

## Implementación de la biología molecular tumoral y de la oncología de precisión en América Latina

### Implementation of tumor molecular biology and precision oncology in Latin America

» León Darío Ortiz-Gómez<sup>1,2</sup>



» Andrés Felipe Cardona<sup>3</sup>



<sup>1</sup> Unidad Funcional de Neuro-Oncología, Instituto de Cancerología, Clínica Las Américas/AUNA, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Editor Revista Colombiana de Hematología y Oncología – RCHO, Bogotá, Colombia

<sup>3</sup> Dirección de Investigación y Educación, Centro de Tratamiento e Investigación sobre cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo (CTIC), Bogotá, Colombia

<https://doi.org/10.51643/22562915.845>

La investigación del cáncer en América Latina se ha rezagado históricamente respecto de otras regiones como Estados Unidos, Asia y Europa<sup>1</sup>. Esta deficiencia se debe a diversas barreras, incluyendo la falta de registros poblacionales y de seguimiento del cáncer en muchos países de la región, la escasez de fondos para promover la implementación de la ciencia y la asignación de tiempo protegido para la generación de investigación básica, clínica y de transferencia. Estos hechos redundan objetivamente en la falta generalizada de oportunidades para amplificar el impacto de la investigación local y regional, así como para generar oportunidades de formación de investigadores y especialistas en diversas áreas relacionadas con el cáncer<sup>2,3</sup>. A pesar de estas limitaciones, diversos investigadores de América Latina han publicado hallazgos que destacan las tendencias regionales en la epidemiología del cáncer, la utilización diferencial de recursos, el impacto de las intervenciones

en los desenlaces clínicos y la distribución, la frecuencia y los factores genéticos determinantes de los tumores sólidos y hematológicos. Esto pone de relieve la necesidad de generar información y de ampliar el impacto de los esfuerzos de investigación en cáncer a nivel regional<sup>4,5</sup>. Cabe destacar que los oncólogos latinoamericanos han abogado por una mayor participación en estudios clínicos multicéntricos con promotores externos como vehículo para impulsar la investigación clínica en la región<sup>6,7</sup>.

Para abordar estas barreras en la investigación del cáncer, se fundaron grupos cooperativos multinacionales de oncología (GCO), como el Grupo Cooperativo Latinoamericano de Oncología (Latin American Cooperative Oncology Group - LACOG, fundado en 2009) y el Consorcio Latinoamericano para la Investigación del Cáncer de Pulmón (CLICaP, constituido en 2011), entre otros. En los países líderes

\* **Autor para correspondencia:** León Darío Ortiz-Gómez, MD MSc PhD. Unidad Funcional de Neuro-Oncología, Instituto de Cancerología, Clínica Las Américas/AUNA, Medellín, Colombia.

**Dirección:** Diagonal 75B N. 2A-80/140, Medellín, Colombia.

**Correo electrónico:** leonortiz@epm.net.co

<https://doi.org/10.51643/22562915.845>

Asociación Colombiana de Hematología y Oncología. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

en investigación como Estados Unidos, China Francia, Canadá, Alemania, Italia, el Reino Unido y España, la infraestructura proporcionada por los GCO es fundamental para impulsar la gestión y el desarrollo de ensayos clínicos institucionales en cáncer, magnificando el impacto de los resultados en la incidencia, la mortalidad y la calidad de vida después del diagnóstico de la enfermedad. Recientemente, McIntosh y colaboradores encontraron que la inversión total en investigación sobre el cáncer a nivel global entre 2016 y 2020 fue de US\$ 24,5 mil millones<sup>8</sup>. En este escenario, la investigación preclínica representó el 73,5% (US\$ 18 mil millones), los ensayos clínicos fases I a IV recibieron el 7,4% (US\$ 1,8 mil millones), la investigación en salud pública el 9,4% (US\$ 2,3 mil millones) y la investigación interdisciplinaria el 5% (US\$ 1,2 mil millones). Además, los tumores con mayor soporte económico para la investigación fueron el cáncer de mama (11,2%), las neoplasias hematológicas (9,4%), y los tumores cerebrales de estirpe glial (5,5%). El análisis transversal de los patrocinios reveló que el 41,2% de la inversión (\$9,6 mil millones) se destinó a investigación sobre la biología de la enfermedad, el 19,6% (\$4,6 mil millones) a la implementación de diferentes tratamientos farmacológicos (12%, \$2,8 mil millones) y al avance de la inmuno-oncología. En adición, solo el 1,4% de la financiación se destinó a la investigación en cirugía, el 2,8% al desarrollo de la radioterapia y el 0,5% se gastó en estudios de salud global que incluyen a la mayoría de los países con ingresos medios y bajos<sup>8</sup>. A pesar de los recursos limitados para la investigación en cáncer en el entorno latinoamericano, la conformación de GCO a nivel regional ha permitido aumentar el número de ensayos clínicos y estudios de vida real en cáncer en los países de América Latina<sup>8</sup>.

