

# Telemicroscopía: Un Modelo Sostenible de Integración de la Microscopía Electrónica al Diagnóstico Médico en Brasil



Ingrid Augusto	PhD, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Researcher. Email: ingrid.augustt@gmail.com
Moara Lemos	PhD, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Researcher. Email: moaralemos@gmail.com.
Eduardo Resende	PhD, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Technician. Email: emresende94@gmail.com.
Brenda Santarem Fachetti	Bachelor's degree, Federal University of Pará (UFPA), Technician. Email: brenda.fachetti22@gmail.com.
Camila Gonçalves	Master's degree, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Manager. Email: camilabiof@gmail.com.
Jander Guimarães	Master's degree, Amazonas State University (UEA), Technician. Email: jander.m.guimaraes@gmail.com.
Eduardo Torres	PhD, State University of Rio de Janeiro (UERJ), Researcher. Email: lopestorresej@gmail.com.
Kildare Miranda	PhD, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Coordinator. Email: kmiranda@biof.ufrj.br.
Laila Asth	<b>Corresponding author</b> -Academic degree: PhD. Institution: Federal University of Rio de Janeiro. Position: Researcher. ORCID: 0000-0001-5086-6572. Email: lailasth@gmail.com

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025 | Fecha de aprobación: 9 de diciembre de 2025

## Resumen

**Introducción:** La telemicroscopía es una técnica que permite acceso remoto a plataformas de microscopía, facilitando análisis de muestras a distancia. Tiene un gran potencial en el apoyo al diagnóstico médico, incluyendo la patología ultraestructural con microscopía electrónica. **Objetivo:** Establecer un modelo sostenible de integración de microscopía electrónica al portafolio de diagnóstico médico, mediante la implementación de núcleos de telemicroscopía aplicada a la patología ultraestructural. **Metodología:** Se adoptaron metodologías basadas en protocolos de centros internacionales de referencia para estructurar un flujo de trabajo adaptado a los centros nacionales. Se probaron tres estrategias de interacción: telemicroscopía asincrónica, visitas presenciales y telemicroscopía sincrónica. **Resultados:** La implementación siguió protocolos adaptados, probando las estrategias. La telemicroscopía sincrónica muestra potencial para democratizar el acceso a la microscopía electrónica. Se creó un banco de imágenes digitales. Los resultados evidencian la viabilidad operacional del modelo propuesto. **Conclusiones:** La preparación adecuada de la muestra y la comunicación interdisciplinaria continua son fundamentales para la telemicroscopía. Este modelo tiene potencial de democratizar el acceso a la microscopía electrónica, reducir desigualdades regionales y consolidar una red colaborativa en el país. Las bases de datos generadas apoyan la educación, investigación y el futuro uso de inteligencia artificial en el diagnóstico diferencial de patologías. **Palabras clave:** telemicroscopía, patología ultraestructural, microscopía electrónica de transmisión, diagnóstico diferencial

## Abstract

**Telemicroscopy: A Sustainable Model for Integrating Electron Microscopy into Medical Diagnosis in Brazil**  
**Introduction:** Telemicroscopy is a technique that enables remote access to microscopy platforms, allowing the analysis of samples at a distance. It has great potential in aiding medical diagnosis, including ultrastructural pathology with electron microscopy. **Objective:** To establish a sustainable model for integrating electron microscopy tools into the medical diagnostic portfolio through the implementation of telemicroscopy hubs applied to ultrastructural pathology. **Methodology:** Methodologies based on protocols from international reference centers were adopted to structure a workflow adapted to national centers. Three interaction strategies were tested: asynchronous telemicroscopy, on-site visits, and synchronous telemicroscopy. **Results:** The implementation followed adapted protocols, testing the interaction strategies. Synchronous telemicroscopy shows potential for democratizing access to electron microscopy. An initial digital image bank was created. The results demonstrate the operational feasibility of the proposed model. **Conclusions:** Proper sample preparation and continuous interdisciplinary communication are essential for telemicroscopy. This model has the potential to democratize access to electron microscopy, reduce regional inequalities, and consolidate a collaborative network within the country. The generated databases support education, research, and future use of artificial intelligence in the differential diagnosis of pathologies. **Key-words:** telemicroscopy, differential diagnosis, transmission electron microscopy, ultrastructural pathology

