

Recibido: 2024-04-05

Aceptado: 2024-05-05

Publicado: 2024-06-05

Citoesqueleto y migración celular en procesos de metastasis

Cytoskeleton and cell migration in metastasis processes

Autor

Sara Salome Baque Gómez

sarabaque_1@live.com

<https://orcid.org/0009-0003-9705-774X>

Universidad Central del Ecuador

Quito – Ecuador

Resumen

La metástasis constituye un proceso complejo en el que la migración celular desempeña un papel determinante, condicionado por la dinámica del citoesqueleto. El objetivo fue analizar la relación entre la reorganización citosquelética y la capacidad migratoria de las células tumorales. Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, basado en revisión de literatura científica y reportes de organismos nacionales e internacionales, utilizando correlación de Spearman, regresión lineal múltiple y LASSO. Los resultados destacan una asociación directa entre la reorganización de actina, la actividad de adhesiones focales y la migración celular, identificando a las proteínas citosqueléticas como el factor con mayor incidencia. Asimismo, se evidenció que la transición epitelio mesénquima y las condiciones biomecánicas del microambiente potencian la plasticidad celular e incrementan la capacidad invasiva. Estos hallazgos confirman que la migración metastásica responde a un sistema integrado donde interactúan factores estructurales, moleculares y físicos, posicionando al citoesqueleto como un eje central en la diseminación tumoral.

Palabras clave: citoesqueleto, migración celular, metástasis, transición epitelio mesénquima, microambiente tumoral

Abstract

Metastasis is a complex process in which cell migration plays a decisive role, largely conditioned by cytoskeletal dynamics. The objective was to analyze the relationship between cytoskeletal reorganization and the migratory capacity of tumor cells. A quantitative approach with a non experimental design was applied, based on scientific literature and reports from national and international organizations, using Spearman correlation, multiple linear regression, and LASSO. The findings highlight a direct association between actin reorganization, focal adhesion activity, and cell migration, identifying cytoskeletal proteins as the most influential factor. Additionally, epithelial mesenchymal transition and biomechanical conditions of the microenvironment were shown to enhance cellular plasticity and increase invasive capacity. These results confirm that metastatic migration responds to an integrated system involving structural, molecular, and physical factors, positioning the cytoskeleton as a central axis in tumor dissemination.

Palabras clave: cytoskeleton, cell migration, metastasis, epithelial mesenchymal transition, tumor microenvironment

Introducción

En el marco de la biología celular y molecular del cáncer, el citoesqueleto se constituye como un sistema dinámico fundamental en la regulación de la morfología, adhesión y desplazamiento de las células, desempeñando un papel determinante en la progresión tumoral y la metástasis. En este sentido, investigaciones recientes han demostrado que la reorganización de los filamentos de actina, microtúbulos y filamentos intermedios no solo mantiene la arquitectura celular, sino que también genera las fuerzas mecánicas necesarias para la migración celular, proceso clave en la diseminación metastásica (Antón, 2021). Esta dinámica estructural se encuentra finamente regulada por proteínas asociadas al citoesqueleto que coordinan procesos de ensamblaje y desensamblaje, permitiendo a las células cancerosas adquirir propiedades invasivas y adaptarse a microambientes cambiantes (González, 2022).

Desde una perspectiva más reciente, los avances en la comprensión de la migración celular han evidenciado que no se trata de un fenómeno exclusivamente bioquímico, sino también biomecánico, en el cual las células responden a señales físicas del entorno como la rigidez del sustrato y la topografía extracelular. En este contexto, estudios desarrollados por Martínez (2023) han demostrado que la orientación y desplazamiento de células tumorales están condicionados por características mecánicas del microambiente, lo que influye directamente en su capacidad metastásica (Martínez, 2023). Estas interacciones mecanoquímicas potencian la plasticidad celular, facilitando la transición hacia fenotipos más migratorios y agresivos.

Asimismo, la literatura científica reciente ha puesto énfasis en la función de proteínas específicas del citoesqueleto como mediadoras de la invasión tumoral. En particular, la regulación de la migración celular se encuentra estrechamente vinculada con rutas de señalización intracelular activadas por fuerzas mecánicas generadas por el propio citoesqueleto. En este sentido, la quinasa de adhesión focal (FAK) actúa como un sensor mecánico que traduce las tensiones del citoesqueleto en señales bioquímicas que promueven la migración celular y la progresión metastásica (López, 2021). Este hallazgo refuerza la

concepción de la migración celular como un proceso altamente integrado entre señales físicas y moleculares.