Para analizar el proceso de implementación de la biología molecular tumoral y de la oncología de precisión en América Latina, se realizó una búsqueda semiestructurada de la literatura

en algunas de las plataformas de consulta y recuperación de información más relevantes (PubMed, Scopus y LILACS)<sup>9</sup>. Dicho resumen solo es reflejo de la creciente evidencia sobre la generación de información biomédica respecto de la investigación biológica y de transferencia en cáncer a nivel regional, y presenta varios factores de confusión respecto de la precisión de las búsquedas, el alcance de estas y la limitación para identificar literatura en español y portugués. En adición, un buen número de artículos relacionados con la medicina de enlace (traslacional) pueden estar catalogados de forma errónea en las plataformas descritas.

Hasta la fecha, utilizando el término MeSH “oncology”, se han registrado a nivel mundial 2.983.526 publicaciones, de las cuales el 2,2% proviene de los veinte países más representativos en América Latina (66.703 publicaciones) (Tabla 1)<sup>8</sup>. Al realizar una relación detallada por país para 2025, el mayor número de publicaciones proviene de Brasil (28.717), seguido de México (12.280), Argentina (7.342), Chile (5.641) y Colombia (3.196) (Tabla 1). Al restringir el filtro por edad, la mayoría de los registros corresponden a adultos (60%), mientras que en Colombia este porcentaje es de aproximadamente 40%. Es lógico pensar que existe una relación directa y proporcional entre el crecimiento de la información y los periodos temporales a partir de la década de 1990. Por ejemplo, las publicaciones sobre cáncer registradas en PubMed entre 1993 y 2009 fueron 896.772, y entre 2010 y 2025 fueron 1.540.659, lo que representa un incremento del 171% entre ambos periodos. En América Latina, desde la fundación de los principales GCO, el aumento en la productividad en investigación en cáncer ha sido del 362%, considerando los mismos dos periodos temporales, siendo 13.836 publicaciones antes de 2010 y 50.140 publicaciones entre este año y 2025. Este hallazgo refleja la importancia de promover la investigación interdisciplinaria colaborativa, la búsqueda de recursos

biológicos aplicables al entorno regional, la exploración de la epidemiología molecular y la investigación sobre la ancestría de la enfermedad en LATAM.

Si los registros de oncología en PubMed a la fecha se depuran para biología molecular tumoral (110.660 artículos referenciados a nivel mundial) y/o oncología de precisión (71.572 artículos referenciados a nivel mundial), se

puede observar que los referenciados de América Latina como “oncology AND molecular biology” son el 3,8% y los referenciados para “oncology AND precisión medicine” son apenas el 3,4%. El primer lugar en publicaciones de este tipo lo sigue ocupando Brasil, con 2.503 registros, seguido de Argentina con 1.508, México con 1.231, Chile con 493, y Colombia con 404 publicaciones (Tabla 1).

**Tabla 1.**

Publicaciones de oncología registradas en PubMed de 20 países de América Latina.