**Telemicroscopia: Um Modelo Sustentável de Integração da Microscopia Eletrônica ao Diagnóstico Médico no Brasil**

**Introdução:** A telemicroscopia é uma técnica que permite o acesso remoto a plataformas de microscopia, possibilitando a análise de amostras à distância. Tem grande potencial no auxílio ao diagnóstico médico, incluindo patologia ultraestrutural com microscopia eletrônica. **Objetivo:** Estabelecer um modelo sustentável de integração de ferramentas de microscopia eletrônica ao portfólio de diagnóstico médico, através da implantação de núcleos de telemicroscopia aplicada à patologia ultraestrutural. **Metodologia:** Foram adotadas metodologias baseadas em protocolos de centros internacionais de referência para estruturar um fluxo de trabalho adaptado aos centros nacionais. Testaram-se três estratégias de interação: telemicroscopia síncrona e assíncrona e visitas presenciais. **Resultados:** A implementação seguiu protocolos adaptados, testando as estratégias de interação. A telemicroscopia síncrona mostra potencial para a democratização do acesso à microscopia eletrônica. Um banco de imagens digitais inicial foi criado. Os resultados evidenciam a viabilidade operacional do modelo proposto. **Conclusões:** O preparo adequado da amostra e a comunicação interdisciplinar contínua são fundamentais para telemicroscopia. Este modelo tem o potencial de democratizar o acesso à microscopia eletrônica, reduzir desigualdades regionais e consolidar uma rede colaborativa no país. Os bancos de dados gerados auxiliam na educação, pesquisa e futuro uso de inteligência artificial no diagnóstico diferencial de patologias.

**Palabras-chave:** telemicroscopia, diagnóstico diferencial, microscopia eletrônica de transmissão, patologia ultraestrutural

**INTRODUCCIÓN**

La telesalud ha crecido exponencialmente en los últimos años, ofreciendo nuevas formas de atención médica y sanitaria. La constante evolución de las tecnologías ofrece oportunidades de acceso a servicios de salud para quienes se encuentran confinados en sus hogares o viven en zonas marginadas, además de permitir que los pacientes con enfermedades raras reciban atención de especialistas ubicados en otras regiones<sup>1,2</sup>. Sin embargo, la telesalud no solo amplía el acceso de los pacientes a los profesionales sanitarios, sino que también ofrece a los médicos la oportunidad de utilizar herramientas que optimizan el diagnóstico diferencial de diversas patologías. Este es el caso de la telemicroscopía, una técnica que permite el acceso remoto a diferentes plataformas de investigación microscópica<sup>3</sup>. En la telemicroscopía, el usuario puede analizar su muestra de forma remota mediante herramientas virtuales de intercambio de datos. De esta manera, los hospitales y laboratorios de diagnóstico pueden enviar muestras al centro de diagnóstico por imagen y el patólogo puede analizar las imágenes obtenidas de forma remota<sup>3</sup>.

La telemicroscopía tiene un gran potencial para ayudar al diagnóstico médico, incluyendo la histopatología clásica (con la ayuda de la microscopía óptica) y la histopatología ultraestructural (con la ayuda de la microscopía electrónica). El análisis ultraestructural se ha consolidado como una herramienta complementaria y, a veces, diferencial para el diagnóstico médico<sup>4</sup>. Esto se debe a que el diagnóstico de algunas patologías depende de imágenes de alta resolución, con resoluciones alcanzadas únicamente a nivel de microscopía electrónica. Este es el caso de la discinesia ciliar primaria, una rara condición hereditaria autosómica recesiva, frecuentemente manifestada por infecciones respiratorias crónicas desde los primeros años de vida<sup>5</sup>. Además de la escasez de

datos epidemiológicos y la heterogeneidad fenotípica, la ausencia de métodos diagnósticos precisos y sensibles contribuye a retrasos y, frecuentemente, a diagnósticos erróneos de la discinesia ciliar primaria<sup>6</sup>. Las guías de diagnóstico europeas y norteamericanas recomiendan la microscopía electrónica de transmisión (MET) como parte de un conjunto de pruebas para la confirmación diagnóstica. La TEM se utiliza para identificar defectos ultraestructurales en los cilios<sup>7</sup>, como la ausencia o anomalías de los brazos de dineína externo e interno, defectos en los microtúbulos que conforman el axonema y la desorganización completa de la estructura cilíndrica típica<sup>8-10</sup>. Además de la discinesia ciliar primaria, el análisis ultraestructural mediante TEM puede ayudar en el diagnóstico de otras enfermedades, como el síndrome nefrótico de cambios mínimos<sup>11</sup>, la glomeruloesclerosis focal y segmentaria<sup>12</sup>, la displasia alveolocapilar<sup>13</sup> y la epidermólisis ampollosa<sup>14</sup>.