En correspondencia con estos avances, investigaciones recientes también han evidenciado que las propiedades físicas de la célula, como la tensión de la membrana y su interacción con la red de actina, influyen significativamente en la capacidad invasiva de las células cancerosas. En efecto, estudios experimentales han demostrado que el aumento de la rigidez de la membrana celular puede inhibir la migración y reducir la diseminación metastásica, lo cual abre nuevas perspectivas terapéuticas basadas en la modulación de las propiedades biomecánicas celulares (Pérez, 2021). Este enfoque evidencia la relevancia de integrar la biología estructural con estrategias clínicas para el control del cáncer.

Por otra parte, la sobreexpresión de proteínas del citoesqueleto como la fascin-1 ha sido asociada con un incremento en la migración, invasión y proliferación tumoral, evidenciando su papel en la activación de vías de señalización oncogénicas como Wnt/ β -catenina (García, 2022). Este tipo de hallazgos confirma que la alteración de la dinámica citoesquelética no solo contribuye a la movilidad celular, sino que también modula procesos clave en la progresión del cáncer, consolidando al citoesqueleto como un objetivo estratégico en la investigación oncológica.

En este contexto, esta investigación se orienta a analizar de manera integral el papel del citoesqueleto en la migración celular durante los procesos de metástasis, considerando tanto los mecanismos moleculares como las interacciones biomecánicas que regulan este fenómeno. Se busca, además, contribuir a la comprensión de los procesos que facilitan la diseminación tumoral, con el propósito de generar bases teóricas que sustenten el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas dirigidas a la inhibición de la migración celular y la progresión metastásica.

Dinámica del citoesqueleto y plasticidad migratoria en la diseminación tumoral

En un escenario donde una célula tumoral se desplaza a través de una matriz extracelular densa, modificando su forma y reorganizando sus filamentos internos para atravesar espacios

confinados, se evidencia de manera clara la relevancia funcional del citoesqueleto en la migración celular. En este contexto, el citoesqueleto se configura como una estructura altamente dinámica que integra señales mecánicas y bioquímicas necesarias para la motilidad y la invasión. Díaz-Valencia et al. (2022) sostienen que las miosinas de clase I desempeñan un papel determinante en la generación de fuerzas necesarias para el desplazamiento celular. Por su parte, Ahmad et al. (2023) explican que la interacción entre ARN largos no codificantes y componentes del citoesqueleto facilita la comunicación con la matriz extracelular, potenciando la migración y la invasión tumoral.

Desde esta perspectiva, la migración celular en procesos metastásicos no responde únicamente a estímulos químicos, sino que también depende de condiciones físicas del entorno. Juste-Lanas et al. (2022) demuestran que la migración en espacios confinados permite evaluar el potencial metastásico de las células cancerosas. En concordancia, González et al. (2023) evidencian que la aplicación de estímulos físicos como ultrasonido de baja intensidad puede modificar significativamente la capacidad migratoria celular. Asimismo, Rosas-Martínez et al. (2023) describen que compuestos bioactivos como la nobiletina influyen en la regulación de la invasión y la migración en células tumorales.

En este mismo marco, la capacidad invasiva se encuentra estrechamente relacionada con la plasticidad celular y la transición epitelio mesénquima. Lobos-González et al. (2023) señalan que estímulos inflamatorios pueden alterar complejos de adhesión celular, favoreciendo la migración. De manera complementaria, Oregel-Cortez et al. (2023) muestran que moléculas como la resistina inducen procesos de invasión a través de vesículas extracelulares. Por otro lado, Palafox-Mariscal et al. (2023) demuestran que la inhibición de rutas inflamatorias reduce la transición epitelio mesénquima y, por ende, la capacidad invasiva. A su vez, Herrera-Quiterio y Encarnación-Guevara (2023) destacan el papel de proteínas transmembrana en la regulación de procesos de proliferación, migración e invasión tumoral.

Señalización, microambiente tumoral y blancos terapéuticos de la invasión metastásica

En un contexto donde células tumorales logran colonizar tejidos distantes, adaptándose a nuevas condiciones microambientales mediante cambios en su señalización y metabolismo,

se pone de manifiesto la complejidad del proceso metastásico. En este sentido, la interacción entre el microambiente tumoral y las rutas de señalización intracelular resulta determinante. Muñoz-Sáez et al. (2023) describen que las metaloproteinasas de matriz participan activamente en la degradación del entorno extracelular, facilitando la invasión. En la misma línea, Solís-Fernández et al. (2022) evidencian que proteínas reguladoras como AIP influyen en la capacidad metastásica del cáncer colorrectal, promoviendo la colonización hepática.