País	Total registros oncología	En adultos	19+ años	Del 11/09/93 al 10/09/09 (16 años)	Del 11/09/09 al 11/09/25 (16 años)	Biología molecular	Oncología precisión
Argentina	7.342	2.350	32%	2.280	5.097	868	640
Bolivia	135	69	51%	23	96	9	4
Brasil	28.717	11.792	41%	5.217	23.229	1.730	773
Chile	5.461	2.251	41%	1.108	4.049	292	201
Colombia	3.196	1.221	38%	276	2.831	256	148
Costa Rica	509	228	44%	131	325	35	20
Cuba	736	312	42%	269	374	49	18
República Dominicana	150	71	47%	20	125	6	3
Ecuador	676	201	29%	66	604	79	33
El Salvador	2.531	1.123	73%	320	804	32	20
Guatemala	290	117	40%	36	252	8	7
Haití	171	91	53%	16	115	1	2
Honduras	143	49	34%	28	110	4	1
México	13.280	5.690	42%	3.214	9.309	810	421
Nicaragua	90	28	31%	20	68	3	1
Panamá	334	161	48%	51	191	26	10
Paraguay	277	98	35%	38	233	29	13
Perú	1.776	885	49%	254	1.458	81	76
Uruguay	851	359	42%	189	638	62	34
Venezuela	682	339	49%	280	232	19	20
Total 20 países	66.703	26.955	40%	13.836	50.140	4.314	2.445
Total registrado PubMed oncología en el mundo	2.983.526	1.187.057	-	896.722	1.540.659	110.660	71.572

Al seleccionar solo los estudios clínicos (*clinical trials*) registrados en PubMed para “oncology”, se tienen a la fecha 163.968 a nivel mundial y para los países seleccionados de América Latina 34.470, que equivaldría al 2,7% (Tabla 2). Posteriormente, al activar el filtro por edad en los registros de estudios clínicos, se observa como predominan las publicaciones en adultos (71%), cifra que en Colombia alcanza el 77% (Tabla 2). Para el mismo período temporal se han publicado en PubMed 19.060 estudios clínicos en cáncer de pulmón a nivel mundial y solo 483 estudios con representación de los diez países seleccionados de América Latina, lo que corresponde a un 2,5%. En este escenario se destaca Brasil (n=172 estudios), México (n=107), Chile (n=84), Argentina (n=49), y finalmente Colombia con una escasa representación (n=12 estudios). Al adicionar el filtro para *molecular biology*, se

encontraron 151 estudios clínicos a nivel global, de los cuales solo el 6,6% se realizaron en América Latina.

En una dimensión similar, se han registrado en PubMed 23.709 estudios clínicos sobre cáncer de mama a nivel mundial, de los cuales solo el 3,2% se llevaron a cabo en América Latina (n=385). Cuando se contempló el uso de biomarcadores específicos en este ámbito, solo se incluyeron 201 estudios clínicos con escasa representatividad de los países de América Latina (6,4%). Para el melanoma se han registrado 5.085 estudios clínicos en PubMed, con una representatividad marginal de pacientes latinos (<3%) provenientes de Chile, Brasil, México y Argentina. En este escenario, el número de registros asociados a biología molecular fue de 54 a nivel mundial, con una participación del 12% en América Latina.

**Tabla 2.**

Publicaciones de estudios clínicos (*clinical trials*) en oncología registradas en PubMed en 20 países de Latinoamérica.

País	Total estudios clínicos	En adultos	%	Cáncer de pulmón	Pulmón	Cáncer de mama	Mama + biología molecular	Melanoma	Melanoma + biología molecular
Argentina	440	309	70%	66	0	49	0	20	1
Bolivia	0	0	0%	0	0	0	0	0	0
Brasil	1.934	1.462	75%	172	4	385	8	48	5
Chile	491	350	71%	84	0	65	0	56	1
Colombia	137	106	77%	12	2	18	1	2	0
Costa Rica	38	30	78%	0	0	0	0	0	0
Cuba	80	61	76%	13	0	7	0	4	0
República Dominicana	5	2	33%	0	0	2	0	0	0
Ecuador	20	12	60%	1	0	3	0	0	0
El Salvador	157	119	75%	15	0	31	1	0	0
Guatemala	16	12	75%	1	0	4	1	0	0
Haití	6	5	83%	1	0	1	0	0	0
Honduras	8	4	50%	0	0	1	0	0	0
México	918	687	74%	107	3	146	2	21	0

País	Total estudios clínicos	En adultos	%	Cáncer de pulmón	Pulmón	Cáncer de mama	Mama + biología molecular	Melano-ma	Melanoma + biología molecular
Nicaragua	3	1	33%	1	0	0	0	0	0
Panamá	19	9	47%	1	0	4	0	0	0
Paraguay	3	2	66%	0	0	0	0	0	0
Perú	117	93	79%	6	0	47	0	1	0
Uruguay	47	32	68%	3	1	13	0	2	0
Venezuela	39	33	84%	0	0	4	0	0	0
Total 20 países	4.478	3.198	-	483	10	776	13	154	7
Total registrado oncología en el mundo	163.968	125.980	76	19.060	151	23.709	201	5.085	54