Actualmente, hay más de 700 microscopios electrónicos en funcionamiento en Brasil, según la Sociedad Brasileña de Microscopía y Microanálisis, aunque están distribuidos asimétricamente en las regiones del país, con casi el 81% ubicado en la región Sudeste<sup>15</sup>. Si bien algunos centros ofrecen servicios de diagnóstico con microscopía electrónica, la mayoría de los microscopios se han utilizado solo con fines académicos y de investigación, no con fines diagnósticos. Esta realidad resalta el acceso limitado de los patólogos a la base instalada de microscopía electrónica en el país y refuerza la necesidad de establecer herramientas para el uso remoto de estos instrumentos. La implementación de la telemicroscopía podría ampliar el acceso de los patólogos a los microscopios electrónicos y así, ayudar y agilizar el diagnóstico diferencial de muchas patologías, ofreciendo un retorno inmediato a la sociedad brasileña.

Dada la amplia base instalada de microscopía electrónica en el país y la creciente

demanda de diagnóstico a través de la patología ultraestructural, el objetivo de este trabajo es establecer un modelo sostenible para la integración de herramientas de microscopía electrónica en el portafolio de diagnóstico médico del país mediante la implementación de un centro de telemicroscopía aplicada a la patología

ultraestructural. De esta forma, este trabajo tiene un carácter cualitativo y describe la etapa inicial de estructuración del flujo de trabajo inherente a la implementación del centro.

## METODOLOGÍA

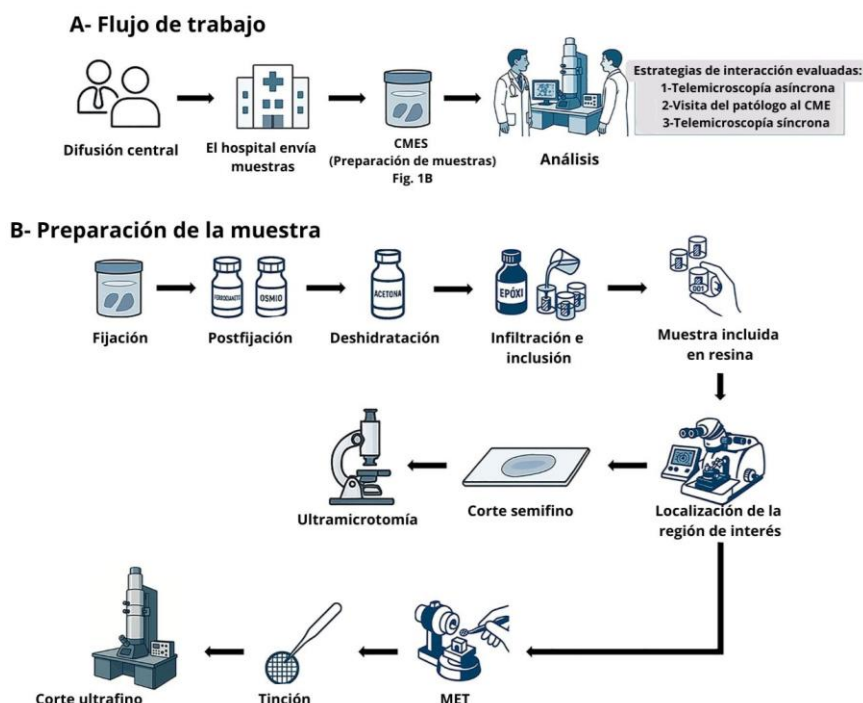
Uno de los principales factores para la consolidación de la telemicroscopía como herramienta eficaz para el diagnóstico es la definición de un flujo de trabajo estructurado y eficiente (Figura 1). Para tal, fueron adoptadas metodologías fundamentadas en protocolos de centros internacionales de referencia, con destaque para el Departamento de Patología Celular da Universidad de Manchester y la Unidad de Histopatología del Instituto Gulbenkian de Medicina Molecular de Portugal, para el recebo y categorización de las muestras. Esos protocolos orientaron la estructuración del flujo de trabajo que

fue posteriormente adaptado a las particularidades del centro nacional involucrado, el Centro Nacional de Biología Estructural y Bioimagen (CENABIO, UFRJ).