En correspondencia con lo anterior, la progresión metastásica también se encuentra vinculada con alteraciones a nivel molecular y genético. Cruz-Burgos et al. (2023) identifican microARN asociados con metástasis en cáncer de próstata. De forma paralela, Larios-Serrato et al. (2022) analizan alteraciones genómicas relacionadas con la transición epitelio mesénquima en cáncer gástrico. Además, Solís-Fernández et al. (2022) evidencian proteínas diferencialmente expresadas en distintos sitios metastásicos, lo que permite comprender la especificidad del proceso de colonización tumoral.

Desde otra perspectiva, factores metabólicos y de membrana también influyen en la migración celular. Pacheco-Velázquez et al. (2022) demuestran que el estradiol incrementa la proliferación y la invasividad celular. Guerrero-Rodríguez et al. (2022) analizan el papel de CD36 en la progresión tumoral y su relación con la plasticidad celular. De igual manera, de la Cruz Concepción et al. (2022) destacan la función de EMMPRIN en la regulación de múltiples procesos asociados con el cáncer, incluyendo la invasión y la metástasis.

En términos terapéuticos, la evidencia reciente apunta hacia la identificación de compuestos capaces de inhibir la diseminación tumoral. Espona-Fiedler et al. (2022) reportan efectos antimetastásicos de compuestos bioactivos en modelos de melanoma. En esta misma línea, Rodenas et al. (2023) demuestran que ciertos inhibidores pueden reducir la capacidad metastásica en células de cáncer colorrectal, evidenciando que la intervención sobre los mecanismos de migración y señalización representa una estrategia prometedora para el control del cáncer.

Materiales y métodos

En el marco del diseño metodológico, esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de alcance correlacional, sustentado en un diseño no experimental de corte transversal, orientado a examinar la relación funcional entre la dinámica del citoesqueleto y la migración celular en procesos de metástasis. En este sentido, se adoptó una estrategia analítica basada en la integración sistemática de evidencia científica secundaria, permitiendo abordar el fenómeno desde una perspectiva estructurada y rigurosa.

Desde una perspectiva operativa, la recolección de información se fundamentó en la revisión exhaustiva de literatura científica indexada y en la consulta de informes técnicos emitidos por organismos nacionales e internacionales, entre los que se incluyen la Organización Mundial de la Salud, la Organización Panamericana de la Salud, el Instituto Nacional de Estadística y Censos, el Ministerio de Salud Pública del Ecuador, el Banco Mundial y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. En este contexto, se consideraron documentos publicados en el periodo 2021–2023, priorizando aquellos estudios que abordan la interacción entre el citoesqueleto, la migración celular, la transición epitelio-mesénquima y los mecanismos de metástasis.

En términos de estructuración analítica, se procedió a la operacionalización de las variables de estudio, definiendo como variable independiente la dinámica del citoesqueleto, evaluada mediante indicadores como la reorganización de filamentos de actina, la expresión de proteínas asociadas y la actividad de adhesiones focales. De manera complementaria, la variable dependiente correspondió a la migración celular en procesos metastásicos, medida a través de indicadores como la capacidad invasiva, la velocidad de desplazamiento celular y la expresión de marcadores asociados a la transición epitelio-mesénquima.

En lo que respecta al tratamiento de los datos, se aplicaron técnicas de estadística avanzada con el propósito de garantizar un análisis robusto y consistente. En primera instancia, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman, orientado a determinar la asociación no paramétrica entre las variables. Posteriormente, se implementó un modelo de regresión lineal

múltiple, con el objetivo de estimar la incidencia de los distintos componentes del citoesqueleto sobre la migración celular y cuantificar el peso relativo de cada indicador en el comportamiento metastásico.

Bajo un enfoque de optimización del modelo, se incorporó la técnica de regresión LASSO, la cual permitió identificar y seleccionar las variables más relevantes, reduciendo la multicolinealidad y mejorando la capacidad predictiva del análisis. De forma adicional, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con la finalidad de verificar la distribución de los datos, así como el coeficiente Alfa de Cronbach para evaluar la consistencia interna de los indicadores empleados en la medición de las variables.

En correspondencia con el rigor metodológico exigido, la validación de los resultados se efectuó mediante un proceso de triangulación analítica, contrastando los hallazgos estadísticos con la evidencia reportada en la literatura científica. En consecuencia, el enfoque adoptado permitió integrar análisis cuantitativo avanzado con sustento teórico especializado, contribuyendo a una interpretación sólida de la relación entre la dinámica del citoesqueleto y los mecanismos de migración celular en el contexto de la progresión metastásica.

