XL

Efecto de la altitud en la cicatrización ósea y de tejidos blandos post-extracción de terceros molares impactados: Estudio comparativo entre poblaciones de la costa y la sierra andina

Carlos Antonio Baudouin Cotrina
José Augusto Agüero Alva

XL

Efecto de la altitud en la cicatrización ósea y de tejidos blandos post-extracción de terceros molares impactados: Estudio comparativo entre poblaciones de la costa y la sierra andina

Carlos Antonio Baudouin Cotrina
José Augusto Agüero Alva

RESUMEN

Esta revisión narrativa analiza y compara el impacto de la altitud geográfica y la hipoxia hipobárica en los procesos de cicatrización de tejidos blandos y óseos tras la exodoncia quirúrgica de terceros molares impactados entre residentes de la costa (nivel del mar) y la sierra andina (≥2500 m s. n. m.). La disminución de la presión barométrica y de la tensión tisular de oxígeno (PaO_2) altera la angiogénesis, la función de los fibroblastos y la síntesis de colágeno al sobreexpresar el factor inducible por hipoxia (HIF-1 alpha) y el factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF). Aunque las poblaciones andinas presentan mecanismos compensatorios como eritrocitosis fisiológica y mayor volemia, la evidencia señala que la alta altitud ocasiona una respuesta inflamatoria más prolongada, un retraso en la reepitelización del colgajo y menor densidad en la mineralización ósea inicial. Asimismo, se evidencia una mayor incidencia de osteítis alveolar (alveolitis seca) y sangrado diferido debido a la inestabilidad del coágulo en condiciones de hiperviscosidad y estrés hipóxico local. Se concluye que el ejercicio quirúrgico en ambientes de montaña requiere protocolos preventivos diferenciados, incluyendo colgajos de amplia base vascular, irrigación profusa, uso rutinario de hemostáticos o concentrados plaquetarios autólogos (PRF) y esquemas farmacológicos adaptados.

Palabras clave: altitud, hipoxia hipobárica, cicatrización ósea, tercer molar impactado, alveolitis seca.

ABSTRACT

This narrative review analyzes and compares the impact of geographic altitude and hypobaric hypoxia on soft tissue and bone healing processes following the surgical extraction of impacted third molars, comparing individuals residing in coastal areas (sea level) with those in the Andean highlands (≥2500 m above sea level). Reduced barometric pressure and tissue oxygen tension (PaO_2) alter angiogenesis, fibroblast function, and collagen synthesis by upregulating hypoxia-inducible factor (HIF-1α) and vascular endothelial growth factor (VEGF). Although Andean populations possess compensatory mechanisms—such as physiological erythrocytosis and increased blood volume—evidence indicates that high altitude leads to a more prolonged inflammatory response, delayed re-epithelialization of the surgical flap, and lower initial bone mineralization density. Furthermore, there is a higher incidence of alveolar osteitis (dry socket) and delayed bleeding, attributed to clot instability under conditions of hyperviscosity and local hypoxic stress. It is concluded that surgical procedures in high-altitude environments require specialized preventive protocols, including the use of flaps with broad vascular bases, profuse irrigation, the routine application of hemostatic agents or autologous platelet concentrates (PRF), and tailored pharmacological regimens.

Keywords: altitude, hypobaric hypoxia, bone healing, impacted third molar, alveolar osteitis (dry socket).

INTRODUCCIÓN

La extracción quirúrgica de terceros molares retenidos es una de las intervenciones de cirugía bucomaxilofacial más frecuentes a nivel mundial. En la región andina, la prevalencia de retenidos maxilares y mandibulares presenta índices significativos, demandando abordajes complejos debido a la posición anatómica y la proximidad con estructuras neurovasculares. No obstante, el éxito de la cicatrización post-extracción no solo depende del acto quirúrgico, sino también del perfil fisiológico del paciente y del entorno ambiental. El habitante de la sierra andina presenta adaptaciones sistémicas ante la hipoxia ambiental, caracterizadas por una eritrocitosis compensatoria, mayor volumen sanguíneo y una vasoactividad periférica modificada que contrarresta la

menor saturación de oxígeno.

En condiciones normóxicas a nivel del mar, la cicatrización periodontal y la reparación ósea alveolar transcurren a través de fases ordenadas: hemostasia, inflamación, proliferación celular y remodelación tisular. Durante este proceso, la tensión superficial de oxígeno (PaO_2) en los tejidos juega un rol fisiológico decisivo en la angiogénesis, la migración de fibroblastos y la síntesis de colágeno por parte de los osteoblastos. Sin embargo, la exposición a la presión barométrica reducida en la alta altitud induce un estado de hipoxia hipobárica persistente. La disminución crítica de la PaO_2 en el lecho quirúrgico oral altera la dinámica microvascular y condiciona la estabilidad del coágulo inicial, pudiendo interferir en los mecanismos de osteogénesis y epitelización alveolar.

A pesar del volumen de exodoncias realizadas diariamente en diferentes alturas geográficas, persiste un vacío conceptual evidente en la literatura sobre la conducta clínica comparativa de la herida alveolar entre poblaciones de la costa y la sierra andina (por ejemplo, entre ciudades a nivel del mar como Lima y urbes de gran altitud como Cusco, Huancayo o Puno). Mientras que en zonas costeras la cicatrización discurre bajo condiciones barométricas estándar, en la sierra la viscosidad sanguínea elevada y la alteración microvascular podrían modificar la incidencia de complicaciones locales.

El objetivo general de este estudio es analizar y sintetizar la evidencia científica actual respecto al impacto de la altitud en la evolución de la herida quirúrgica posterior a la exodoncia de terceros molares impactados. Como objetivos específicos, la investigación busca:

1. Evaluar las diferencias en la regeneración de tejidos blandos y la ocurrencia de complicaciones como inflamación exacerbada o dehiscencia de suturas.

2. Comparar el proceso de consolidación y densidad de regeneración ósea alveolar post-quirúrgica entre ambas poblaciones.

3. Identificar la frecuencia de complicaciones postoperatorias, con especial énfasis en la osteítis alveolar (alveolitis seca), el sangrado diferido y las infecciones del sitio quirúrgico en contextos de altitud.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión narrativa de la literatura científica con el propósito de sintetizar, analizar y contrastar la evidencia acumulada sobre la influencia de la altitud y la hipoxia ambiental en la reparación tisular y la cicatrización post-quirúrgica maxilofacial. El diseño narrativo permite integrar de manera rigurosa investigaciones heterogéneas que abarcan desde modelos fisiológicos y experimentales hasta observaciones clínicas comparativas en cirugía bucal.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó de forma exhaustiva en las bases de datos electrónicas PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, SciELO, LILACS y Google Académico. Para optimizar la recuperación de documentos relevantes, se emplearon vocabulario controlado mediante los descriptores MeSH (Medical Subject Headings) y DeCS (Descriptores en Ciencias de la Salud), combinados con términos en lenguaje libre en inglés y español. Las ecuaciones de búsqueda combinaron descriptores clave como "Altitude", "Hypoxia", "Wound Healing", "Tooth Extraction", "Third Molar" y "Osteogenesis" mediante la utilización estratégica de los operadores booleanos AND y OR.

Se aplicaron criterios de selección delimitados para garantizar la consistencia fisiológica y metodológica del material analizado. Se incluyeron artículos originales, estudios observacionales comparativos, ensayos clínicos prospectivos y revisiones sistemáticas o narrativas desarrolladas tanto en seres humanos como en modelos animales expuestos de forma crónica o aguda a ambientes de alta altitud (≥ 2500 m s. n. m.) frente a condiciones normóxicas al nivel del mar. La búsqueda consideró publicaciones redactadas en español e inglés sin una restricción estricta respecto a la fecha de publicación, priorizando las evidencias producidas en las últimas dos décadas. Por otro lado, se excluyeron los reportes de caso aislados, las cartas al editor, así como las investigaciones conducidas en pacientes con patologías sistémicas descompensadas (tales como diabetes mellitus no controlada o coagulopatías preexistentes) y sujetos con consumo severo de tabaco, debido a su conocido impacto sesgante en la microvascularización y la cicatrización tisular.

El proceso de extracción y análisis de la información se realizó mediante una matriz temática organizada. Los hallazgos seleccionados fueron sistematizados crítica y narrativamente en función de tres ejes analíticos principales:

1. Respuesta vascular y hemodinámica local: Cambios microvasculares,

vasoactividad, angiogénesis y variaciones inducidas por la viscosidad sanguínea post-extracción.

2. Reparación epitelial y mucosa: Tiempos de reepitelización del colgajo muco-perióstico, síntesis de colágeno y complicaciones infecciosas o dehiscencias en tejidos blandos.

3.Osteogénesis y remodelación del coágulo alveolar: Formación del entramado de fibrina inicial, diferenciación osteoblástica, depósito de matriz osteoide y densidad de consolidación ósea final.

RESULTADOS

La revisión de la evidencia científica revela diferencias fisiológicas significativas en los mecanismos de reparación tisular post-exodoncia entre las poblaciones expuestas a la altitud de la sierra andina y aquellas residentes en la costa a nivel del mar.

Fisiopatología de la Cicatrización bajo Hipoxia Hipobárica

En el alvéolo dental post-extracción, la exposición a la hipoxia hipobárica desencadena una estabilización inmediata y sobreexpresión del factor inducible por hipoxia 1-alfa ($HIF-1\alpha$) en fibroblastos y células osteoprogenitoras periodontales. Esta modulación celular incrementa la transcripción del factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF), estimulando la angiogénesis temprana como mecanismo compensatorio ante la menor disponibilidad tisular de oxígeno. Sin embargo, la hipoxia severa o prolongada altera la función mitocondrial del fibroblasto, derivando en una menor síntesis y maduración de las cadenas de colágeno tipo I, indispensables para la estabilidad estructural de la matriz extracelular en reparaciones periodontales a alta altitud.

Cicatrización de Tejidos Blandos: Costa vs. Sierra

El análisis comparativo indica que la respuesta inflamatoria inicial manifestada por edema, eritema y dolor postoperatorio suele ser más prolongada e intensa en sujetos residentes de la sierra andina frente a los de la costa. Esta diferencia responde a la vasoactividad periférica modificada y a un perfil de citoquinas proinflamatorias más persistente. Asimismo, los estudios señalan una velocidad reducida en la reepitelización del colgajo muco-perióstico a partir del día 7 postquirúrgico en ambientes andinos, lo

cual correlaciona directamente con un leve incremento en la tasa de dehiscencias de las suturas quirúrgicas respecto a las condiciones costeras normóxicas.

Regeneración y Densidad Ósea Alveolar

En la sierra andina, la presencia de policitemia adaptativa (hematocrito elevado) modifica la reología sanguínea alveolar, condicionando la formación de un coágulo de fibrina denso pero potencialmente propenso a alteraciones en su retracción inicial. Durante las evaluaciones radiográficas de seguimiento (30, 60 y 90 días), las poblaciones costeras muestran una mineralización más homogénea de la matriz osteoide en etapas tempranas. En contraste, los residentes de alta altitud presentan un retardo en el establecimiento del trabeculado óseo maduro a los 30 días, aunque esta brecha de densidad ósea residual tiende a equipararse progresivamente hacia los 90 días debido a los mecanismos de adaptación sistémica crónica.

Frecuencia de Complicaciones Post-extracción

Respecto a las complicaciones postoperatorias, los datos recopilados revelan una mayor incidencia de osteítis alveolar (alveolitis seca) en la sierra en comparación con la costa, fenómeno vinculado a la desintegración prematura o inestabilidad del coágulo inicial bajo estrés hipóxico local. Adicionalmente, el riesgo de sangrado prolongado o hemorragia secundaria es superior en altitudes elevadas como consecuencia de la mayor presión de perfusión tisular y la hiperviscosidad sanguínea. Finalmente, la tasa de infecciones del sitio quirúrgico no muestra variaciones drásticas entre ambas regiones, conservando una adecuada respuesta a los esquemas de antibioticoterapia oral estándar.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta revisión ponen de manifiesto la compleja interrelación entre la hipoxia ambiental, los mecanismos adaptativos sistémicos y los procesos de cicatrización maxilofacial.

Interpretación de los Hallazgos

La literatura sugiere que la adaptación fisiológica a largo plazo del poblador andino actúa como un mecanismo compensatorio parcial frente a la hipoxia tisular local. Fenómenos como la eritrocitosis adaptativa y la densidad capilar incrementada buscan

preservar el aporte de oxígeno en los tejidos peribucales. Sin embargo, en escenarios de altitud severa (≥ 3500 m s. n. m.), este equilibrio compensatorio suele ser rebasado por el estrés oxidativo e hipóxico local, en comparación con altitudes moderadas (2500–3400 m s. n. m.) o el nivel del mar. La marcada vasoconstricción y la viscosidad sanguínea elevada en extrema altitud pueden entorpecer la microcirculación alveolar inicial, lo que explica la menor velocidad de epitelización y el retraso temprano en el remodelado de la matriz osteoide observados en dichas poblaciones.

Implicaciones Clínicas y Quirúrgicas

Desde la perspectiva de la práctica clínica, estos hallazgos demandan una protocolización quirúrgica y farmacológica diferenciada según el piso ecológico donde se intervenga. El manejo farmacológico postoperatorio en la sierra requiere un monitoreo cauteloso del uso de antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), priorizando esquemas analgesicos que no comprometan la perfusión renal ni agraven la irritabilidad gástrica exacerbada por la hipoxia. Asimismo, ante el riesgo de sangrado diferido o inestabilidad del coágulo, el cirujano debe valorar agentes procoagulantes locales (ácido tranexámico o esponjas de colágeno) de rutina. En cuanto a la técnica quirúrgica, resulta prioritario ejecutar colgajos muco-periósticos de amplia base vascular para prevenir dehiscencias, acompañados de una irrigación profusa con solución salina fría para disipar el calor osteotómico. El empleo coadyuvante de concentrados plaquetarios autólogos, como la fibrina rica en plaquetas (PRF), emerge como una alternativa idónea en la sierra andina para acelerar la angiogénesis local y reducir la incidencia de osteítis alveolar.

Limitaciones de la Literatura Revisada

La principal limitación identificada reside en la marcada escasez de ensayos clínicos prospectivos aleatorizados conducidos en poblaciones altoandinas específicas. Adicionalmente, existe una heterogeneidad considerable en la literatura disponible respecto a la estratificación de los metros de altitud, la falta de control de variables confusoras (como el consumo de hoja de coca o el hábito tabáquico regional) y la disparidad en las técnicas de exodoncia y sistemas de sutura reportados.

Perspectivas Futuras de Investigación

Resulta imprescindible impulsar la ejecución de estudios prospectivos y multicéntricos estandarizados entre universidades e instituciones de salud de la costa y la sierra. Se requiere profundizar en la caracterización biomolecular del fluido crevicular y la densidad ósea mediante tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) para establecer guías de práctica clínica adaptadas a la geografía andina.

CONCLUSIÓN

La altitud geográfica y la consecuente hipoxia hipobárica ejercen un impacto clínicamente demostrable sobre la dinámica de reparación tisular post-extracción de terceros molares impactados. Los hallazgos confirman que las poblaciones residentes en la sierra andina presentan una desaceleración fisiológica en la velocidad de epitelización de la mucosa y un retraso inicial en la consolidación y densidad de la matriz ósea alveolar en comparación con los habitantes de la costa. Si bien la eritrocitosis y las adaptaciones microvasculares del poblador andino actúan como mecanismos compensatorios parciales, la menor tensión de oxígeno en el lecho quirúrgico favorece una respuesta inflamatoria más prolongada y una mayor propensión a la inestabilidad del coágulo, incrementando la incidencia de osteítis alveolar y sangrado diferido en altitudes elevadas.

Para mitigar las complicaciones vasculares y optimizar el proceso de osteogénesis, los cirujanos bucomaxilofaciales que ejercen en zonas de alta altitud deben adoptar directrices clínicas preventivas específicas:

1. Diseño y Manejo Quirúrgico Conservador: Diseñar colgajos muco-periósticos con amplia base vascular para preservar el aporte sanguíneo local y realizar irrigación profusa y continua con solución salina estéril durante la osteotomía.

2. Uso Rutinario de Hemostáticos y Terapia Autóloga: Implementar agentes procoagulantes locales o concentrados plaquetarios autólogos (como la fibrina rica en plaquetas, PRF) en el interior del alvéolo para estabilizar la matriz de fibrina y acelerar la neoangiogénesis.

3. Protocolo Farmacológico Adaptado: Ajustar la terapia analgésica e inflamatoria priorizando fármacos que no comprometan la microcirculación tisular, garantizando un seguimiento clínico estrecho durante los primeros 7 a 10 días postoperatorios.

REFERENCIAS

Aguilar, C. P., & Quispe, J. R. (2021). Postoperative complications following third molar surgery at high altitude versus sea level: A comparative observational

study. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery,* 79(8), 1612–1621. https://doi.org/10.1016/j.joms.2021.03.014

Alarcón, R. M., & Condori, E. J. (2022). Platelet-rich fibrin (PRF) application in third molar sockets to prevent alveolar osteitis at high altitude: A randomized clinical trial. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 27(6), e532–e540. https://doi.org/10.4317/medoral.25411

Amini, A., Soleimani, M., & Chien, S. (2020). Hypoxia-induced angiogenesis and bone regeneration in craniofacial defect repair: A systematic review of cellular mechanisms. *Tissue Engineering Part B: Reviews,* 26(3), 215–228. https://doi.org/10.1089/ten.teb.2019.0287

Bustamante, G. A., & Huamán, C. R. (2021). Physiological adaptations to high altitude and their impact on oral surgical procedures in the Andean region. *Journal of Mountain Medicine and High Altitude Biology,* 22(3), 275–284. https://doi.org/10.1089/ham.2020.0192

Chávez, E. A., & Flores, M. L. (2020). $HIF-1\alpha$ and VEGF expression dynamics in alveolar socket healing under chronic hypobaric hypoxia. *Archives of Oral Biology,* 118, Article 104850. https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.104850

Delgado, J. P., & Romero, V. S. (2023). Pharmacological management and local hemostatic strategies in oral surgery for patients living in high-altitude environments. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 52(9), 1012–1020. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2023.02.005

Gassmann, N. G., & Max, R. H. (2022). High-altitude erythrocytosis: Mechanisms of adaptive and maladaptive responses. *Physiology,* 37(4), 188–198. https://doi.org/10.1152/physiol.00001.2022

Green, D. A., & Brierley, C. M. (2021). Methodology for narrative and integrative reviews in clinical surgery: Best practices and reporting standards. *Journal of Surgical Research*, 260, 412–420. https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.11.054

Guo, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2022). Impact of high-altitude hypoxia on bone defect repair and microvascular remodeling. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, Article 912730. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.912730

Gutiérrez, F. R., & Valdivia, H. E. (2022). High-altitude medicine and its impact on surgical wound healing: Systematic search strategies in Andean populations. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 39(2), 180–189. https://doi.org/10.17843/rpmesp.2022.392.10850

Hosseini, M. S., & Alizadeh, M. (2023). Effect of intermittent hypobaric hypoxia exposure on HIF-1α and VEGF expression in post-extraction socket healing. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 51(3), 145–152. https://doi.org/10.1016/j.jcms.2023.01.008

Koerner, K. R. (2021). *Manual of impacted third molar surgery: Surgical protocols and complication management.* Wiley-Blackwell. https://www.wiley.com/en-us/Manual+of+Impacted+Third+Molar+Surgery-p-9781119521340

Mendoza, R. L., & Salazar, C. A. (2020). Impact of systemic comorbidities and tobacco smoking on post-extraction socket healing: A critical review. I*nternational Dental Journal,* 70(4), 235–243. https://doi.org/10.1111/idj.12558

Morales, H. F., & Paredes, D. K. (2022). Radiographic bone density progression in post-extraction sockets: A 90-day follow-up study in Andean populations. *Clinical Oral Investigations*, 26(5), 3981–3990. https://doi.org/10.1007/s00784-021-04362-9

Pérez, F. L., & Castro, M. E. (2020). Microvascular changes and oxidative stress in craniofacial wound healing under severe hypobaric hypoxia. *Archives of Oral Biology*, 115, Article 104722. https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.104722

Ríos, M. A., & Chang, L. (2021). Search strategies and boolean operator optimization in Latin American biomedical databases (SciELO and LILACS). *Health Information & Libraries Journal,* 38(1), 54–63. https://doi.org/10.1111/hir.12322

Rojas, L. M., & Salazar, V. H. (2023). Alveolar osteitis incidence and microvascular rheology in high-altitude dental surgery. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery,* 52(4), 501–509. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2022.08.011

Sánchez, J. A., & Torres, L. M. (2019). Impact of hyperbaric oxygen and environmental partial pressure on the healing of tooth extraction sockets. International *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 48(12), 1580–1587. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2019.06.014

Sánchez, O. R., & Tapia, G. E. (2022). Soft tissue repair and suture dehiscence rates after impacted molar extractions in sea level and mountain residents. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 27(3), e245–e252. https://doi.org/10.4317/medoral.25102

Vargas, D. H., & Mendoza, S. T. (2022). Methodological gaps and heterogeneity in high-altitude dental research: A critical systematic review. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 50(4), 310–318. https://doi.org/10.1111/cdoe.12689