Tras la implementación del flujo de trabajo, probamos tres estrategias de interacción entre centros de microscopía electrónica (CME) y hospitales: telemicroscopía sincrónica y asincrónica, y una visita presencial del patólogo al CME. En la telemicroscopía asincrónica, un especialista obtuvo las imágenes y las puso a disposición del patólogo en bases de datos, mientras que en la telemicroscopía sincrónica, el patólogo tuvo acceso remoto al microscopio mediante una herramienta de pantalla compartida y guió la adquisición de imágenes. En la tercera estrategia, el patólogo acudió al CME y participó presencialmente en la adquisición de imágenes. Para probar estas estrategias, se seleccionaron muestras de tres pacientes con patologías renales, y cada muestra se envió para su evaluación mediante una de las estrategias.

Las imágenes obtenidas fueron almacenadas en una base de datos digital y serán utilizadas posteriormente para el desarrollo de un software de inteligencia artificial (IA) que optimice el diagnóstico diferencial mediante TEM..

Figura 1: Diagrama del flujo de trabajo y preparación de muestras para el análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM) realizado en el centro de telemicroscopía.



(A) El flujo de trabajo establecido estipula que, tras la toma de muestras, el patólogo las envía al CME. Este envío puede incluir muestras ya procesadas o que el equipo del CME aún no haya procesado. Los modelos de interacción evaluados entre el CME y los patólogos incluyen la telemicroscopía sincrónica o asincrónica, así como la visita presencial del patólogo al CME. (B) El procesamiento de las muestras incluye los pasos de fijación, postfijación, deshidratación, infiltración e inclusión, lo que resulta en la inclusión de la muestra en resina, a partir de la cual se realizan cortes ultrafinos que se contrastarán y evaluarán mediante TEM. Un paso intermedio necesario para algunas patologías es la preparación de cortes semifinos evaluados mediante microscopía óptica para verificar la presencia de la región de interés. En caso de ser negativo, se pueden realizar nuevos cortes semifinos hasta alcanzar la región ideal para la verificación de las alteraciones patológicas.

## RESULTADOS

Para optimizar la adquisición de muestras y atraer patólogos colaboradores, se produjo material audiovisual para promocionar el centro. El video muestra cómo es posible conectar hospitales con los Departamentos Centrales de Suministro de Estériles (CSSE), lo que permite a los médicos acceder a equipos sofisticados y de última generación capaces de realizar diagnósticos diferenciales y remotos dentro de la red de telemicroscopía. Hasta la fecha, hemos contado con la participación de patólogos colaboradores vinculados a hospitales asociados, entre los que destacan el Hospital Universitario Clementino Fraga Filho, el Hospital Universitario Pedro Ernesto, el Instituto Estatal del Cerebro Paulo Niemeyer y la Fundación Hospitalaria Alfredo da Matta. La proximidad física en estos casos fue importante para facilitar las visitas presenciales y evaluar estrategias de interacción entre los equipos. Sin embargo, una vez implementado, este modelo operativo será completamente telemicroscópico y podrá adaptarse a otros hospitales y centros de microscopía del país, por lo que posee un enorme potencial de expansión.

Durante el período inicial de implementación del centro de telemicroscopía, el CME (Centro de Microscopía) recibió muestras de nueve patologías: discinesia ciliar, adenoma hipofisario PIT1, microangiopatía trombótica, glomerulonefritis membranosa, glomerulonefritis de progresión rápida, glomeruloesclerosis focal y segmentaria (GEFS), síndrome nefrótico de cambios mínimos, enfermedad de Crohn y lepra. Todas las muestras se seleccionaron para evaluar el flujo de trabajo ideal, así como para evaluar el procesamiento de muestras y la identificación de regiones de interés. Entre las patologías recibidas, las muestras de GEFS se utilizaron para la evaluación comparativa de las estrategias de interacción mencionadas.