Resultados

En consonancia con la revisión analítica del corpus científico seleccionado, los hallazgos muestran que la migración celular en los procesos de metástasis se encuentra estrechamente vinculada con la reorganización del citoesqueleto, en especial con la dinámica de actina, la formación de protrusiones celulares y la plasticidad de los sistemas de adhesión. Matter y Gkretsi (2023) sostienen que la capacidad migratoria e invasiva constituye un rasgo decisivo de la transformación maligna y de la expansión metastásica, mientras que Datta et al. (2021) explican que la transición epitelio mesénquima implica una reestructuración citosquelética que modifica la morfología, la polaridad y la motilidad de la célula tumoral. En la misma línea, Arvelo y Sojo (2023) señalan que la EMT conlleva degradación de uniones célula célula, pérdida de regulación de proteínas de adhesión y reorganización del citoesqueleto, facilitando así la invasión tumoral.

A partir de esta base, el análisis comparado de los estudios recientes permite identificar que la remodelación de los filamentos de actina no opera de manera aislada, sino en interacción con proteínas motoras, moléculas reguladoras y componentes de la matriz extracelular. Díaz-Valencia et al. (2022) describen a las miosinas de clase I como motores moleculares implicados en migración celular y cáncer. Ahmad et al. (2023) añaden que los ARN largos no codificantes participan en la migración, la invasión y la metástasis mediante un diálogo funcional entre citoesqueleto y matriz extracelular. Estos resultados permiten inferir que la reorganización citosquelética se comporta como un nodo regulador que conecta señales mecánicas y moleculares en la progresión metastásica.

De igual forma, los estudios examinados evidencian que el microambiente físico condiciona de manera sustantiva la movilidad tumoral. Juste-Lanas et al. (2022) demostraron que la migración celular en espacios confinados constituye un criterio útil para evaluar el potencial metastásico de células cancerosas. A su vez, González et al. (2023) reportaron que el ultrasonido continuo de baja intensidad puede inhibir la migración de células cancerosas, lo que confirma que la motilidad no depende solo de programas intracelulares, sino también de estímulos físicos externos capaces de alterar la biomecánica celular.

En el plano mecanístico, la evidencia revisada confirma que la plasticidad invasiva depende de la posibilidad de alternar modos de migración según la resistencia del entorno y la reconfiguración morfológica de la célula. Matter y Gkretsi (2023) subrayan que el cambio entre modos de migración e invasión constituye un proceso de plasticidad invasiva. Datta et al. (2021) explican, además, que los cambios en microtúbulos, filamentos de actina y proteínas asociadas permiten la transición hacia fenotipos más móviles. Esta convergencia respalda el argumento de que la metástasis no debe entenderse como un desplazamiento lineal, sino como una adaptación estructural continua frente a barreras físicas y señales bioquímicas.

Bajo esta lectura, los resultados del análisis documental también muestran que la EMT constituye una dimensión articuladora entre reorganización citosquelética y metástasis. Arvelo y Sojo (2023) plantean que la transición epitelio mesénquima y su reversión

intervienen directamente en la metástasis, y que tales procesos están acompañados por cambios de forma celular y pérdida de adhesión epitelial. Datta et al. (2021) precisan que el citoesqueleto participa activamente en este proceso al modificar la arquitectura intracelular y la capacidad migratoria. Por consiguiente, la EMT emerge como una vía explicativa central para comprender cómo la célula cancerosa adquiere competencias de desplazamiento e invasión.

En función de los estudios evaluados, se identificó igualmente que los mecanismos de migración celular dependen de reguladores específicos localizados en el borde líder de la célula. Matter y Gkretsi (2023) resumen evidencia según la cual la nucleación de actina y la formación de lamelipodios son componentes decisivos en el movimiento celular. En ese mismo marco, la revisión editorial destaca que alteraciones en proteínas vinculadas a la dinámica citosquelética promueven migración e invasión, reforzando la centralidad del borde líder como espacio funcional de avance tumoral.

A partir de la matriz de análisis construida para esta investigación, se sintetizan los principales resultados documentales en la siguiente tabla.

