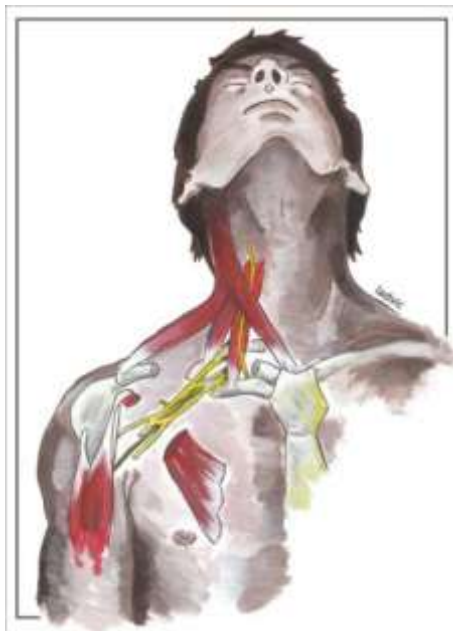


**Pharmacology Unit
School of Medicine
University of Málaga**

DOCTORAL THESIS

**UTILITY OF THE PHRENIC NERVE FOR
EXTRAPLEXAL TRANSFERS IN
SURGICAL TREATMENT OF STRETCH
LESIONS OF THE BRACHIAL PLEXUS**



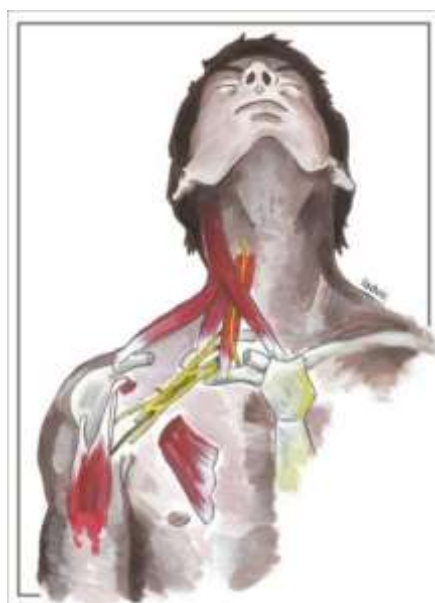
**Miguel Domínguez Páez
November 9, 2015**

**Directors:
Miguel Angel Arráez Sánchez,
Mariano Socolovsky
Inmaculada Bellido Estevez**

**Área de Farmacología
Facultad de Medicina
Universidad de Málaga**

TESIS DOCTORAL

**UTILIDAD DEL NERVIIO FRÉNICICO COMO
TRANSFERENCIA EXTRAPLEXUAL EN EL
TRATAMIENTO QUIRÚRGICO DE LAS LESIONES
POR ESTIRAMIENTO DEL PLEXO BRAQUIAL**



**Miguel Domínguez Páez
9 de Noviembre, 2015**

**Directores:
Miguel Angel Arráez Sánchez,
Mariano Socolovsky
Inmaculada Bellido Estevez**



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Miguel Domínguez Páez

 <http://orcid.org/0000-0001-8860-4818>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Inmaculada Bellido Estevez, Associate Professor of Pharmacology and Therapeutic clinic of the Pharmacology Area of the School of Medicine of the University of Málaga, **Miguel Angel Arráez Sánchez**, Specialist in Neurosurgery and Chief of Service of the Service of Neurosurgery of the Regional University Hospital of Málaga and Associate Professor of the Surgery Area of the School of Medicine of Málaga and **Mariano Socolovsky**, Specialist in Neurosurgery and Chief of the Pathology of Peripheral Nerve and Brachial Plexus Unit of Clinicas Hospital of Buenos Aires, Argentina.

Certify that:

D. **Miguel Domínguez Páez** has done this work for his Doctoral thesis entitled "**UTILITY OF THE PHRENIC NERVE FOR EXTRAPLEXAL TRANSFERS IN SURGICAL TREATMENT OF STRETCH LESIONS OF THE BRACHIAL PLEXUS**", under our management, planning and monitoring, and he is ready for exposition and defense

What we signed in Málaga to November 9, 2015.