Cada muestra se identificó mediante un código único que contenía el número de entrada y el código patológico asociado. Otra información, incluida en una hoja de cálculo compartida entre el Departamento Central de Suministros Estériles (CSSD) y los patólogos, incluye la identificación de la institución de origen de la muestra y el patólogo responsable, el tipo de tejido, la hipótesis diagnóstica, la fecha de entrada de la muestra y la persona responsable de su recepción en el CSSD, además de los datos de preparación de la muestra.

La parte principal para el suceso del análisis en microscopía electrónica está en el procesamiento o preparación adecuada de la muestra (Fig. 1B), respetando a las especificidades y el objetivo del análisis en el contexto de cada patología. Para eso, es

importante la buena comunicación entre los equipos del CME y los patólogos desde el inicio de la interacción, compartiendo informaciones como el tipo de tejido, hipótesis diagnóstica, soluciones de fijación y contraste ideal y los detalles ultraestructurales esperados. La calidad y la intensidad de esa comunicación e interacción fueron factores determinantes para la fluidez del flujo de trabajo u la agilidad en el diagnóstico diferencial. Se aconseja establecer un canal abierto de interacción, por ejemplo, por medio del uso de tecnologías actuales, como encuentros online por videoconferencia frecuentes y aplicativos de mensajes que permiten una interacción más rápida, inclusive con la formación de grupos, facilitando el contacto entre los integrantes de los equipos en las diferentes etapas del procesamiento y del análisis de las muestras.

Una vez establecida la interacción, es importante que el CME oriente sobre cómo proceder en la etapa de recolección y fijación del material, forneciendo los reactivos y el protocolo para la solución fijadora o ya preparada. De esa forma, se garantiza la fijación del material inmediatamente después de la recolección. Se sabe que algunos hospitales y instituciones médicas, principalmente hospitales universitarios, poseen departamentos propios de patología ultraestructural, siendo posible que parte de la preparación de la muestra sea hecha por colaboradores *in loco*. Sin embargo, observamos que el material preparado totalmente por el equipo del CME tiende a presentar mayor reproducibilidad, viabilizando la detección y la normalización de las características diagnósticas rápidamente.

Otra etapa en que fue fundamental la interacción entre el CME y los patólogos fue en la determinación de la región de interés en los bloques de resina conteniendo la muestra procesada. Para eso, para muestras de algunos tejidos, como el tejido renal, fue implementada la realización de cortes semifinos, observados por medio de microscopía de luz, antes de la realización de los cortes ultrafinos evaluados por MET (Fig. 1). Después de la finalización de todas las etapas de la preparación de la muestra y de la definición de la región de interés, se siguió con el análisis y las imágenes del material en el MET para la detección de las características ultraestructurales determinantes para el diagnóstico diferencial. La adquisición fue estandarizada inicialmente de acuerdo con la patología en análisis, utilizando magnificaciones definidas, asegurando la calidad y comparabilidad de los datos obtenidos.

Se probaron tres estrategias de interacción entre los equipos: telemicroscopía sincrónica, asincrónica y presencial. La telemicroscopía



sincrónica y la presencia del patólogo durante la toma de imágenes permitieron una discusión directa para confirmar la presencia de estructuras de interés y características diagnósticas, agilizando el diagnóstico final y ampliando la colaboración interdisciplinaria. En ambas estrategias, fue posible alinear la experiencia del especialista en TEM en la identificación de ultraestructura y la del patólogo en la comprensión de las características de la patología y la historia clínica del paciente, asegurando una mayor precisión en la interpretación de las imágenes y un menor tiempo para la conclusión del diagnóstico. La telemicroscopía asincrónica, por otro lado, requirió dos o más reuniones remotas entre los patólogos y el equipo de CME para discutir las imágenes obtenidas, posiblemente debido a la complejidad y la especificidad ultraestructural diagnóstica de la patología, lo que exigió más tiempo para llegar a un diagnóstico. En general, considerando la dificultad de disponibilidad de tiempo y desplazamiento al Departamento Central de Esterilización (DCE) por parte de los patólogos, y con el objetivo de ampliar el acceso a los DCE por parte de múltiples hospitales, la telemicroscopía sincrónica demostró ser la estrategia más exitosa en nuestro centro de telesalud, con el potencial de democratizar la microscopía electrónica en el diagnóstico diferencial a nivel nacional.