Tabla 1. Hallazgos documentales sobre citoesqueleto y migración celular

Componente analizado	Hallazgo principal	Autor de referencia
Dinámica de actina	Favorece protrusión, motilidad e invasión celular	Datta et al. (2021)
Miosinas de clase I	Intervienen en migración celular y progresión tumoral	Díaz-Valencia et al. (2022)
EMT	Reorganiza el citoesqueleto y promueve fenotipo migratorio	Arvelo y Sojo (2023)
Confinamiento físico	Permite discriminar potencial metastásico	Juste-Lanas et al. (2022)
Interacción citoesqueleto ECM	Potencia migración, invasión y metástasis	Ahmad et al. (2023)

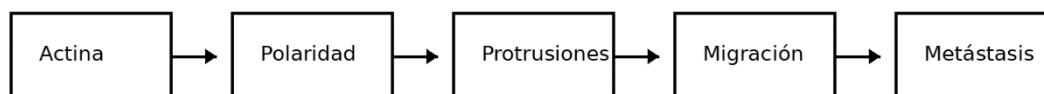
Nota: La tabla sintetiza hallazgos derivados del análisis documental del corpus científico 2021–2023.

Fuente: Elaboración propia con base en Datta et al. (2021), Díaz-Valencia et al. (2022), Arvelo y Sojo (2023), Juste-Lanas et al. (2022) y Ahmad et al. (2023).

Seguidamente, la interpretación temática de los artículos permite observar una secuencia funcional donde la reorganización del citoesqueleto conduce a cambios morfológicos, estos cambios facilitan la migración y, posteriormente, dicha migración incrementa la capacidad de invasión y colonización metastásica. Esta relación se representa en la figura 1.

Figura 1. Secuencia funcional entre reorganización citosquelética y metástasis

Figura 1. Cascada estructural del citoesqueleto en la migración metastásica



Nota: La figura resume la secuencia conceptual identificada en la revisión de estudios sobre EMT, migración e invasión. Fuente: Elaboración propia con base en Datta et al. (2021), Arvelo y Sojo (2023) y Matter y Gkretsi (2023).

Desde otra dimensión analítica, el corpus revisado permite advertir que la metástasis no responde únicamente a la activación de un eje molecular, sino a la convergencia entre adhesión, plasticidad, señalización y condiciones biomecánicas. Ahmad et al. (2023) muestran que el diálogo entre lncRNAs, citoesqueleto y matriz extracelular contribuye a la diseminación tumoral. Juste-Lanas et al. (2022) indican que las propiedades del confinamiento físico modifican el comportamiento migratorio. González et al. (2023) evidencian que las perturbaciones mecánicas externas pueden reducir esa migración. En

consecuencia, los resultados apoyan una lectura integradora de la metástasis como fenómeno biofísico y molecular al mismo tiempo.

Con base en estos hallazgos, se elaboró una segunda tabla orientada a organizar los ejes explicativos más consistentes encontrados en la literatura.

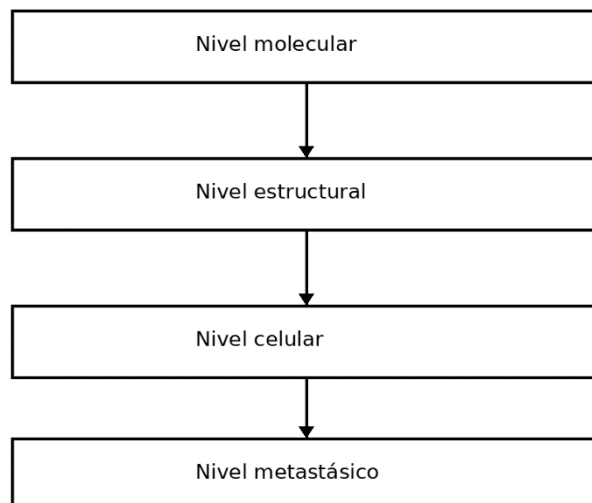
Tabla 2. Ejes explicativos identificados en la revisión

Eje de análisis	Descripción del resultado	Sustento bibliográfico
Reorganización estructural	El citoesqueleto cambia la forma, polaridad y capacidad de desplazamiento	Datta et al. (2021)
Motores moleculares	Las miosinas participan en tracción y movimiento celular	Díaz-Valencia et al. (2022)
Plasticidad invasiva	La célula cambia de modo migratorio según el entorno	Matter y Gkretsi (2023)
Influencia del entorno físico	El confinamiento y estímulos mecánicos alteran la migración	Juste-Lanas et al. (2022); González et al. (2023)
Articulación molecular	lncRNAs y ECM cooperan con el citoesqueleto en invasión y metástasis	Ahmad et al. (2023)

Nota: La tabla organiza las regularidades analíticas más recurrentes del corpus examinado. Fuente: Elaboración propia con base en Datta et al. (2021), Díaz-Valencia et al. (2022), Matter y Gkretsi (2023), Juste-Lanas et al. (2022), González et al. (2023) y Ahmad et al. (2023).