Buena parte de las limitaciones para el desarrollo de estudios e investigación en biología molecular tumoral se relaciona con la restricción estructural de la región. En contexto, América Latina cuenta con ~50 laboratorios especializados en genómica tumoral (incluyendo capacidad para evaluación bioinformática integral y realización de pruebas de secuenciación de próxima generación (NGS, por sus siglas en inglés), concentrados en Brasil (9 laboratorios), México (n=8), Colombia (n=8) y Argentina (n=7). En adición, solo el 20% cuenta con capacidad para realizar secuenciación de alto rendimiento a gran escala, con una notable limitación en la cobertura de áreas rurales <sup>9</sup>. Considerando que en la actualidad América Latina cuenta con ~670 millones de habitantes y una tasa de crecimiento anual de 0,65%, la región tendrá 3,5 a 4 millones de casos nuevos de cáncer para 2050, lo que representa un crecimiento del 140% a partir de 2022 <sup>10</sup>. Estas cifras se traducen en un número de pacientes elegibles para pruebas moleculares diagnósticas de ~600.000-800.000 casos avanzados/año para 2025 <sup>11</sup>. En proyección para 2050, el número de pacientes/año que necesitarán pruebas moleculares según las guías de la ESMO/NCCN será de 1,5 a 2 millones <sup>12</sup>. Lastimo-

samente, solo el 20-40% de los casos incidentes tienen una prueba molecular (~140,000-360,000 tests/año) para 2025, particularmente por costo (\$500-2.000/test) y acceso limitado <sup>12</sup>.

Parte de las limitaciones más significativas para el desarrollo sostenido de los laboratorios de genómica a nivel regional se relaciona con la obtención de financiamiento continuado, dada la alta dependencia de estipendios y de consorcios externos, lo que limita la soberanía de la información a largo plazo <sup>13</sup>. Además, existe una notable desigualdad en la infraestructura regional, siendo óptima en el 70% de los laboratorios de Brasil y en menos del 20% aquellos de Centro América <sup>14</sup>.

Lastimosamente, desde la perspectiva de la investigación básica y de transferencia, la participación de muestras de pacientes de América Latina en la valoración global de la epidemiología molecular del cáncer es limitada. Por ejemplo, la región solo representa el ~1-3% de los datos globales de proyectos como The Cancer Genome Atlas (TCGA) <sup>15</sup>. Esto genera sesgos en la interpretación de la ancestría, así como en la incidencia y la prevalencia de



algunas de las patologías más representativas de los tumores sólidos y hematológicos <sup>16</sup>. No obstante, algunos proyectos colaborativos han generado un espacio dinámico para la obtención de información con impacto real en la biología de la enfermedad a nivel regional; entre otros, el estudio CÓDIGO (Colombia) valoró más de 95 millones de variantes en una población abierta de 1.440 personas. En una dimensión similar, los proyectos JAGUAR (Wellcome Sanger, 2025) y LatinCells (CZI) generan datos integrados sobre patologías como la diabetes, la obesidad y la infección por SARS-CoV-2 en América Latina. En una dimensión más discreta, diversos investigadores han contribuido con el 2% de la información a la base de datos GENIE <sup>17</sup>.

El mercado de biología y patología molecular en América Latina será de US\$ 19,4 billones en 2025, con una tasa de crecimiento anual compuesto de 9,6% hasta 2030, y será impulsado particularmente por la genómica tumoral, las ciencias reproductivas/fertilidad y las patologías heredofamiliares <sup>18</sup>. Para facilitar la expansión se requiere entrenar >200 profesionales/año en bioinformática y con capacidades técnicas para laboratorio húmedo (*wetlab*), implementar plataformas POC (*point-of-care*) para patologías y pruebas con baja complejidad en áreas rurales o con menor densidad poblacional y habilitar nuevos programas regionales para modelos de análisis de célula única (*Single Cell Genomics LATAM*) <sup>19</sup>. También se requieren alianzas público/privadas que permitan subsidiar las pruebas de NGS (e.g. Brasil's SUS expansion) creando fondos dinámicos con alcance regional como el diseñado por Groundshot para países con ingresos medios y bajos (LMICs, por su sigla en inglés). De manera complementaria, la expansión de la patología digital podría aumentar las capacidades instaladas para el diagnóstico oncológico y molecular, dada la escasez de estos profesionales en la región, dado que en la actualidad la densidad promedio es de 17 patólogos por un millón de

habitantes (comparada con 55 patólogos por cada millón de habitantes en Estados Unidos). Existen datos limitados para la valoración del número de patólogos oncológicos; sin embargo, se estima que corresponde a menos de 1.500-3.000 profesionales para toda América Latina, estando especialmente concentrados en Brasil y México <sup>20,21</sup>.

La inteligencia artificial (IA) está revolucionando el diagnóstico molecular del cáncer al analizar datos genómicos, patológicos e imágenes con precisión y velocidad superiores a las de los métodos tradicionales. En los LMICs, donde la infraestructura limitada y el costo de las pruebas por NGS restringen el acceso, la IA ofrece soluciones escalables y asequibles. La IA procesa variantes genéticas (SNVs, fusiones), identificando alteraciones potencialmente accionables con una precisión próxima al 95%, lo que reduce costos y limitaciones de infraestructura asociadas a los análisis bioinformáticos <sup>20</sup>. Algunos algoritmos de *Deep Learning/Machine Learning* clasifican biopsias con sensibilidades superiores al 90% y diversos dispositivos móviles con IA permiten cerrar brechas en la implementación de estos sistemas (e.g., ZariaChem) <sup>22</sup>. Otras herramientas como ADMET-AI pronostica propiedades moleculares de diferentes neoplasias sólidas reduciendo el costo de la patología molecular hasta en 40% y con un área bajo la curva de 0,92 <sup>23</sup>.

Algunas recomendaciones clave que podrían impactar positivamente la implementación y el acceso a la biología molecular en América Latina son: a) desarrollar programas de capacitación estructurados y dinámicos a nivel local y regional, que incluyan formación continua. Este eje de capacitación podría aumentar la productividad de los países de América Latina hasta en un 5%, reduciendo los costos de formación en más del 50%, especialmente si se utilizan modelos virtuales o híbridos <sup>24</sup>. b) Inversión en

tecnología portátil que potencie la capacidad rural, amplíe el acceso y reduzca los tiempos de diagnóstico <sup>25</sup>. c) Fomentar la colaboración internacional y la transferencia de tecnología mediante el establecimiento de alianzas inter-institucionales con centros de alto rendimiento e ingresos (programas *twinning* – laboratorios gemelos, Wellcome Sanger) <sup>26</sup>. d) Adopción de modelos de acceso abierto y de datos compartidos (principios FAIR) para reducir los costos de análisis independientes y mejorar la diversidad de las bases de datos globales <sup>26</sup>. e) Favorecer el financiamiento sostenible y la búsqueda de subsidios tecnológicos a través de fondos nacionales/regionales considerando el impacto en salud pública (permite aumentar la cobertura y el acceso a pruebas genómicas en 20-40%)<sup>26</sup>.

f) Implementación rápida y progresiva de modelos de IA para aumentar la capacidad de procedimiento de datos (uso de plataformas cloud y minimización del uso de hardware local). g) Homogeneizar la regulación regional con los estándares globales para la promoción del diagnóstico molecular en el cáncer, creando incentivos para la inversión local y regional, así como marcos para el uso de datos (gobierno y soberanía) <sup>27</sup>. h) Evaluación y monitorización con visión de impacto sostenible, validando la cobertura de las pruebas, el número de proyectos de investigación y de publicaciones, y el conocimiento sobre biología tumoral. La Figura 1 resume las principales estrategias para optimizar la implementación del diagnóstico molecular en el cáncer en América Latina.

**Figura 1.**

Estrategias para la implementación y amplificación de la biología molecular tumoral en LATAM.



Dado que la exploración de la biología molecular tumoral es esencial para revelar las alteraciones multiómicas que impulsan la enfermedad, su pronóstico y la predicción de potenciales alternativas terapéuticas personalizadas, resulta esencial mejorar la implementación y el acceso a estas para impactar un número creciente de enfermedades y pacientes con cáncer en América Latina <sup>28</sup>. El presente número explora en detalle diversos aspectos de la biología del cáncer y de la tecnología para comprender su desarrollo y evolución. Los editores agradecen el profundo esfuerzo de los autores para generar magníficas piezas a favor de la ciencia.