El banco de datos generado contiene cerca de 3 mil imágenes digitales de las patologías analizadas, las cuales están almacenadas en drives compartidos. Para su organización, las imágenes fueron separadas conforme el número de entrada de la muestra y la patología asociada. Esa sistematización permite identificar las imágenes que contienen el fragmento y la región de interés, favoreciendo el acceso integrado de los equipos de los polos involucrados y facilitando la gestión de los bancos de datos.

El modelo propuesto demuestra la eficacia de la integración entre diferentes centros de referencia nacionales y la posibilidad de ampliar el acceso al diagnóstico ultraestructural por medio de la telemicroscopía. La aproximación entre los CMEs y los servicios hospitalarios contribuye para la incorporación de análisis morfológicos de alta resolución en la rutina diagnóstica, impactando positivamente la calidad de la investigación patológica, la precisión y el soporte para la toma de decisión clínica.

## DISCUSIÓN

La preparación adecuada de la muestra es fundamental para el suceso de los análisis en microscopía electrónica, especialmente cuando están orientadas al diagnóstico ultraestructural de patologías humanas. La integridad de los

resultados generados depende no apenas de la calidad de los reactivos y equipamientos, sino también de la normalización de los protocolos y de la competencia técnica de quien los ejecuta<sup>16</sup>. Por esa razón, la centralización de la preparación en centros especializados, como los CMEs, fue altamente eficaz, garantizando homogeneidad, rastreabilidad y reproducibilidad de los procedimientos.

La excelencia técnica solo se concretiza en diagnósticos cuando está aliada a comunicación integrada y continua entre los diferentes profesionales envueltos en el flujo de trabajo. El diálogo entre técnicos de microscopía y médicos patólogos es esencial desde el inicio, a partir de la recolección y fijación de la muestra, pasando por el procesamiento, corte ultrafino, adquisición de las imágenes, hasta el análisis final. En todas esas etapas, compartir información clínica, hipótesis diagnósticas y criterios morfológicos esperados orienta la conducta técnica y optimiza recursos, evitando desperdicio de tiempo y materiales.

La individualidad de las patologías que se examinan mediante microscopía electrónica, a menudo de origen incierto, infecciosas, genéticas o degenerativas, plantea tanto desafíos como oportunidades. Por un lado, se requiere una evaluación minuciosa y experiencia especializada previa, lo que requiere profesionales altamente capacitados. Por otro lado, algunas alteraciones ultraestructurales presentan patrones morfológicos característicos que facilitan la exclusión de diagnósticos diferenciales, siendo determinantes para la definición diagnóstica por parte de los patólogos<sup>12,17</sup>. Por lo tanto, la microscopía electrónica, a pesar de su complejidad, ofrece posibilidades únicas para la clarificación diagnóstica, especialmente en casos complejos o poco comprendidos<sup>18</sup>.

En este contexto, el contacto directo y constante con el patólogo durante todo el proceso de trabajo resulta ser una de las mayores ventajas de la telemicroscopía. Esta proximidad permite la toma de decisiones colaborativa en tiempo real, incluso durante la ultramicrotomía y la obtención de imágenes. El patólogo puede guiar al especialista en la selección de la región tisular más representativa, solicitar secciones adicionales o indicar alteraciones específicas de interés, evitando procedimientos repetidos y garantizando un análisis del material con la máxima eficiencia.

Para garantizar la eficiencia del proceso, es fundamental seleccionar y capacitar estratégicamente a los profesionales adecuados para cada etapa. En la fase inicial, se debe capacitar a los equipos de salud locales para la fijación inmediata de las muestras y preservar fielmente la ultraestructura de los tejidos. Un retraso en este paso puede provocar la degradación celular y la formación de artefactos, lo

que compromete gravemente el análisis morfológico<sup>19</sup>. Un equipo con experiencia en microscopía electrónica es esencial para el procesamiento de las muestras, así como para el ajuste de los parámetros del microscopio, garantizando así la adquisición de imágenes de alta calidad. En la etapa final, los patólogos interpretan los datos obtenidos, integrándolos en el contexto clínico. Considerando la experiencia en nuestro centro de telesalud, sugerimos que los patólogos interesados en el uso de TEM se capaciten en el análisis ultraestructural de su especialidad médica.