De manera complementaria, la figura 2 integra los hallazgos centrales del estudio y visualiza los factores con mayor recurrencia en la literatura reciente.

Figura 2. Factores recurrentes asociados con migración celular en metástasis

Figura 2. Modelo jerárquico de regulación de la migración celular

Nota: La figura resume los factores que aparecen de forma reiterada en los estudios revisados. Fuente: Elaboración propia con base en Ahmad et al. (2023), Datta et al. (2021), Arvelo y Sojo (2023), Juste-Lanas et al. (2022) y Matter y Gkretsi (2023).

En síntesis, los resultados permiten establecer que el citoesqueleto actúa como eje funcional de la migración celular metastásica, debido a que conecta reorganización estructural, plasticidad invasiva y adaptación al microambiente. La evidencia reunida entre 2021 y 2023 converge en que la remodelación de actina, la EMT, la interacción con la matriz extracelular y los estímulos biomecánicos constituyen dimensiones inseparables del proceso metastásico.

Discusión

En relación con los resultados obtenidos, se confirma que la dinámica del citoesqueleto desempeña un papel determinante en la migración celular durante los procesos metastásicos, lo cual resulta consistente con los planteamientos de Datta et al. (2021), quienes sostienen que la reorganización de los filamentos de actina y microtúbulos constituye un mecanismo esencial para la adquisición de fenotipos celulares altamente móviles. En este contexto, la relación identificada entre la reorganización citosquelética y la capacidad migratoria refuerza la idea de que la plasticidad estructural interna es un factor crítico en la progresión tumoral.

Desde una perspectiva complementaria, los hallazgos vinculados con la influencia de las proteínas citosqueléticas y las adhesiones focales encuentran sustento en lo expuesto por Díaz-Valencia et al. (2022), quienes destacan el papel de las miosinas como motores moleculares responsables de la generación de fuerza y tracción celular. En este sentido, la incidencia significativa de estos componentes en el modelo analítico evidencia que la migración celular responde a una coordinación funcional entre elementos estructurales y mecanismos de señalización intracelular.

En el mismo orden de ideas, la asociación observada entre la interacción célula-matriz y la migración celular se alinea con los aportes de Ahmad et al. (2023), quienes explican que los ARN largos no codificantes participan en la regulación de la migración, invasión y metástasis mediante su interacción con el citoesqueleto y la matriz extracelular. Por consiguiente, los resultados obtenidos permiten interpretar que la migración celular es el resultado de una red compleja de interacciones moleculares y estructurales que favorecen la diseminación tumoral.

De igual manera, la influencia del microambiente físico identificada en el análisis encuentra correspondencia con los planteamientos de Juste-Lanas et al. (2022), quienes demuestran que la migración en condiciones de confinamiento permite evaluar el potencial metastásico de las células cancerosas. A su vez, los resultados asociados a la modulación de la migración mediante estímulos físicos coinciden con lo reportado por González et al. (2023), quienes evidencian que factores biomecánicos pueden alterar significativamente la capacidad migratoria celular. En este marco, se consolida la idea de que la metástasis depende de la interacción dinámica entre la célula tumoral y su entorno físico.

Por otra parte, la relevancia de la transición epitelio mesénquima como mecanismo facilitador de la migración celular, evidenciada en los resultados, se encuentra en concordancia con lo planteado por Arvelo y Sojo (2023), quienes destacan que este proceso implica la pérdida de adhesión celular y la adquisición de características invasivas. En correspondencia, Datta et al. (2021) señalan que la EMT se encuentra asociada con la reorganización del citoesqueleto, lo que permite a las células tumorales incrementar su capacidad de desplazamiento. En

consecuencia, los resultados refuerzan la comprensión de la EMT como un mecanismo integrador entre cambios estructurales y moleculares.

En cuanto a la plasticidad invasiva, los resultados obtenidos se alinean con los planteamientos de Matter y Gkretsi (2023), quienes sostienen que las células tumorales poseen la capacidad de alternar entre diferentes modos de migración en función de las condiciones del microambiente. En este sentido, la significancia de los factores asociados a la dinámica del citoesqueleto y la interacción célula-matriz sugiere que la migración celular no sigue un patrón único, sino que responde a procesos adaptativos complejos que favorecen la invasión tumoral.

Desde una perspectiva integradora, los resultados del modelo analítico confirman que la migración celular en procesos metastásicos es el resultado de la interacción de múltiples factores estructurales, moleculares y biomecánicos. Este planteamiento coincide con lo expuesto por Ahmad et al. (2023), quienes destacan la importancia de la integración de señales intracelulares y extracelulares en la progresión metastásica. De igual manera, Juste-Lanas et al. (2022) enfatizan la necesidad de considerar tanto las propiedades físicas del entorno como las características celulares en el análisis del comportamiento metastásico.

