconseja interpretar los resultados con precaución y tener en cuenta la posible influencia de estas herramientas en el desarrollo del análisis.

Conclusiones

En conclusión, la historia de la anatomía es, en gran medida, la historia del descubrimiento del sistema inmunitario. Sus métodos, desde el escalpelo hasta el PET/CT, han proporcionado el mapa indispensable sin el cual la inmunología carecería de ubicación y contexto. La continua



simbiosis entre la precisión anatómica y la investigación inmunológica seguirá siendo la base para desentrañar los misterios restantes de la inmunidad y desarrollar nuevas estrategias para combatir infecciones, cáncer, enfermedades autoinmunes y el declive inmunológico asociado a la edad. La anatomía no es un vestigio del pasado médico; es un campo vibrante y esencial que sigue guiando nuestra comprensión de la defensa más sofisticada del cuerpo humano.

Referencias

1. Vesalius A. *De Humani Corporis Fabrica Libri Septem*. Basel: Johannes Oporinus; 1543. Disponible en: <https://www.nlm.nih.gov/exhibition/historicalanatomies/vesalius>
2. *The Fabric of the Human Body. Annotated Translation of Vesalius' Fabrica* by D.H. Garrison and M.H. Hast. Karger; 2014.
3. Standring S, editor. *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 42nd ed. Elsevier; 2020.
4. Gasteiger G, D'Oswaldo A, Schubert DA, Weber A, Bruscia EM, Hartl D. Cellular innate immunity: An old game with new players. *J Innate Immun*. 2017;9(2):111-125. doi:10.1159/000453397
5. Börner K, et al. Anatomical structures, cell types and biomarkers of the Human Reference Atlas. *Nat Cell Biol*. 2021;23(11):1117-1128. doi:10.1038/s41556-021-00788-6
6. Tan SY, Krasnow MA. Developmental origin of lung macrophage diversity. *Development*. 2016;143(8):1318-1327. doi:10.1242/dev.129122
7. Goltsev Y, et al. Deep Profiling of Mouse Splenic Architecture with CODEX Multiplexed Imaging. *Cell*. 2018;174(4):968-981.e15. doi:10.1016/j.cell.2018.07.010
8. Hajdu SI. A Note from History: The Discovery of the Lymphatic System. *Ann Clin Lab Sci*. 2019;49(2):269-271.
9. Bera K, Schalper KA, Rimm DL, Velcheti V, Madabhushi A. Artificial intelligence in digital pathology - new tools for diagnosis and precision oncology. *Nat Rev Clin Oncol*. 2019;16(11):703-715. doi:10.1038/s41571-019-0252-y
10. Salinas I. The Mucosal Immune System of Teleost Fish. *Biology (Basel)*. 2015;4(3):525-539. doi:10.3390/biology4030525
11. Horton TL. Ontogeny and phylogeny of the immune system: conserved mechanisms and innovations. *Semin Immunol*. 2023;69:101800. doi:10.1016/j.smim.2023.101800
12. Chen CL, et al. Anatomical and molecular analyses of the bursa of Fabricius in chickens. *Dev Comp Immunol*. 2020;109:103693. doi:10.1016/j.dci.2020.103693
13. Flajnik MF. A cold-blooded view of adaptive immunity. *Nat Rev Immunol*. 2018;18(7):438-453. doi:10.1038/s41577-018-0003-9



14. Cooper MD. The evolution of adaptive immune systems. *Cell*. 2006;124(4):815-822. doi:10.1016/j.cell.2006.02.001
15. Haynes BF, Heinly CS. Early human T cell development: analysis of the human thymus at the time of initial entry of hematopoietic stem cells into the fetal thymic microenvironment. *J Exp Med*. 1995;181(3):971-980. doi:10.1084/jem.181.3.971
16. Kretschmer A, et al. Normal values for thymic size from infancy to young adulthood. *Pediatr Radiol*. 2021;51(6):1031-1040. doi:10.1007/s00247-020-04923-7
17. Cárdenas D, et al. Quantitative MRI assessment of thymic changes in myasthenia gravis. *Eur Radiol*. 2023;33(1):277-285. doi:10.1007/s00330-022-09019-4
18. Pereira BI, et al. Sestrins induce natural killer function in senescent-like CD8+ T cells. *Nat Immunol*. 2020;21(6):684-694. doi:10.1038/s41590-020-0643-3
19. Ciabattini A, et al. Vaccination in the elderly: The challenge of immune changes with aging. *Semin Immunol*. 2018;40:83-94. doi:10.1016/j.smim.2018.10.010
20. Barrington SF, et al. Role of Imaging in the Staging and Response Assessment of Lymphoma: Consensus of the International Conference on Malignant Lymphomas Imaging Working Group. *J Clin Oncol*. 2014;32(27):3048-3058. doi:10.1200/JCO.2013.53.5229
21. Ferraioli G, et al. Liver ultrasound elastography: an update to the World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology Guidelines and Recommendations. *Ultrasound Med Biol*. 2018;44(12):2419-2440. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2018.07.008
22. Guo J, et al. Comparison of sentinel lymph node biopsy guided by indocyanine green, blue dye, and their combination in breast cancer patients: a prospective cohort study. *World J Surg Oncol*. 2021;19(1):206. doi:10.1186/s12957-021-02327-x
23. Uranues S, et al. Laparoscopic splenectomy: clinical experience and technical aspects. *Surg Endosc*. 2021;35(2):732-738. doi:10.1007/s00464-020-07442-6
24. Morimoto J, et al. Cigarette smoke-induced thymic atrophy and altered thymocyte development. *Eur J Immunol*. 2021;51(4):878-887. doi:10.1002/eji.202048728
25. Miranda RN, et al. Geographic variation in the distribution of lymphoma subtypes. *Blood Rev*. 2022;53:100908. doi:10.1016/j.blre.2021.100908
26. Smith CF, et al. Immersive virtual reality as a teaching tool for neuroanatomy. *Anat Sci Educ*. 2021;14(5):569-576. doi:10.1002/ase.2031
27. Estai M, Bunt S. Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Ann Anat*. 2016;208:151-157. doi:10.1016/j.aanat.2016.02.010



28. Lim KH, et al. Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy. *Anat Sci Educ*. 2016;9(3):213-221. doi:10.1002/ase.1573
29. Hackett M, Proctor M. Three-dimensional display technologies for anatomical education: a literature review. *J Sci Educ Technol*. 2016;25:641-654. doi:10.1007/s10956-016-9619-3
30. Sugand K, et al. The anatomy of anatomy: A review for its modernization. *Anat Sci Educ*. 2010;3(2):83-93. doi:10.1002/ase.139