La distribución de funciones valoriza las competencias específicas de cada profesional y contribuye para la optimización de los resultados. La supervisión por un coordinador técnico-científico garantiza la normalización de los procedimientos y la rastreabilidad de los análisis. En regiones con recursos limitados, es posible que un mismo profesional desempeñe múltiples funciones, mientras la especialización en cada etapa es el escenario ideal para asegurar la calidad y la eficiencia del proceso.

La implementación del núcleo de telemicroscopía, en fase de desarrollo, representa un paso importante para el establecimiento de una red de diagnóstico ultraestructural en Brasil. Esa iniciativa ofrece beneficios estratégicos y estructurantes para el sistema de salud, como la democratización del acceso a la MET, históricamente concentrada en las regiones Sur y Sureste<sup>15</sup>, la reducción de las desigualdades regionales en el diagnóstico de alta complejidad y la consolidación de una red colaborativa entre especialistas de diferentes instituciones y estados. La implementación de la telemicroscopía puede contribuir También para la reducción del impacto ambiental al disminuir la necesidad de desplazamientos físicos de muestras y profesionales, resultando en menor emisión de CO<sub>2</sub> asociada al transporte y a los viajes presenciales<sup>20</sup>.

Además, la consolidación de bancos de imágenes digitales y sus respectivos informes crea una valiosa colección con fines educativos, científicos y de capacitación, que permite el desarrollo de atlas y protocolos de diagnóstico estandarizados. Estos bancos también permiten el entrenamiento de algoritmos de IA, que en el futuro podrían ayudar en el cribado de imágenes, el reconocimiento de patrones morfológicos y la sugerencia de diagnósticos diferenciales, optimizando el tiempo de análisis y aumentando la precisión diagnóstica, especialmente en entornos con escasez de patólogos especializados<sup>21</sup>.

Nuestra investigación principal también prevé, a medio y largo plazo, la incorporación de técnicas avanzadas de microscopía tridimensional, que permiten el análisis volumétrico de estructuras

celulares con resolución micrométrica y la observación de diferentes planos de corte. Este enfoque, combinado con el poder de la IA, puede sentar las bases para una nueva era en el diagnóstico patológico, en la que las alteraciones subcelulares no solo se identificarán, sino que también se cuantificarán y contextualizarán espacialmente con rigor científico.

## CONSIDERACIONES FINALES

EL modelo integrado de microscopía electrónica y telemicroscopía, desarrollado en el centro, demuestra ser una innovación para el fortalecimiento de la patología diagnóstica. La combinación de la preparación técnica rigurosa, comunicación interdisciplinar, uso de tecnologías digitales y capacitación continuada de los profesionales crea las condiciones ideales para un diagnóstico diferencial accesible y ágil. La expectativa es que, con la consolidación de ese modelo, Brasil pueda beneficiarse de la telemicroscopía en salud pública, transformando un campo históricamente restringido en un instrumento ampliamente disponible y estratégico para el enfrentamiento de enfermedades complejas y emergentes.

## REFERENCIAS

1. Doolittle GC, Spaulding AO. Providing Access to Oncology Care for Rural Patients via Telemedicine. *J Oncol Pract*. 2006 Sep;2(5):228–30.
2. Uscher-Pines L, Mehrotra A. Analysis Of Teladoc Use Seems To Indicate Expanded Access To Care For Patients Without Prior Connection To A Provider. *Health Aff*. 2014 Feb;33(2):258–64.
3. Prieto-Egido I, González-Escalada A, García-Giganto V, Martínez-Fernández A. Design of New Procedures for Diagnosing Prevalent Diseases Using a Low-Cost Telemicroscopy System. *Telemedicine and e-Health*. 2016 Nov;22(11):952–9.
4. Underwood JCE. More than meets the eye: the changing face of histopathology. *Histopathology*. 2017 Jan 13;70(1):4–9.
5. Rubbo B, Lucas JS. Clinical care for primary ciliary dyskinesia: current challenges and future directions. *European Respiratory Review*. 2017 Sep 30;26(145):170023.
6. Abitbul R, Amirav I, Blau H, Alkrinawi S, Aviram M, Shoseyov D, et al. Primary ciliary dyskinesia in Israel: Prevalence, clinical features,

current diagnosis and management practices. *Respir Med*. 2016 Oct;119:41–7.

7. Rezaei M, Soheili A, Ziai SA, Fakharian A, Toreyhi H, Pourabdollah M, et al. Transmission electron microscopy study of suspected primary ciliary dyskinesia patients. *Sci Rep*. 2022 Feb 11;12(1):2375.