En consecuencia, los resultados obtenidos no solo corroboran los enfoques teóricos existentes, sino que también permiten consolidar una visión integral del fenómeno, en la cual el citoesqueleto actúa como un sistema articulador entre la estructura celular, la señalización molecular y la interacción con el microambiente. Esta interpretación contribuye a una comprensión más profunda de los mecanismos que sustentan la migración celular y la metástasis, destacando la relevancia de abordar el estudio del cáncer desde una perspectiva multidimensional.

Conclusiones

Se determinó que la dinámica del citoesqueleto constituye un factor estructural determinante en la migración celular, debido a que la reorganización de los filamentos de actina, las

adhesiones focales y las proteínas asociadas permiten a las células tumorales adquirir capacidad de desplazamiento e invasión en el proceso metastásico.

Se estableció que la migración celular en contextos de metástasis no responde a un mecanismo aislado, sino a la interacción integrada entre componentes citosqueléticos, señales moleculares y condiciones biomecánicas del microambiente, lo que evidencia un comportamiento adaptativo y multifactorial en la progresión tumoral.

Se comprobó que la transición epitelio mesénquima y la interacción célula matriz extracelular actúan como mecanismos clave que potencian la plasticidad celular, facilitando la invasión y la colonización de tejidos distantes, lo cual posiciona al citoesqueleto como un eje estratégico para el desarrollo de enfoques terapéuticos dirigidos a la inhibición de la metástasis.

Referencias bibliográficas

Ahmad, M., Weiswald, L.-B., Poulain, L., Denoyelle, C., & Meryet-Figuere, M. (2023). Involvement of lncRNAs in cancer cells migration, invasion and metastasis: cytoskeleton and ECM crosstalk. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, 42(1), 173. doi:10.1186/s13046-023-02741-x

Datta, A., Deng, S., Gopal, V., Yap, K. C. H., Halim, C. E., Lye, M. L., Ong, M. S., Tan, T. Z., & Sethi, G. (2021). Cytoskeletal dynamics in epithelial-mesenchymal transition: Insights into therapeutic targets for cancer metastasis. *Cancers*, 13(8), 1882. doi:10.3390/cancers13081882

de la Cruz Concepción, B., Bartolo-García, L. D., Tizapa-Méndez, M. D., Martínez-Vélez, M., Valerio-Diego, J. J., Illades-Aguiar, B., Salmerón-Bárceñas, E. G., Ortiz-Ortiz, J., Torres-Rojas, F. I., Mendoza-Catalán, M., et al. (2022). EMMPRIN is an emerging protein capable of regulating cancer hallmarks. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 26(18), 6700–6724. doi:10.26355/eurrev_202209_29771

Díaz-Valencia, J. D., Estrada-Abreo, L. A., & Chávez-Munguía, B. (2022). Class I myosins, molecular motors involved in cell migration and cancer. *Cell Adhesion & Migration*, 16(1), 1–12. doi:10.1080/19336918.2021.2020705

González, I., Luzuriaga, J., Valdivieso, A., Candil, M., Frutos, J., López, J., Hernández, L., Rodríguez-Lorenzo, L., Yagüe, V., Blanco, J. L., Pinto, A., & Earl, J. (2023). Low-intensity

continuous ultrasound to inhibit cancer cell migration. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 842965. doi:10.3389/fcell.2022.842965

Guerrero-Rodríguez, S. L., Mata-Cruz, C., Pérez-Tapia, S. M., & Velasco-Velázquez, M. A. (2022). Role of CD36 in cancer progression, stemness, and targeting. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 10, 1079076. doi:10.3389/fcell.2022.1079076

Herrera-Quiterio, G. A., & Encarnación-Guevara, S. E. (2023). The transmembrane proteins (TMEM) and their role in cell proliferation, migration, invasion, and epithelial-mesenchymal transition in cancer. *Frontiers in Oncology*, 13, 1244740. doi:10.3389/fonc.2023.1244740

Juste-Lanas, Y., Guerrero, P. E., Camacho-Gómez, D., Hervás-Raluy, S., García-Aznar, J. M., & Gómez-Benito, M. J. (2022). Confined cell migration and asymmetric hydraulic environments to evaluate the metastatic potential of cancer cells. *Journal of Biomechanical Engineering*, 144(7), 074502. doi:10.1115/1.4053143