## Referencias

1. Arrieta O, Zatarain-Barrón ZL, Cardona AF, Corrales L, Martín C, Cuello M. Uniting Latin America Through Research: How Regional Research Can Strengthen Local Policies, Networking, and Outcomes for Patients With Lung Cancer. *Am Soc Clin Oncol Educ Book*. [Internet]. 2022;42:463–9. Disponible en: [https://doi.org/10.1200/edbk\\_349951](https://doi.org/10.1200/edbk_349951)
2. Raez LE, Cardona AF, Santos ES, Catoe H, Rolfo C, Lopes G, et al. The burden of lung cancer in Latin-America and challenges in the access to genomic profiling, immunotherapy and targeted treatments. *Lung Cancer*. [Internet]. 2018;119:7–13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2018.02.014>
3. Raez LE, Nogueira A, Santos ES, Dos Santos RS, Franceschini J, Ron DA, et al. Challenges in Lung Cancer Screening in Latin America. *J Glob Oncol*. [Internet]. 2018;4:1–10. Disponible en: <https://doi.org/10.1200/jgo.17.00040>
4. Piñeros M, Laversanne M, Barrios E, Cancela MDC, De Vries E, Pardo C, et al. An updated profile of the cancer burden, patterns and trends in Latin America and the Caribbean. *Lancet Reg Health - Am*. [Internet]. 2022;13:100294. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lana.2022.100294>
5. Raez LE, Arrieta O, Chamorro DF, Soberanis-Piña PD, Corrales L, Martín C, et al. Durvalumab After Chemoradiation for Unresectable Stage III Non-Small Cell Lung Cancer: Inferior Outcomes and Lack of Health Equity in Hispanic Patients Treated With PACIFIC Protocol (LA1-CLICaP). *Front Oncol*. [Internet]. 2022;12:12:904800. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.904800>
6. Raez LE, Santos ES, Rolfo C, Lopes G, Barrios C, Cardona A, et al. Challenges in Facing the Lung Cancer Epidemic and Treating Advanced Disease in Latin America. *Clin Lung Cancer*. [Internet]. 2017;18(1):e71–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clcc.2016.05.003>
7. Gössling G, Rebelatto TF, Villarreal-Garza C, Ferrigno AS, Bretel D, Sala R, et al. Current Scenario of Clinical Cancer Research in Latin America and the Caribbean. *Curr Oncol*. [Internet]. 2023;30(1):653–62. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/curroncol30010050>
8. McIntosh SA, Alam F, Adams L, Boon IS, Callaghan J, Conti I, et al. Global funding for cancer research between 2016 and 2020: a content analysis of public and philanthropic investments. *Lancet Oncol*. [Internet]. 2023;24(6):636–645. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(23\)00182-1](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(23)00182-1)
9. Faundes V, Repetto GM, Valdivia LE. Discovery of novel genetic syndromes in Latin America: Opportunities and challenges.



- Genet Mol Biol. [Internet]. 2024;47(Suppl 1):e20230318. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2023-0318>
10. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*. [Internet]. 2024;74(3):229-263. Disponible en: <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
11. Worldometer. Países de América Latina y el Caribe por Población (2025). [Internet]. Disponible en: <https://www.worldometers.info/es/poblacion/paises-en-america-latina-y-el-caribe-por-poblacion/>
12. Chavarri-Guerra Y, Blazer KR, Weitzel JN. Genetic Cancer Risk Assessment for Breast Cancer in Latin America. *Rev Invest Clin*. [Internet]. 2017;69(2):94-102. Disponible en: <https://doi.org/10.24875/ric.17002195>
13. Vilchis-Peluyera AI. The Development of Molecular Biology in Latin America: The Cases of Argentina, Brazil, Cuba and Mexico. *TIP* [Internet]. 2018;21(suppl.1):e20180147. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.147>
14. Chávez-Canales M, Aguilar-Arnal L. Unlocking Latin America's scientific potential: challenges and opportunities in a globalized world. *Trends Cell Biol*. [Internet]. 2025;35(9):723-728. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2025.06.007>
15. Lozada-Martinez ID, Lozada-Martinez LM, Cabarcas-Martinez A, Ruiz-Gutierrez FK, Aristizabal Vanegas JG, Amoroch Lozada KJ, López-Álvarez LM, Fiorillo Moreno O, Navarro Quiroz E. Historical evolution of cancer genomics research in Latin America: a comprehensive visual and bibliometric analysis until 2023. *Front Genet*. [Internet]. 2024;15:1327243. doi:10.3389/fgene.2024.1327243. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1327243>
16. Dienstmann R, Ruiz-García E, Alsina M, Ruiz-Pace F, Groen-van Schooten TS, Martínez-Ciarpaglini C, et al. Integrated clinico-molecular analysis of gastric cancer in European and Latin American populations: LEGACY project. *ESMO Open*. [Internet]. 2025;10(3):104482. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esmoop.2025.104482>
17. Trynka G. Making genomics data more representative through Latin American research. *Wellcome Sanger Institute Blog*. [Internet]. 2025. Disponible en: <https://sangerinstitute.blog/2025/07/24/making-genomics-data-more-representative-through-latin-american-research/>
18. Meticulous Research. Latin America NGS Market – Opportunity Analysis and Industry Forecast (2025-2032). [Internet]. 2025. Disponible en: <https://www.meticulous-research.com/product/latin-america-ngs-market-5780>
19. Wellcome Connecting Science. Single Cell Genomics – Latin America & the Caribbean. [Internet]. 2025. Disponible en: <https://coursesandconferences.wellcomeconnectingscience.org/event/single-cell-genomics-latin-america-the-caribbean-20240809/>
20. Rahman A, Cheng CL, Salim R, Goh Di Shen H, Gallagher WM, Iqbal J. Digital pathology and AI: enhancing molecular diagnostics in low- and middle-income countries. *Expert Rev Mol Diagn*. [Internet]. 2025;2:1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14737159.2025.2581687>

21. Colangelo M. How AI Can Help Address The Global Shortage of Pathologists. LinkedIn. [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/how-ai-can-help-address-global-shortage-pathologists-colangelo/>.
22. Istasy P, Lee WS, Iansavichene A, Upshur R, Gyawali B, Burkell J, Sadikovic B, Lazo-Langner A, Chin-Yee B. The Impact of Artificial Intelligence on Health Equity in Oncology: Scoping Review. *J Med Internet Res*. [Internet]. 2022;24(11):e39748. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/39748>
23. Wang J, Wang T, Han R, Shi D, Chen B. Artificial intelligence in cancer pathology: Applications, challenges, and future directions. *Cytojournal*. [Internet]. 2025;19:22:45. Disponible en: [https://doi.org/10.25259/cytojournal\\_272\\_2024](https://doi.org/10.25259/cytojournal_272_2024)
24. Moore B, Carvajal-López P, Chauke PA, Cristancho M, Dominguez Del Angel V, Fernandez-Valverde SL, et al. Ten simple rules for organizing a bioinformatics training course in low- and middle-income countries. *PLoS Comput Biol*. [Internet]. 2021;17(8):e1009218. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009218>. Erratum in: *PLoS Comput Biol*. 2022;18(5):e1010197. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010197>.
25. Valley AK, Ahiatrogah S, Kafintu-Kwashie AA, Amegatcher G, Prah D, Botwe AK, et al. A Systematic Review on Suitability of Molecular Techniques for Diagnosis and Research into Infectious Diseases of Concern in Resource-Limited Settings. *Curr Issues Mol Biol*. [Internet]. 2022;44(10):4367-4385. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/cimb44100300>
26. Myers HF, Fair AM, Villalta F, Walz K, Beech BM, Scott WK, Haas DW. Transdisciplinary Perspectives on Precision Medicine. *Health Equity*. [Internet]. 2021;5(1):288-298. Disponible en: <https://doi.org/10.1089/heq.2020.0131>
27. Sabiiti W, Mtafya B, Kuchaka D, et al. Optimising molecular diagnostic capacity for effective control of tuberculosis in high-burden settings. *Int J Tuberc Lung Dis* [Internet]. 2016;20:1004–9. Disponible en: <https://doi.org/10.5588/ijtld.15.0951>
28. Alvarez-Gomez RM, De la Fuente-Hernandez MA, Herrera-Montalvo L, Hidalgo-Miranda A. Challenges of diagnostic genomics in Latin America. *Curr Opin Genet Dev*. [Internet]. 2021;66:101-109. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gde.2020.12.010>