8. Bush A, Chodhari R, Collins N, Copeland F, Hall P, Harcourt J, et al. Primary ciliary dyskinesia: current state of the art. *Arch Dis Child*. 2007 Dec 1;92(12):1136–40.

9. Shoemark A, Dixon M, Corrin B, Dewar A. Twenty-year review of quantitative transmission electron microscopy for the diagnosis of primary ciliary dyskinesia. *J Clin Pathol*. 2012 Mar;65(3):267–71.

10. Lucas JS, Davis SD, Omran H, Shoemark A. Primary ciliary dyskinesia in the genomics age. *Lancet Respir Med*. 2020 Feb;8(2):202–16.

11. Rivera A, Magliato S, Meleg-Smith S. Value of Electron Microscopy in the Diagnosis of Childhood Nephrotic Syndrome. *Ultrastruct Pathol*. 2001 Jan 10;25(4):313–20.

12. Salwa-Żurawska W ZJWABP. Focal segmental glomerulosclerosis: a diagnostic problem. *Pol J Pathol*. 2012;63(1):49–57.

13. Kamp JC, Neubert L, Schupp JC, Braubach P, Wrede C, Laenger F, et al. Multilamellated Basement Membranes in the Capillary Network of Alveolar Capillary Dysplasia. *Am J Pathol*. 2024 Feb;194(2):180–94.

14. Has C, Liu L, Bolling MC, Charlesworth AV, El Hachem M, Escámez MJ, et al. Clinical practice guidelines for laboratory diagnosis of epidermolysis bullosa. *British Journal of Dermatology*. 2020 Mar 9;182(3):574–92.

15. Albuquerque PC, de Paula Fonseca e Fonseca B, Girard-Dias W, Zicker F, de Souza W, Miranda K. Mapping the Brazilian microscopy landscape: A bibliometric and network analysis. *Micron*. 2019 Jan;116:84–92.

16. Swanson PE. Diagnostic Transmission Electron Microscopy of Tumors with Clinicopathological, Immunohistochemical and Cytogenetic Correlations. *Am J Clin Pathol*. 1995 Mar 1;103(3):372.1-372.

17. Torres LFB, Jacob GVV, Noronha L de, Sampaio GA, Antoniuk S, Bruck I. Estudo por microscopia eletrônica em doenças neurodegenerativas na infância. *Arq Neuropsiquiatr*. 1997;55(4):788–94.

18. Erlandson RA, Rosai J. A Realistic Approach to the Use of Electron Microscopy and Other Ancillary Diagnostic Techniques in Surgical Pathology. *Am J Surg Pathol*. 1995 Mar;19(3):247–50.

19. Tizro P, Choi C, Khanlou N. Sample Preparation for Transmission Electron Microscopy. In 2019. p. 417–24.

20. Ravindrane R, Patel J. Infrastructure: The environmental impacts of telemedicine in place of face-to-face patient care: a systematic review. *Future Healthc J*. 2022 Mar;9(1):28–33.

21. Niazi MKK, Parwani A V, Gurcan MN. Digital pathology and artificial intelligence. *Lancet Oncol*. 2019 May;20(5):e253–61.

#### **Declaración de responsabilidad:**

Todos los autores participan en la construcción y elaboración del trabajo. KM fue responsable de la concepción del trabajo y participó en la redacción del manuscrito. IA, ET, CG, LA y ML participaron en la organización del flujo de trabajo y en la redacción del manuscrito. IA, LA y ML participaron en la parte experimental. BSF, ER y JG participaron en la parte experimental y en la redacción del manuscrito.

#### **Financiamiento:**

Declaramos, para los fines correspondientes, que el manuscrito cuenta con financiamiento del Ministerio de Salud de Brasil.

#### **Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses en relación con esta investigación, autoría o publicación de este artículo.

#### **Cómo citar este artículo:**

Asth L, Augusto I, Lemos M, Resende E, Fachetti BS, Gonçalves C, Guimarães J, Torres E, Miranda K. Telemicroscopy: A Sustainable Model for Integrating Electron Microscopy into Medical Diagnosis in Brazil. *Latin Am J telehealth*, Belo Horizonte, 2024; 11(3): 213- 219. ISSN: 2175-2990.