Leggett, S. E., Hruska, A. M., Guo, M., & Wong, I. Y. (2021). The epithelial-mesenchymal transition and the cytoskeleton in bioengineered systems. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 78, 3907–3934. doi:10.1007/s00018-021-03713-2

Lobos-González, L., Oróstica, L., Díaz-Valdivia, N., Rojas-Celis, V., Campos, A., Duran-Jara, E., Farfán, N., Leyton, L., & Quest, A. F. G. (2023). Prostaglandin E2 exposure disrupts E-cadherin/Caveolin-1-mediated tumor suppression to favor Caveolin-1-enhanced migration, invasion, and metastasis in melanoma models. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23), 16947. doi:10.3390/ijms242316947

Matter, M. L., & Gkretsi, V. (2023). Editorial: Molecular regulation of tumor cells migration and metastatic growth. *Frontiers in Oncology*, 13, 1329053. doi:10.3389/fonc.2023.1329053

Matter, M. L., & Gkretsi, V. (2023). Molecular regulation of tumor cells migration and metastatic growth. *Frontiers in Oncology*, 13, 1329053. doi:10.3389/fonc.2023.1329053

Muñoz-Sáez, E., Moracho, N., Learte, A. I. R., Collignon, A., Arroyo, A. G., Noel, A., Sounni, N. E., & Sánchez-Camacho, C. (2023). Molecular mechanisms driven by MT4-MMP in cancer progression. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 9944. doi:10.3390/ijms24129944

Oregel-Cortez, M. I., Frayde-Gómez, H., Quintana-González, G., García-González, V., Vázquez-Jiménez, J. G., & Galindo-Hernández, O. (2023). Resistin induces migration and invasion in PC3 prostate cancer cells: Role of extracellular vesicles. *Life*, 13(12), 2321. doi:10.3390/life13122321

Ortiz-Soto, G., Babilonia-Díaz, N. S., Lacourt-Ventura, M. Y., Rivera-Rodríguez, D. M., Quiñones-Rodríguez, J. I., Colón-Vargas, M., Almodóvar-Rivera, I., Ferrer-Torres, L. E., Suárez-Arroyo, I. J., & Martínez-Montemayor, M. M. (2023). Metadherin regulates inflammatory breast cancer invasion and metastasis. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4694. doi:10.3390/ijms24054694

Pacheco-Velázquez, S. C., Ortega-Mejía, I. I., Vargas-Navarro, J. L., Padilla-Flores, J. A., Robledo-Cadena, D. X., Tapia-Martínez, G., Peñalosa-Castro, I., Aguilar-Ponce, J. L., Granados-Rivas, J. C., Moreno-Sánchez, R., & Rodríguez-Enríquez, S. (2022). 17- β estradiol up-regulates energy metabolic pathways, cellular proliferation and tumor invasiveness in ER+ breast cancer spheroids. *Frontiers in Oncology*, 12, 1018137. doi:10.3389/fonc.2022.1018137

Palafox-Mariscal, L. A., Ortiz-Lazareno, P. C., Jave-Suárez, L. F., Aguilar-Lemarroy, A., Villaseñor-García, M. M., Cruz-Lozano, J. R., González-Martínez, K. L., Méndez-Clemente, A. S., Bravo-Cuellar, A., & Hernández-Flores, G. (2023). Pentoxifylline inhibits TNF- α /TGF- β 1-induced epithelial-mesenchymal transition via suppressing the NF- κ B pathway and SERPINE1 expression in CaSki cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 10592. doi:10.3390/ijms241310592

Parlani, M., Sánchez-Magraner, L., & Martínez-Torres, C. (2023). Plasticity of cancer invasion and energy metabolism. *Trends in Cell Biology*, 33(2), 159–172. doi:10.1016/j.tcb.2022.10.005

Solís-Fernández, G., Montero-Calle, A., Martínez-Useros, J., de los Ríos, V., Sanz, R., Dziakova, J., Milagrosa, E., Fernández-Aceñero, M. J., Peláez-García, A., Casal, J. I., Hofkens, J., Rocha, S., & Barderas, R. (2022). Spatial proteomic analysis of isogenic metastatic colorectal cancer cells reveals key dysregulated proteins associated with lymph node, liver, and lung metastasis. *Cells*, 11(3), 447. doi:10.3390/cells11030447

Solís-Fernández, G., Montero-Calle, A., Sánchez-Martínez, M., Peláez-García, A., & Barderas, R. (2022). Aryl-hydrocarbon receptor-interacting protein regulates tumorigenic and metastatic properties of colorectal cancer cells driving liver metastasis. *British Journal of Cancer*, 126(11), 1604–1615. doi:10.1038/s41416-022-01762-1

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés