

Neurotizaciones para la flexión del codo en lesiones traumáticas del plexo braquial

Ricardo M. Gardenal,^{1*} Manuel Vélez,^{2#} Ernesto Glasberg,³ Matías Seri,⁴ Sebastián Faccendini,⁵ Miguel Slullitel,⁶ Jorge Bichara,^{7*} Miguel Capomassi⁸

¹Departamento de Cirugía del Miembro Superior, Instituto Dr. Jaime Slullitel, Rosario, Santa Fe, Argentina

²Servicio de Ortopedia y Traumatología, Sanatorio Plaza, Rosario, Santa Fe, Argentina

³Servicio de Ortopedia y Traumatología, Hospital de Emergencias "Dr. Clemente Álvarez", Rosario, Santa Fe, Argentina

RESUMEN

Objetivo: Evaluar los resultados de diferentes neurotizaciones utilizadas para la flexión del codo en pacientes con lesión traumática del plexo braquial. **Materiales y Métodos:** Entre abril de 2012 y enero de 2019, se operaron 13 pacientes (12 hombres) con lesión traumática del plexo braquial, 5 con parálisis totales sin recuperación, 4 con parálisis totales que recuperaron el tronco inferior parcialmente y 4 con parálisis altas. Las neurotizaciones para la flexión del codo fueron: 3 nervios intercostales con injerto sural a nervio musculocutáneo o su(s) rama(s) motora(s) (4 pacientes), 3 nervios intercostales a nervio musculocutáneo sin injerto (3 pacientes), nervio espinal accesorio a ramas motoras del nervio musculocutáneo con injerto sural (2 pacientes), fascículos del nervio cubital a rama motora del bíceps (3 pacientes) y fascículos del nervio cubital y fascículos del nervio mediano a ramas motoras del bíceps y braquial anterior (3 pacientes). Se evaluaron la fuerza de flexión del codo (M0-M5), el dolor con la escala analógica visual y se utilizó el puntaje DASH. El seguimiento promedio fue de 50 meses. **Resultados:** La fuerza de flexión del codo fue M5 (1 paciente), M4 (7 pacientes), M3 (1 paciente), M2 (1 paciente) y M1 (2 pacientes). El puntaje DASH promedio fue de 54,1 antes de la cirugía y 29,5 en el posoperatorio. El puntaje de dolor preoperatorio fue de 7 y de 0,9 posoperatorio. No hubo complicaciones. **Conclusiones:** Las neurotizaciones lograron resultados satisfactorios en la reconstrucción de la flexión activa del codo en pacientes con lesión del plexo braquial.

Palabras clave: Neurotizaciones; flexión; codo; lesión del plexo braquial.

Nivel de Evidencia: IV Serie de casos

Nerve Transfers for Elbow Flexion in Traumatic Brachial Plexus Injuries

ABSTRACT

Objective: To evaluate the results of different nerve transfers used for elbow flexion in patients with traumatic brachial plexus injury. **Materials and Methods:** Between April 2012 and January 2019, 13 patients (12 men) with traumatic brachial plexus injury underwent surgery. 5 patients had total paralysis and did not recover, 4 had total paralysis and partially recovered the lower trunk, and 4 had high paralysis. The nerve transfers performed for elbow flexion were: 3 intercostal nerves with a sural graft to the musculocutaneous nerve or its motor branch(es) (4 patients), 3 intercostal nerves to the musculocutaneous nerve without graft (3 patients), the accessory spinal nerve to motor branches of the musculocutaneous nerve with sural graft (2 patients), fascicles of the ulnar nerve to the motor branch of the biceps (3 patients) and fascicles of the ulnar nerve and fascicles of the median nerve to the motor branches of the biceps and anterior brachialis (3 patients). We assessed elbow flexion strength (M0-M5), pain on the visual analog scale, and DASH score. The average follow-up was 50 months. **Results:** Elbow flexion strength was M5 (1 patient), M4 (7 patients), M3 (1 patient), M2 (1 patient), and M1 (2 patients). The mean DASH score was 54.1 before surgery and 29.5 postoperatively. The preoperative pain score was 7 and 0.9 postoperatively. There were no complications. **Conclusions:** Nerve transfers achieved satisfactory outcomes for active elbow flexion reconstruction in patients with brachial plexus injury.

Key words: Nerve transfers; elbow flexion; brachial plexus injury.

Level of Evidence: IV Case report

Recibido el 25-1-2022. Aceptado luego de la evaluación el 28-6-2022 • Dr. RICARDO M. GARDENAL • drmartingardenal@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0013-9275>

Cómo citar este artículo: Gardenal RM, Vélez M, Glasberg E, Seri M, Faccendini S, Slullitel M, Bichara J, Capomassi M. Neurotizaciones para la flexión del codo en lesiones traumáticas del plexo braquial. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol* 2022;87(4):507-516. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2022.87.4.1503>

INTRODUCCIÓN

Las lesiones traumáticas del plexo braquial son infrecuentes, pero severamente incapacitantes. En los adultos, la recuperación de la parálisis de flexión del codo es el primer objetivo del tratamiento, seguido de la recuperación funcional del hombro.¹⁻⁴

Se dispone de múltiples métodos de reconstrucción, tanto microquirúrgicos para una etapa temprana, como transferencias tendinosas, transferencias de músculos libres vascularizados y reinervados, artrodesis, osteotomías, tenodesis y artrólisis, entre otros, para los cuales no existe un límite de tiempo transcurrido desde la lesión. Las técnicas microquirúrgicas incluyen neurólisis, neurorrafia con injerto o sin él y neurotización o transferencia nerviosa. En las neurotizaciones, se secciona un nervio dador redundante o “sacrificable” y su cabo proximal se transfiere al cabo distal de un nervio lesionado, lo más cercano posible al músculo por inervar (Figura 1). Se trata de una transferencia nerviosa de un nervio funcionante a un nervio desnervado más importante, siempre y cuando el tiempo desde la lesión no supere los 12-16 meses, pues se sabe que los mejores resultados se obtienen con procedimientos realizados dentro de los primeros cinco meses.⁵ Esto último se debe a que un músculo que no recibe su estímulo nervioso, con el tiempo sufre la degeneración y atrofia de sus placas neuromusculares, lo que impide su reinervación posterior.

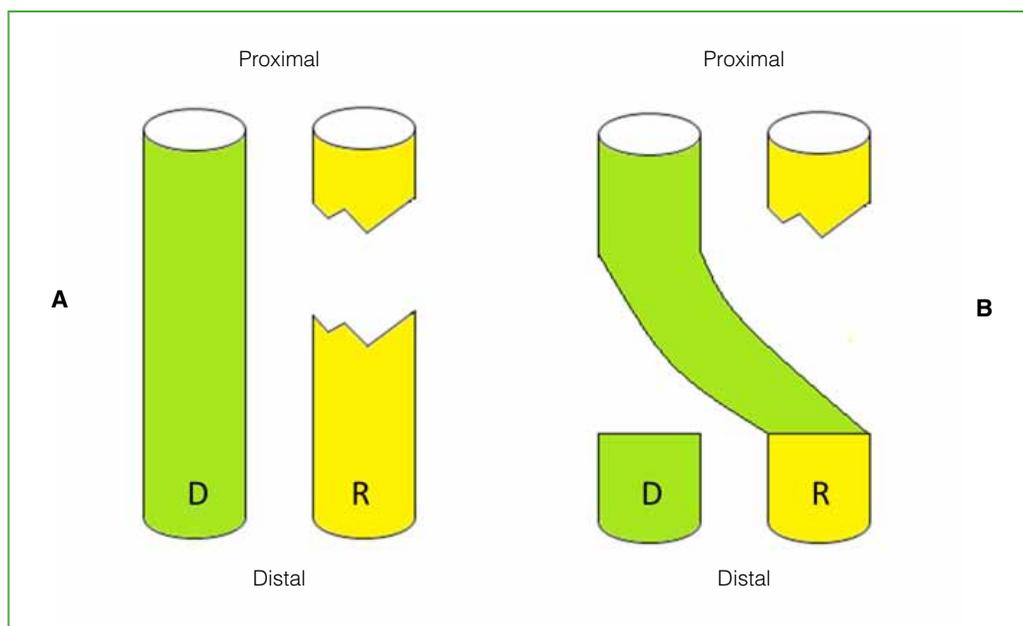


Figura 1. Esquema de una neurotización. **A.** Axonotmesis traumática de nervio receptor (R). **B.** Neurotización con nervio dador (D).

Existen múltiples neurotizaciones posibles tanto para hombro, codo o mano en el contexto de una lesión del plexo braquial. Se pueden categorizar en extraplexuales o intraplexuales, según el nervio dador.

Las extraplexuales comprenden la transferencia de un nervio ajeno al plexo braquial y los más usados son los nervios intercostales, espinal accesorio y frénico. Las intraplexuales son transferencias de un componente nervioso funcionante perteneciente al plexo braquial. Muy usada en la actualidad es la transferencia de fascículos de nervio cubital o mediano para ramas motoras del musculocutáneo para bíceps y braquial anterior en lesiones altas del plexo. Otro nervio dador utilizado es la rama del radial para la porción medial del tríceps para nervio axilar.

El objetivo de este estudio fue evaluar los resultados de diferentes neurotizaciones utilizadas para recuperar la flexión activa del codo en pacientes tratados por lesión traumática del plexo braquial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre abril de 2012 y enero de 2019, 13 pacientes con lesión traumática del plexo braquial se sometieron a una neurotización para la flexión del codo, realizada por el mismo cirujano, en tres Centros. Los pacientes eran 12 hombres y una niña de 10 años, y la edad promedio al operarse era 26 años (rango 10-44). El miembro afectado era el izquierdo en ocho casos y el derecho, en cinco pacientes (miembro dominante en el 38,4%). Se operaron cinco parálisis braquiales totales sin recuperación, cuatro parálisis totales que recuperaron el tronco inferior parcialmente y cuatro parálisis altas, dos de ellas con recuperación parcial del hombro. El mecanismo del trauma fue un accidente de tránsito en 12 pacientes: motocicleta (10 pacientes), bicicleta (1 paciente) y automóvil al salir despedido por la ventanilla (1 paciente). Un paciente había sufrido un trauma directo al caer sobre el hombro en un tronco de eucalipto. El tiempo promedio transcurrido entre el traumatismo y la cirugía era de 8.7 meses (rango 4-13). En 11 pacientes (85%), se diagnosticaron patologías traumáticas asociadas de jerarquía (Tabla 1).

Tabla 1. Serie de casos

Caso	Edad	Sexo	Dominancia	Miembro	Tipo de parálisis	Lesiones asociadas
1	25	M	Diestro	Izquierdo	Total con recuperación parcial de la flexión de dedos	Fracturas de costillas y clavícula homolaterales
2	21	M	Diestro	Izquierdo	Alta	TCE con pérdida de conocimiento
3	23	M	Diestro	Izquierdo	Total	Seudoartrosis de clavícula y antebrazo (cúbito y radio), <i>steppage</i> de pierna homolaterales
4	28	M	Diestro	Izquierdo	Total	Amputación del pie homolateral
5	19	M	Diestro	Izquierdo	Total	Fractura expuesta de húmero homolateral
6	23	M	Diestro	Izquierdo	Total	TCE con pérdida de conocimiento, convulsiones, secuela cognitiva leve
7	33	M	Diestro	Derecho	Total con recuperación completa de la flexión de muñeca y dedos	No
8	38	M	Diestro	Derecho	Total con recuperación parcial de los nervios cubital, mediano y radial	Fracturas de húmero y escápula, luxación metacarpofalángica 3, 4 y 5, fractura del 3 ^{er} metacarpiano homolaterales
9	21	M	Diestro	Derecho	Total	TCE con pérdida de conocimiento, fractura de la 1 ^{ra} costilla homolateral
10	44	M	Diestro	Izquierdo	Alta	No
11	28	M	Diestro	Izquierdo	Total con recuperación del nervio cubital	Fracturas de 4 costillas, escápula, luxofractura expuesta de codo homolaterales, parálisis del plexo braquial contralateral con recuperación espontánea en 3 meses
12	10	F	Diestra	Derecho	Total con recuperación parcial, abducción del hombro	Fractura supracondílea de codo homolateral
13	26	M	Diestro	Derecho	Alta con recuperación parcial, abducción del hombro	TCE con pérdida de conocimiento, fractura de huesos propios de nariz y de antebrazo homolateral

M = masculino, F = femenino, TCE = traumatismo craneoencefálico.

Las neurotizaciones empleadas para la reconstrucción microquirúrgica de la flexión del codo fueron: tres nervios intercostales con injerto sural a nervio musculocutáneo o su(s) rama(s) motora(s) para cada caso (4 pacientes), tres nervios intercostales a nervio musculocutáneo sin interposición de injerto (1 paciente), nervio espinal accesorio a ramas motoras del nervio musculocutáneo con injerto sural (2 pacientes), fascículos motores del nervio cubital a rama motora del bíceps (Oberlin simple) (3 pacientes) y fascículos motores del nervio cubital y fascículos motores del nervio mediano a ramas motoras del bíceps y braquial anterior (Oberlin doble) (3 pacientes). En el caso del nervio cubital, se utilizan fascículos para el músculo cubital anterior y, en el mediano, para el palmar mayor. Durante la cirugía, se electroestimulan los fascículos y se define cuáles inervan predominantemente estos músculos. Las técnicas de reconstrucción empleadas se eligieron individualmente, teniendo en cuenta las diferentes lesiones de los pacientes, con distintos nervios dadores disponibles y contemplando, además, sus cuadros asociados. A modo de ejemplo, se muestran tres casos, con técnicas quirúrgicas diferentes (Figuras 2-4).

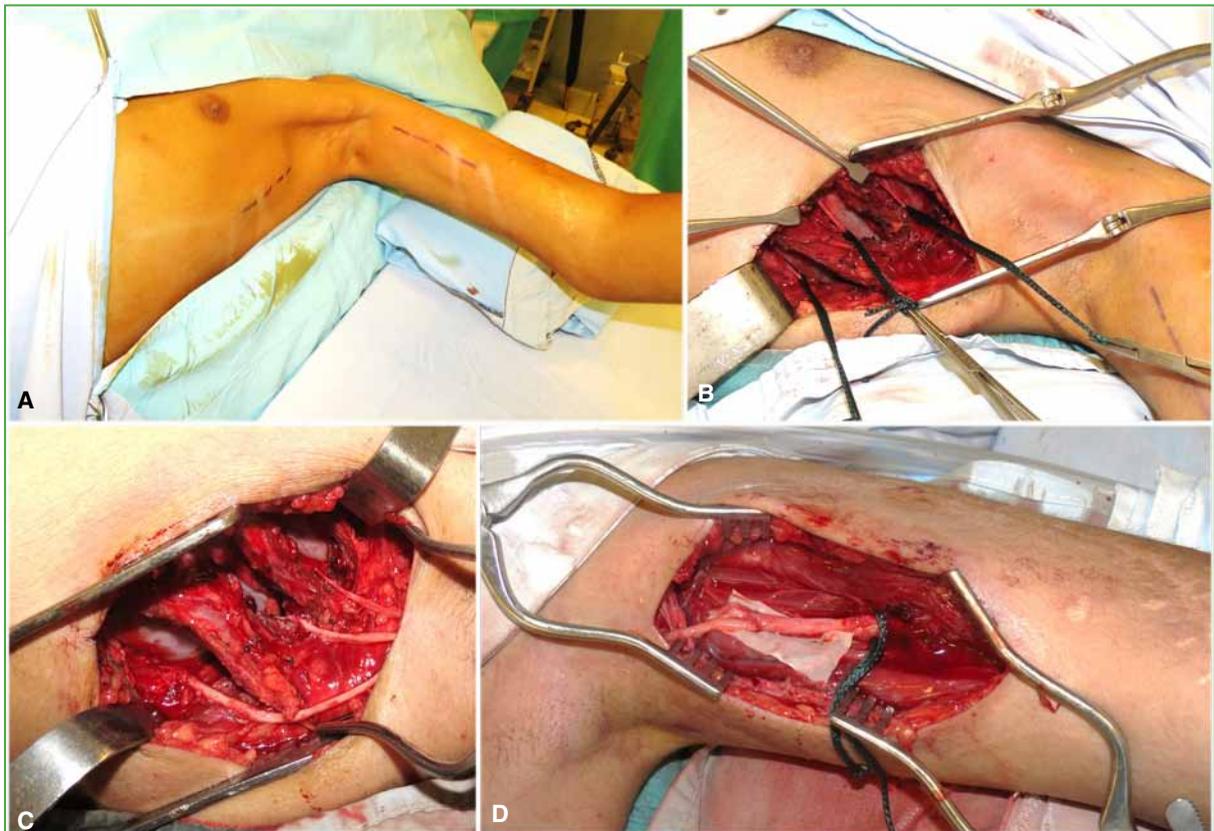


Figura 2. Neurotización de la rama motora del bíceps con tres nervios intercostales con injerto sural (Caso 5).

A. Marcaciones prequirúrgicas y campos. **B.** Disección de tres nervios intercostales en el tórax. **C.** Neurorrafias intercostal-sural x tres. **D.** Neurorrafia de injertos surales a rama motora del bíceps en la cara interna del brazo.

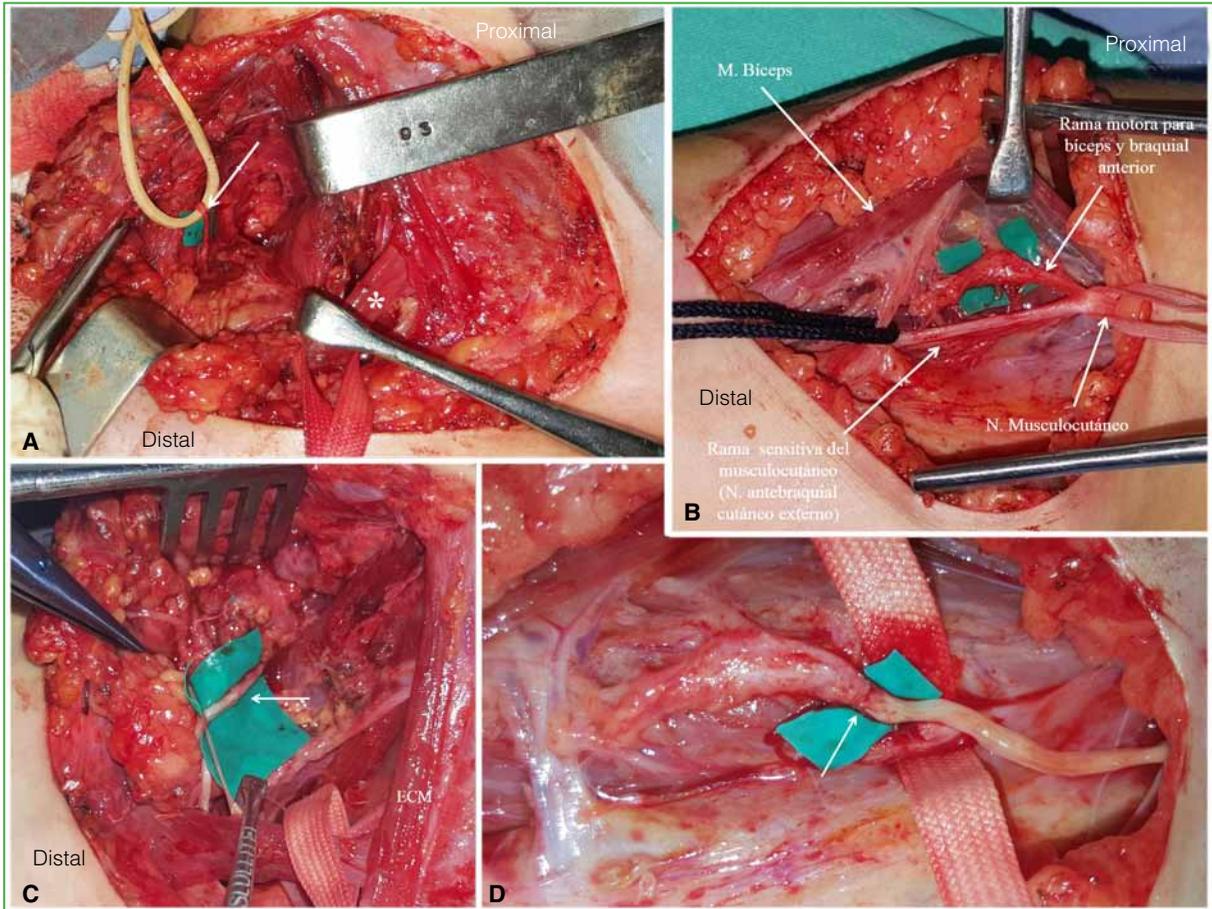


Figura 3. Neurotización de las ramas motoras del nervio musculocutáneo con el nervio espinal accesorio con injerto sural largo (Caso 12). **A.** Abordaje supraclavicular y disección del nervio espinal accesorio (flecha). **B.** Disección en la cara interna del brazo de las ramas motoras del nervio musculocutáneo. **C.** Neurorrafia del nervio espinal accesorio-sural (flecha) en el hueco supraclavicular. **D.** Neurorrafia de injerto sural a la rama motora del bíceps y braquial anterior (flecha) en la cara interna del brazo. *músculo omohioideo. ECM = músculo esternocleidomastoideo.

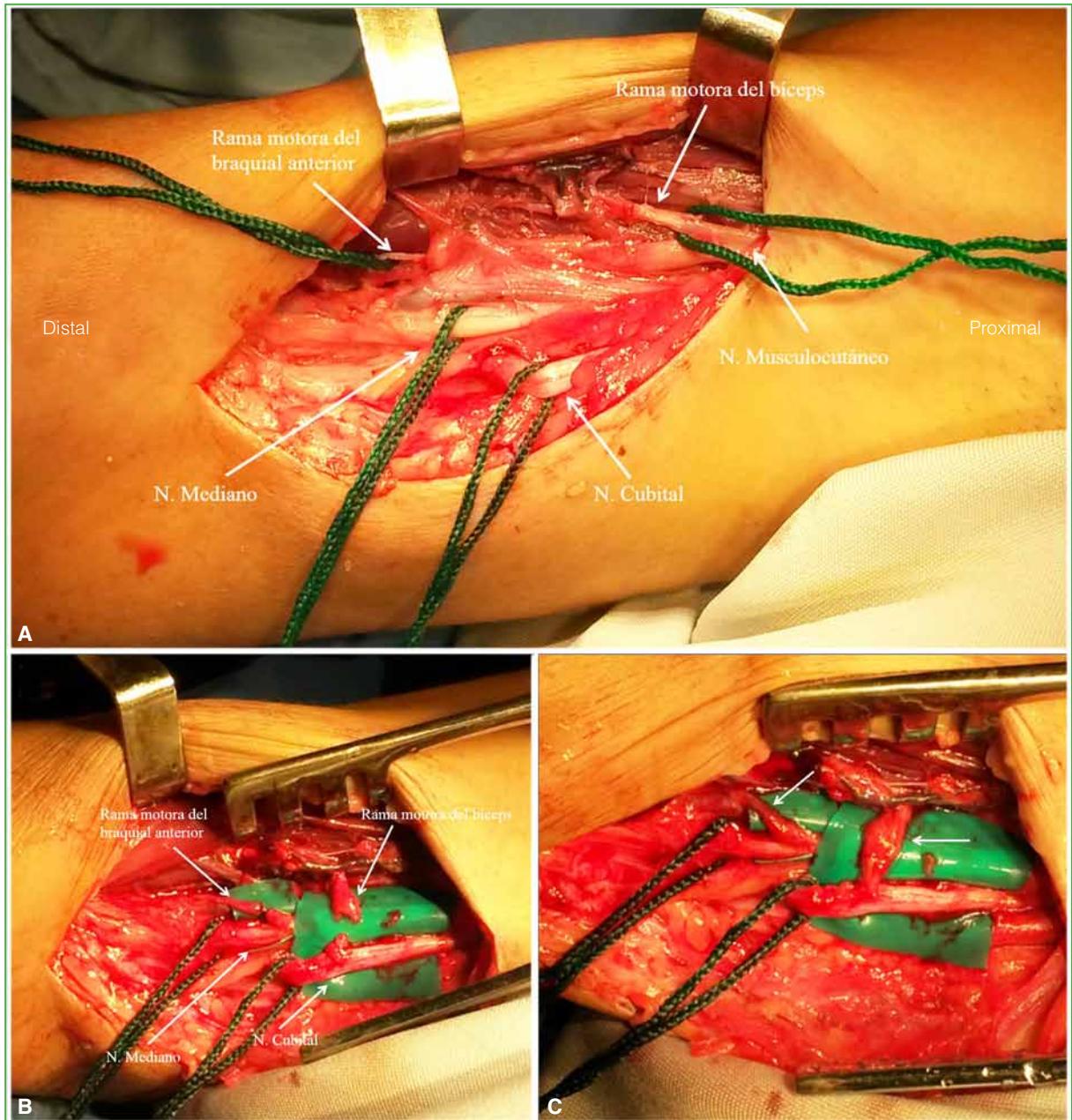


Figura 4. Neurtización de las ramas motoras del bíceps y braquial anterior con fascículos motores de los nervios cubital y mediano (Caso 7). **A.** Abordaje en la cara interna del brazo. **B.** Disección de fascículos motores de los nervios cubital y mediano, y sección de las ramas motoras del bíceps y braquial anterior. **C.** Neurtizaciones realizadas (flechas).

Si bien no es motivo de este estudio, se aclara que, para el hombro, se realizó una neurólisis supraclavicular del plexo braquial y una neurtización del supraescapular con nervio espinal accesorio en siete pacientes.

Los pacientes siguieron protocolos de rehabilitación con fisiokinesioterapia o terapia ocupacional de acuerdo con su cuadro y la técnica quirúrgica empleada. En las primeras cuatro semanas, se evitaron las movilizaciones que pusieran en riesgo las suturas nerviosas, pero sí se movilizaron las articulaciones restantes y se administró tratamiento para el dolor, el edema y las cicatrices. Luego del primer mes, se autorizó la movilidad pasiva plena y se inició el fortalecimiento del grupo muscular correspondiente al nervio o a los nervios transferidos, por ejemplo,

abdominales y ejercicios inspiratorios para fortalecer los músculos intercostales. Al observar el primer signo de reinervación de flexores del codo, comienza la fase de reeducación muscular. Se asocia ese fortalecimiento muscular mencionado a la flexión activa asistida del codo, teniendo en cuenta que la contracción del músculo reinervado se inicia con la contracción del músculo correspondiente al nervio dador. En el caso de una neurotización utilizando fascículos motores de nervio cubital para bíceps, la contracción de este músculo se activará con la flexión de la muñeca en desvío cubital. Con el correr de los meses se aumentan las cargas y las repeticiones de los ejercicios y la neuroplasticidad cortical de los pacientes logrará independizar la flexión del codo de la contracción del músculo correspondiente al nervio dador. Es decir, en el ejemplo anterior, el paciente podrá flexionar el codo activamente sin necesidad de flexionar su muñeca.

Todos los pacientes fueron sometidos a una evaluación subjetiva con el puntaje DASH (*Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand*)⁶ y la escala analógica visual (EAV) para dolor antes de la cirugía y en el último control. Se evaluó la fuerza de flexión del codo con la escala británica *Medical Research Council* M0-M5.⁷ Se excluyó del estudio el caso 10, porque el seguimiento fue inferior a un año, a causa de la pérdida de contacto por vivir en otra provincia y carecer de conectividad. El seguimiento promedio de los restantes casos fue de 50 meses.

RESULTADOS

En la última evaluación, la fuerza de flexión del codo mostró que la niña de 10 años obtuvo un valor M5; siete pacientes tuvieron un valor M4; uno, M3; uno, M2 y dos, M1. Consideramos valores satisfactorios aquellos \geq M3, es decir que logran flexionar el codo en contra de la fuerza de gravedad, tal como se ha establecido internacionalmente,⁸ nueve pacientes (75%) obtuvieron este resultado. El puntaje DASH promedio fue de 54,1 en el preoperatorio y de 29,5 en el posoperatorio más alejado. El puntaje de la EAV era de 7 antes de la intervención y de 0,9 en el último control. El método de reconstrucción utilizado y su evaluación funcional individual se muestran en la [Tabla 2](#).

La única complicación ocurrió en el paciente con neurotización de nervio musculocutáneo con intercostales sin injertos, que sufrió la dehiscencia de la herida en la axila y fue tratada adecuadamente con pomada Irujol®.

No se produjeron lesiones pleurales en la toma de injertos intercostales ni dolor neural o complicaciones motoras o sensitivas relacionados con los territorios de nervios dadores.

DISCUSIÓN

Tradicionalmente, en la reconstrucción del plexo braquial, la reparación nerviosa directa con injertos nerviosos o sin ellos llevó a resultados pobres debido a las largas distancias que debe recorrer la regeneración axonal una vez realizada la neurografía, lo que implica un tiempo superior al que permanecen con potencial de reinervación las placas motoras musculares, que se estima en 12-18 meses.⁹ En estas circunstancias, las neurotizaciones permiten disminuir la distancia de regeneración entre los axones motores viables proximales y las placas motoras distales, y así conseguir una reinervación más rápida y, en la mayoría de los casos, mejores resultados funcionales.

Además, es muy común que las lesiones del plexo braquial sean irreparables de forma directa, desde el punto de vista técnico. Tal es el caso de las avulsiones radiculares en las que no existe un cabo nervioso proximal factible de suturar.

Otro escenario posible son los pacientes que no pudieron someterse a la neurografía directa dentro del tiempo indicado, por demoras en la consulta especializada u otras lesiones sufridas, y la recuperación funcional ya no será posible. En nuestro medio, es habitual que los pacientes consulten con demora para la resolución de su parálisis, ya han sido evaluados en uno o varios Centros que no cuentan con la posibilidad técnica del tratamiento microquirúrgico y la derivación, muchas veces, es tardía. En la serie de casos presentada, el 54% (7 pacientes) fue operado tras 10 o más meses de evolución.

Tampoco tendrá éxito una reparación directa en sitios adversos para la regeneración nerviosa, como los sectores con pérdida de cobertura cutánea, infecciones o lesiones vasculares.

Existe otra ventaja de las neurotizaciones. Cuando el objetivo es recuperar una función motora, al neurotizarse axones motores puros a un nervio motor es más probable que se obtenga la función deseada que con la coaptación de un nervio mixto (motor-sensitivo) al cabo distal mixto. Además, en las neurotizaciones, es menos frecuente que se necesite un injerto nervioso que con las tradicionales neurografías.

En resumen, la indicación básica para las transferencias nerviosas son las lesiones en las cuales la reparación directa no es posible o aquellas en las que sí lo es, pero la recuperación funcional con reparación directa o injerto nervioso será improbable.⁹

Tabla 2. Técnica utilizada y resultados

Caso	Reconstrucción del codo	Tiempo traumacirugía (meses)	Fuerza de flexión del codo	DASH preoperatorio	DASH final	EAV preoperatoria	EAV final	Seguimiento (meses)
1	3 intercostales con injerto sural	10	4	52,5	28,3	4	1	111
2	Fascículos del cubital a rama del bíceps	11	4	40,8	15	6	0	103
3	3 intercostales sin injerto a musculocutáneo	11	1	57,8	30,8	7	0	19
4	3 intercostales con injerto sural	10	4	53,3	32,5	10	2	25
5	3 intercostales con injerto sural	13	4	52,4	29,1	9	0	93
6	Espinal accesorio con injerto sural	13	3	46,7	23,8	2	0	36
7	Fascículos del cubital a rama del bíceps y del mediano a rama braquial anterior	6	4	71,7	36,7	9	0	17
8	Fascículos del cubital a rama del bíceps y del mediano a rama braquial anterior	6	1	63,9	43,3	8	4	58
9	3 intercostales con injertos de nervio sural	4	2	61,7	32,3	10	2	40
10	Fascículos del cubital a rama del bíceps	6	No	No	No	No	No	Insuficiente
11	Fascículos del cubital a rama del bíceps	10	4	55,7	29,1	6	0	47
12	Espinal accesorio con injerto sural	6	5	38,6	26,8	9	0	28
13	Fascículos del mediano a rama del bíceps y del cubital a rama del braquial anterior	8	4	55	27,2	5	2	27

DASH = *Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand*, EAV = escala analógica visual.

Los resultados obtenidos en nuestra serie para lograr la flexión del codo con neurotizaciones fueron adecuados y, dentro de lo esperable, según la bibliografía. En el metanálisis de Merrell y cols.,⁸ se observó un 71% de fuerza M3 o más con neurotizaciones para la flexión del codo, independientemente del nervio dador, los dos más usados fueron los nervios intercostales y el espinal accesorio. Se pueden esperar mejores resultados con la neurotización intraplexual con fascículos motores del nervio cubital (Oberlin), con la que se alcanza un 97% de fuerza M3 o más.^{10,11} El tiempo de recuperación funcional del bíceps es más corto que con cualquier otra neurotización. Esta es su mayor ventaja. Se debe a que la transferencia se realiza muy cerca del músculo por reinervar y sin interposición de injerto. Por lo tanto, el procedimiento es especialmente útil para tratar pacientes que, por algún motivo, llevan más de seis meses desde la lesión.

En 2002, Humphreys y Mackinnon¹² describieron una técnica de doble transferencia fascicular para la flexión del codo. Se trata de la neurotización de las ramas motoras del bíceps y del braquial anterior con fascículos redundantes de los nervios cubital y mediano, sin necesidad de interponer injerto nervioso. De esta forma, el braquial anterior se suma a la fuerza de flexión aportada por el bíceps. En relación con los resultados, hay autores¹³⁻¹⁵ que ratifican la superioridad de la doble neurotización comparada con la neurotización solamente de la rama motora del bíceps; sin embargo, otros no encuentran diferencias funcionales entre las dos técnicas.^{16,17}

Las limitaciones de este estudio son su diseño retrospectivo, con un modesto número de pacientes, dado que se está evaluando una patología poco frecuente. Por tal motivo, no es posible realizar un análisis estadístico con el poder suficiente para establecer pautas de tratamiento definitivas.

CONCLUSIÓN

En nuestra serie, las neurotizaciones o transferencias nerviosas fueron opciones válidas y confiables en la reconstrucción de la flexión activa del codo en pacientes con lesión traumática del plexo braquial, con una tasa baja de complicaciones.

Conflicto de intereses: Los autores no declaran conflictos de intereses.

ORCID de M. Vélez: <https://orcid.org/0000-0003-4094-0876>
 ORCID de E. Glasberg: <https://orcid.org/0000-0002-2447-8573>
 ORCID de M. Seri: <https://orcid.org/0000-0001-7219-712X>
 ORCID de S. Faccendini: <https://orcid.org/0000-0001-8035-6055>

ORCID de M. Stullitel: <https://orcid.org/0000-0001-7575-9212>
 ORCID de J. Bichara: <https://orcid.org/0000-0002-3624-2488>
 ORCID de M. Capomassi: <https://orcid.org/0000-0002-4445-662X>

BIBLIOGRAFÍA

1. Brophy RH, Wolfe SW. Planning brachial plexus surgery: Treatment options and priorities. *Hand Clin* 2005;21(1):47-54. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2004.09.007>
2. Wood MB, Murray PM. Heterotopic nerve transfers: Recent trends with expanding indication. *J Hand Surg Am* 2007;32(3):397-408. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2006.12.012>
3. Palazzi Coll S, Cáceres Lucero J. Lesiones del plexo braquial en el adulto: parte 2. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol* 2000;65(2):148-55. Disponible en: https://www.aaot.org.ar/revista/1993_2002/2000/2000_2/650209.pdf
4. Boretto J, Alfie V, Thomas MG, Galucci G, De Carli P. Neurotizaciones extraplexuales e intraplexuales en el tratamiento de las avulsiones radiculares (C5-C6) traumáticas del plexo braquial del adulto. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol* 2010;75(2):192-9. Disponible en: https://www.aaot.org.ar/revista/2010/n2/Rev_AsocArgentOrtopTraumatol_2010_75_192-199_Boretto.pdf
5. Chwei-Chin Chuang D. Nerve transfers in adult brachial plexus injuries: My methods. *Hand Clin* 2005;21(1):71-82. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2004.10.004>
6. Hudak PL, Amadio PC, Bombardier C. Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) [corrected]. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *Am J Ind Med* 1996;29(6):602-8. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199606\)29:6<602::AID-AJIM4>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199606)29:6<602::AID-AJIM4>3.0.CO;2-L)
7. Medical Research Council. *Aids to the investigation of peripheral nerve injuries*. 2nd ed. London: Her Majesty's Stationery Office, 1942.
8. Merrell GA, Barrie KA, Katz DL, Wolfe SW. Results of nerve transfer techniques for restoration of shoulder and elbow function in the context of a meta-analysis of the english literature. *J Hand Surg Am* 2001;26(2):303-14. <https://doi.org/10.1053/jhsu.2001.215>
9. Mackinnon SE, Colbert SH. Nerve transfers for brachial plexus reconstruction. *Hand Clin* 2008;24(4):341-61. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2008.07.001>
10. Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvasethakul P, Ketmalasiri W. Nerve transfer to biceps muscle using a part of the ulnar nerve in brachial plexus injury (upper arm type): a report of 32 cases. *J Hand Surg* 1998;23(4):711-6. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(98\)80059-2](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(98)80059-2)
11. Oberlin C. Nerve transfer to biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5-6 avulsion of the brachial plexus— anatomical studies and report of four cases. *J Hand Surg Am* 1994;19(2):232-7. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0363-5023(94)90011-6)
12. Humphreys DB, Mackinnon SE. Nerve transfers. *Oper Tech Plastic Reconstruct Surg* 2002;9(3):89-99. [https://doi.org/10.1053/otpr.2003.S1071-0949\(03\)00057-X](https://doi.org/10.1053/otpr.2003.S1071-0949(03)00057-X)

13. Goubier J-N, Teboul F. Technique of the double nerve transfer to recover elbow flexion in C5, C6, or C5 to C7 brachial plexus palsy. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2007;11(1):15-7. <https://doi.org/10.1097/01.bth.0000248360.14448.6b>
14. Ray WZ, Pet MA, Yee A, Mackinnon SE. Double fascicular nerve transfer to the biceps and brachialis muscles after brachial plexus injury: clinical outcomes in a series of 29 cases. *J Neurosurg* 2011;114(6):1520-8. <https://doi.org/10.3171/2011.1.JNS10810>
15. Liverneaux PA, Diaz LC, Beaulieu JY, Durand S, Oberlin C. Preliminary results of double nerve transfer to restore elbow flexion in upper type brachial plexus palsies. *Plast Reconstr Surg* 2006;117(3):915-9. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000200628.15546.06>
16. Carlsen BT, Kircher MF, Spinner RJ, Bishop AT, Shin AY. Comparison of single versus double nerve transfers for elbow flexion after brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg* 2011;127(1):269-76. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181f95be7>
17. Martins RS, Siqueira MG, Heise CO, Foroni L, Teixeira MJ. A prospective study comparing single and double fascicular transfer to restore elbow flexion after brachial plexus injury. *Neurosurgery* 2013;72(5):709-14; discussion 714-5; quiz 715. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318285c3f6>