Dr. Miguel Ángel Arráez Sánchez

Dr. Mariano Socolovsky

Profa. Dra. Inmaculada Bellido Estevez





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Inmaculada Bellido Estevez, Profesora Titular de Farmacología y Terapéutica Clínica del Área de Farmacología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Málaga, Miguel Ángel Arráez Sánchez, Facultativo Especialista de Área y Jefe de Servicio del Servicio de Neurocirugía del Hospital Universitario Regional de Málaga y Profesor Asociado del Área de Cirugía de la Facultad de Medicina de Málaga y Mariano Socolovsky, Especialista en Neurocirugía y Jefe de la Sección de la Unidad de Patología de Nervios Periféricos y Plexo Braquial del Hospital de Clínicas de Buenos Aires, Argentina.

Certifican que:

D. Miguel Domínguez Páez ha realizado los trabajos correspondientes a su Tesis Doctoral titulada “**Utilidad del nervio frénico como transferencia extraplexual en el tratamiento quirúrgico de las lesiones por estiramiento del plexo braquial**”, y su preparación para su lectura y defensa bajo nuestra dirección, planificación y supervisión.

Lo que firmamos en Málaga a 9 de Noviembre de 2015.

Dr. Miguel Ángel Arráez Sánchez

Dr. Mariano Socolovsky

Profa. Dra. Inmaculada Bellido Estevez



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

A Elisabet, Miguel, Julia y Víctor

No entres dócilmente en esa buena noche,
que al final del día debería la vejez arder y delirar;
enfurécete, enfurécete ante la muerte de la luz.

Aunque los sabios entienden al final que la oscuridad es lo correcto,
como a su verbo ningún rayo ha confiado vigor,
no entran dócilmente en esa buena noche.

Llorando los hombres buenos, al llegar la última ola
por el brillo con que sus frágiles obras pudieron haber danzado en una verde bahía,
se enfurecen, se enfurecen ante la muerte de la luz.

Y los locos, que al sol cogieron al vuelo en sus cantares,
y advierten, demasiado tarde, la ofensa que le hacían,
no entran dócilmente en esa buena noche.

Y los hombres graves, que cerca de la muerte con la vista que se apaga
ven que esos ojos ciegos pudieron brillar como meteoros y ser alegres,
se enfurecen, se enfurecen ante la muerte de la luz.

Y tú, padre mio, allá en tu cima triste,
maldíceme o bendíceme con tus fieras lágrimas, lo ruego.
No entres dócilmente en esa buena noche.
Enfurécete, enfurécete ante la muerte de la luz.

Dylan Thomas



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AGRADECIMIENTOS

A los directores de la tesis doctoral, Dr. Miguel Ángel Arráez Sánchez, Dr. Mariano Socolovsky y Dra. Inmaculada Bellido Estevez, por su ejemplo de profesionalidad, por su inestimable apoyo y por su confianza, habiendo hecho posible este trabajo.

A todo el personal del Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga y al Dr. Miguel Cuadros Romero. Gracias a su trabajo diario y generosidad me han permitido el desarrollo de la cirugía del sistema nervioso periférico.

Al Servicio de Neurocirugía del Hospital MAZ de Zaragoza, no sólo por hacerme crecer como profesional, sino también por enriquecerme como persona.

Al Servicio de Neurocirugía del Hospital de Clínicas de Buenos Aires, por su incalculable valor docente y su gran aportación a mi formación quirúrgica.

A Elisabet, a mis padres Miguel y Julia, a mi hermano Víctor, y a todos mis amigos (Carlos, Bernardo, Manuel, Agustín, Alberto, Fernando, Javier, Lorena, César...), por compartir mi camino y estar siempre a mi lado.

Miguel Domínguez Páez



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

RESUMEN

Introducción

Las lesiones traumáticas del plexo braquial en el adulto son devastadoras, debido al profundo impacto económico y social de por vida que acarrearán las secuelas que generan. Mención especial requieren las lesiones completas del plexo braquial con avulsión de todas las raíces que lo conforman, donde la regeneración espontánea es nula y la única opción de reparación quirúrgica son las transferencias nerviosas extraplexuales. Actualmente existe controversia sobre la eficacia y seguridad de la transferencia del nervio frénico en el tratamiento de este tipo de lesiones.

Objetivos

Establecer la eficacia y seguridad de la transferencia del nervio frénico en los pacientes adultos con lesiones completas o casi completas de plexo braquial en una población seleccionada. Describir las características epidemiológicas y clínicas de la muestra. Determinar variables con interés pronóstico en el éxito de la técnica. Comparar la tasa de éxito y complicaciones de la transferencia del nervio frénico con las series históricas publicadas de este procedimiento.

Material y métodos

Estudio retrospectivo observacional transversal, descriptivo y analítico, sobre una serie de casos de pacientes adultos sometidos a una transferencia del nervio frénico como tratamiento de una lesión por tracción del plexo braquial. Se revisaron 276 lesiones traumáticas de plexo braquial intervenidas quirúrgicamente, desde enero de 2004 hasta diciembre de 2013, en la Unidad de Cirugía de los Nervios Periféricos y Plexo Braquial del Servicio de Neurocirugía del Hospital Universitario de Buenos Aires, Argentina. Fueron incluidos de forma retrospectiva en el estudio todos los pacientes de ambos géneros, mayores de 14 años, con parálisis braquial severa (C5-6-7-8 y C5-6-7-8-D1) sometidos a la transferencia extraplexual del nervio frénico y con un tiempo de seguimiento postoperatorio no inferior a 18 meses. Se registraron variables clínicas, demográficas y quirúrgicas, con la finalidad de definir la serie de pacientes y evaluar aquellas con posible interés pronóstico en el éxito de la técnica. El seguimiento postoperatorio se llevó a cabo a través de una revisión trimestral y cada paciente fue incluido en un programa intensivo de tratamiento rehabilitador que comenzó tres semanas después de la cirugía. Se utilizó la escala MRC para determinar el grado de fuerza alcanzado por el músculo cuya función se pretendía restituir, considerándose un buen resultado el grado tres o mejor, y mal resultados el grado dos o peor. Todos los pacientes se sometieron durante el seguimiento a un cuestionario con la finalidad de identificar problemas respiratorios derivados de sacrificar la función del nervio frénico. La recogida de datos se realizó en el programa Microsoft Excel 2008 (Microsoft Inc, Redmond, WA, USA). Para el estudio analítico de los resultados se empleó el programa estadístico SPSS Statistics 15.0 para Windows (SPSS Inc, Chicago IL, USA). Se realizaron dos tipos de análisis estadístico, descriptivo e inferencial.

Resultados y discusión

51 pacientes de los 271 analizados cumplieron los criterios de inclusión del estudio. Tres cuartas partes de los pacientes presentaron una lesión completa del plexo braquial (C5-T1), el resto una lesión casi completa (C5-C8). Todos presentaron una avulsión de las raíces afectas. El tiempo medio entre el traumatismo y la cirugía fue de 5.7 meses (desviación típica de 3.5), con un rango de 1 a 24 meses. El seguimiento postquirúrgico medio fue de 32.5 meses, con un rango de 18 a 57 meses. Respecto al balance motor observado, un grado MRC de 3 o mejor se consideró como un buen resultado, logrado en 43 de los 51 pacientes (84.3%). Sólo 2 pacientes desarrollaron síntomas respiratorios y fueron de carácter transitorio (3.9%). Existieron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de buen y mal resultado en las variables de longitud media del injerto (9.8 cm vs 15.1 cm, $p = 0.01$), y en la puntuación en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador (2.86 vs 2, $p = 0.01$). Aunque la edad y la demora entre el traumatismo y la cirugía no mostraron diferencias estadísticamente significativas, se observó una tendencia al éxito de la técnica en los pacientes con mayor edad y menor demora, coincidiendo con lo publicado en los trabajos de otros autores. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la tasa de buenos resultados entre la serie histórica y la actual ($p = 0.15$). Sí observamos diferencias estadísticamente significativas en la tasa de complicaciones entre la serie histórica y la actual ($p = 0.038$), aunque existen sesgos que podrían justificar este resultado. Tras analizar la literatura, no parece seguro llevar a cabo la transferencia del nervio frénico en casos de patología cardio-pulmonar de base, si la función respiratoria está comprometida, en menores de tres años de edad y/o de forma conjunta a la transferencia de nervios intercostales. Al comparar las series históricas en las que se utiliza el nervio frénico para restituir la flexión del codo frente a las que utilizan los nervios intercostales, no se observan diferencias estadísticamente significativas en el buen resultado ($p = 0.11$).

Conclusiones principales

La transferencia del nervio frénico en la cirugía reconstructiva del plexo braquial es una técnica eficaz, con un porcentaje de éxito en nuestro estudio del 84%, mayor que en las series históricas, el 75%. El porcentaje de síntomas respiratorios derivado de la técnica es bajo y de carácter transitorio, con un porcentaje del 3.9% en la serie actual. La mayor adhesión al tratamiento rehabilitador y el uso de un injerto corto para llevar a cabo la transferencia nerviosa, son factores predictivos del éxito de la técnica.

ÍNDICE

INTERNATIONAL THESIS	17
1. Introduction	17
1.1 Surgical anatomy of the brachial plexus	17
1.2 Traumatism of the brachial plexus in adults: Stretch/contusion lesions	19
1.2.1 Epidemiology	19
1.2.2 Classification of stretch lesions of the brachial plexus	20
1.2.3 Clinical evaluation and additional examinations	22
1.2.4 Surgical treatment for nerve stretch lesions of the brachial plexus	25
1.3 Extra-plexal nerve transfers	28
1.3.1 Historical background	28
1.3.2 Available extra-plexal transfers	29
1.3.3 The phrenic nerve as donor	34
1.4 Hypothesis	36
2 Objectives	37
3 Methods	37
3.1 Study design	37
3.2 Selected population	37
3.3 Working protocol	37
3.4 Definition of variables	39
3.4.1 Main variables	39
3.4.2 Variables with a prognosis interest in the results of the transfer	39
3.4.3 Variables of surgical interest	41
3.5 Comparison between the results and complications and historical series	41
3.6 Processing and analysis of data	41
4 Results	41
4.1 Demographic and clinical description of the series	41
4.2 Surgical description	42
4.3 Description of the results and follow-up of the series	42
4.4. Inferential analysis between groups with good and bad results	44
4.5 Comparison of results and complications with historical series	45
5 Discussion	47
5.1 Success of the technique	47
5.2 Reliability of the technique	50
5.3 Phrenic nerve transfer versus transfer of intercostal nerves	51
6 Study limitations	52
7 Conclusions	53
DESARROLLO DE LA TESIS	55
1 Introducción	57
1.1 Anatomía quirúrgica del plexo braquial	57
1.1.1 Nervios raquídeos	57
1.1.2 Troncos primarios	59

1.1.3 Divisiones	60
1.1.4 Cordones	61
1.2 Traumatismos del plexo braquial en el adulto: lesiones por estiramiento/contusión	62
1.2.1 Epidemiología	62
1.2.2 Clasificación de las lesiones por estiramiento del plexo braquial	63
1.2.3 Evaluación clínica y exámenes complementarios	66
1.2.4 Tratamiento quirúrgico de las lesiones nerviosas por estiramiento de plexo braquial	74
1.3 Transferencias nerviosas extraplexuales	80
1.3.1 Antecedentes históricos	81
1.3.2 Transferencias extraplexuales disponibles	82
1.3.3 El nervio frénico como donante	90
1.4. Hipótesis y justificación del estudio	94
2. OBJETIVOS	95
2.1 Objetivo general	97
2.2 Objetivos específicos	97
3. MATERIAL Y MÉTODOS	99
3.1 Diseño del estudio	101
3.2 Población seleccionada	101
3.3 Protocolo y plan de trabajo desarrollados	101
3.4 Definición de variables	103
3.4.1 Variables principales	103
3.4.2 Variables con interés pronóstico en el resultado de la transferencia	103
3.4.3 Variables de interés quirúrgico	105
3.5 Comparación de resultado y complicaciones con series históricas	105
3.6 Procesamiento y análisis de datos	105
4. RESULTADOS	107
4.1 Descripción demográfica y clínica de la serie	109
4.2 Descripción quirúrgica	109
4.3 Descripción de los resultados y seguimiento de la serie	110
4.4 Análisis inferencial entre el grupo con buen resultado y mal resultado	111
4.5 Comparación de resultado y complicaciones con series históricas	112
5 DISCUSIÓN	115
5.1 Éxito de la técnica	117
5.2 Seguridad de la técnica	119
5.3 Transferencia del nervio frénico versus transferencia de nervios intercostales	121
5.4 Limitaciones del estudio	122
6. CONCLUSIONS/CONCLUSIONES	123
CONCLUSIONS	125
CONCLUSIONES	127
7. ABREVIATURAS	129
8. BIBLIOGRAFÍA	133
9. PUBLICACIONES	145

INTERNATIONAL THESIS

UTILITY OF THE PHRENIC NERVE FOR EXTRAPLEXAL TRANSFERS IN SURGICAL TREATMENT OF STRETCH LESIONS OF THE BRACHIAL PLEXUS

1. Introduction

Traumatic lesions of the brachial plexus in adults have devastating effects, due to their deep, lifelong economic and social impact^{17,93,140}. Surgical treatment results, despite progress made in the last decades, are not ideal. Nonetheless, surgical results are still much superior to those achieved without surgery. Complete lesions of the brachial plexus with avulsion of its roots deserve special mention. In this case, spontaneous regeneration is non-existent, and extraplexal nerve transfers are the only surgical repair option for the brachial plexus. This procedure involves anastomosis between a functioning nerve (donor) and an injured nerve (recipient), in order to restore the recipient's lost function at the expense of the donor's.

1.1. Surgical anatomy of the brachial plexus

The brachial plexus starts at the vertebral column and generally includes spinal nerves C5, C6, C7, C8 and T1, which in turn connect in order to form the upper, medium and lower primary trunks. A front and rear division is formed from each one of these trunks, which in turn form the posterior, lateral and medial cords. The main nerves of the upper extremity start at these cords^{71,78,98,121}.

Before spinal nerves join to form the three nervous trunks, they form three nerves⁹⁸ (figures 1 and 2):

- Phrenic nerve.
- Long thoracic nerve.
- Dorsal scapular nerve.

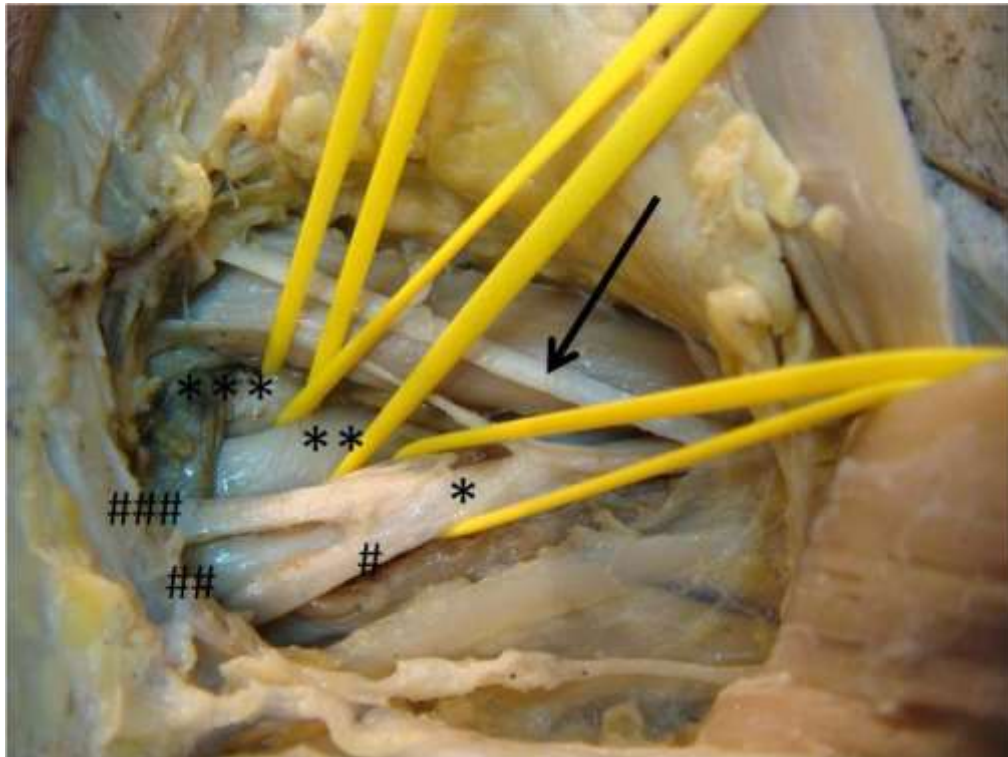


Figure 1. Dissection in corpse. Supraclavicular approach to the brachial plexus. *: upper primary trunk, **: primary trunk medium, *: lower primary stem. #: suprascapular nerve, ##: posterior division, ###: former division, arrow: phrenic nerve.**

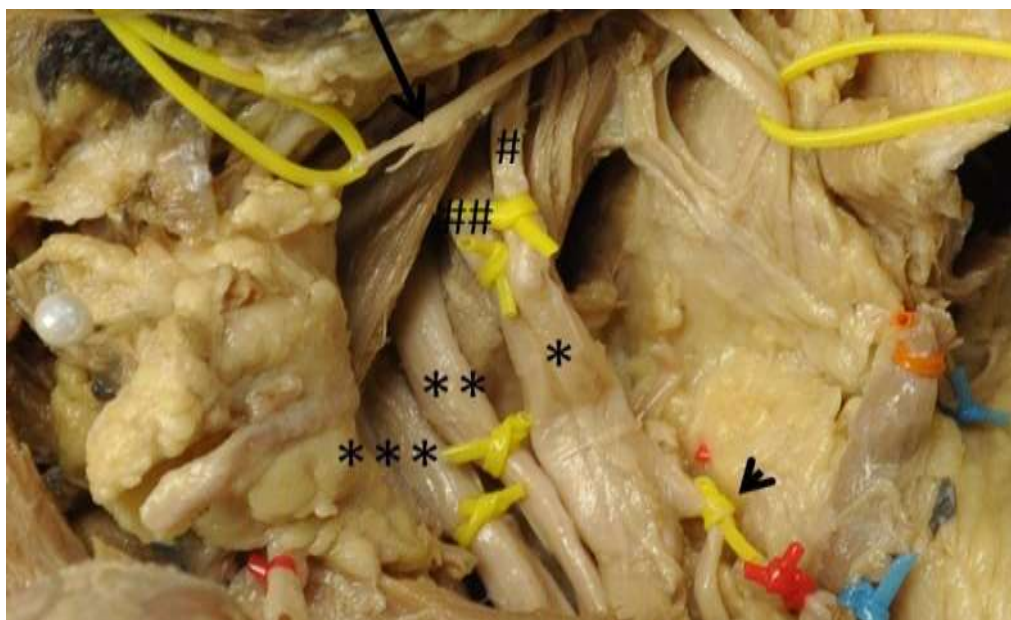


Figure 2. Dissection in corpse carried out in the room of dissection of the University of Málaga. Supraclavicular approach to the brachial plexus. *upper primary trunk, **: primary trunk medium, *: lower primary trunk, #: root C5, ##: root C6, long arrow root: phrenic nerve, short arrow: suprascapular nerve.**

The importance of knowing the anatomic location of these nerves lies in the fact that their affection indicates a proximal lesion of the brachial plexus.

The front branches of the forementioned spinal nerves join together in order to form the primary trunks of the brachial plexus. Spinal nerves C5-6 join together in order to form the upper primary trunk, C7 forms the medium primary trunk, and C8-T1 form the lower primary trunk. All these nerves are located above the collarbone and travel initially between the anterior and the medium scalene muscles.

Two divisions appear from each primary trunk, a front and a rear one, located behind the collarbone. The front divisions of the upper and medium primary trunks join together forming the lateral cord, and the front division of the lower trunk forms the medial cord. The three rear divisions join together forming the posterior cord.

The terminology of the lateral, medial and posterior cords is defined by their anatomic relationship to the axillary artery. They are located underneath the collarbone and the dissection of the pectoralis major and minor muscles is required in order to expose them.

Anatomical variability such as the prefixed or postfixed brachial plexus, where C4 and T2, respectively, are involved, must be mentioned. They affect about 25% of the population (figure 3).

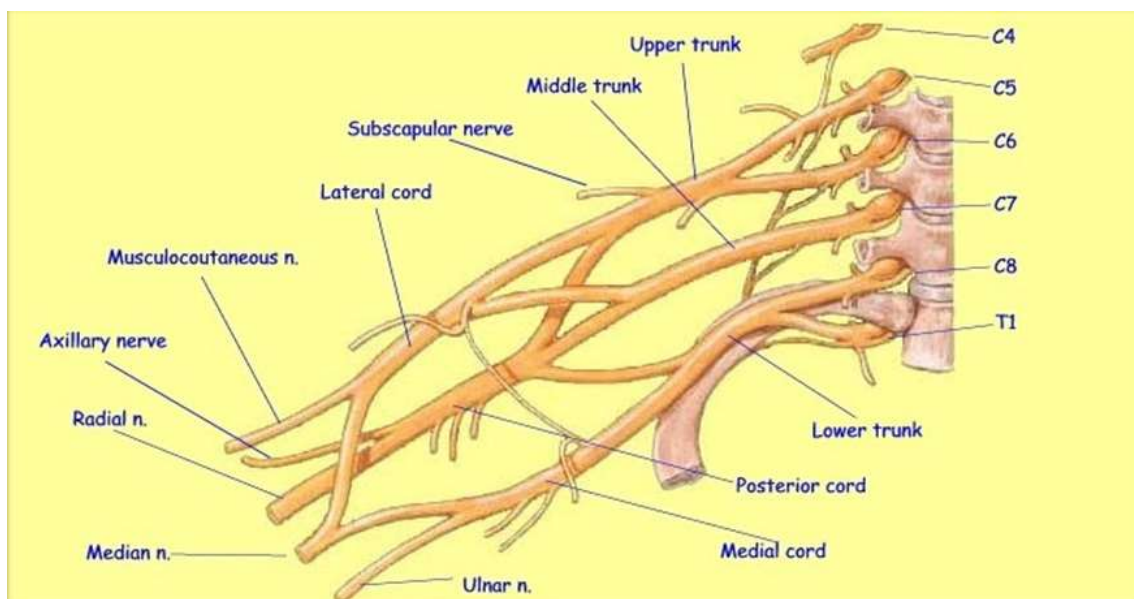


Figure 3. Scheme of the complete formation of the brachial plexus.

1.2. Traumatism of the brachial plexus in adults: Stretch/contusion lesions

Stretch/contusion lesions occur mostly when the head-neck and the shoulder-arm are pulled in opposite directions in a violent manner, causing an intense stretching of supraclavicular and laterocervical soft structures, which include nerves that form the plexus, and, to a lesser extent, vessels¹⁴⁶.

1.2.1. Epidemiology

The most usual lesions of the plexus are those caused by stretching/contusion, generally following a motorbike accident. Between 1968 and 1998, 50% of the 1019⁴⁷

patients suffering from a brachial plexus lesion who had an operation at the Louisiana State University Health Sciences Center had suffered a motorbike accident. Narakas⁸⁶ estimates that approximately 2% of victims of motorbike accidents have a lesion of the brachial plexus. Other authors have supported this fact^{9,77,92,97}.

1.2.2. Classification of stretch lesions of the brachial plexus.

1.2.2.1. According to their relationship to the dorsal root ganglion.

There are two types of lesions, depending on their location regarding the dorsal root ganglion:

- Preganglionic lesion or root avulsion. It is the pulling out for the dorsoventral root of the spine, therefore an intradural lesion. It is the most serious lesion that can happen, because there is neither possibility of spontaneous regeneration, nor can it be directly repaired by surgery, with exceptions. Furthermore, it is the most common type of stretch lesion of the brachial plexus in adults^{9,47,86}.
- Postganglionic lesion. It occurs on the extraforaminal nervous elements which form the plexus. These elements are formed by the classic histological structure of the peripheral nerves: axonal tissue, endoneural connective tissue and perineural connective tissue. There are several classifications for lesions of the peripheral nerve, each one of them with a different prognosis. The first classification was established by Seddon in 1943¹⁰², distinguishing three big groups of nerve lesions: neuropraxia, axonotmesis and neurotmesis. Neurotmesis does not regenerate spontaneously. The second classification, established by Sunderland in 1951¹²⁰, widened Seddon's classification, distinguishing five types of nerve damage: type I, equal to neuropraxia; type II, equal to axonotmesis; type III, axonal and endoneural interruption; type IV, axonal, endoneural and perineural interruption; type V, equal to neurotmesis. In 1989⁶⁵, Mackinnon included type VI to Sunderland's classification: different Sunderland degrees in the same damaged nervous segment (figure 4).

Let us emphasise that brachial plexus lesions in stretch traumatism are regularly a combination of all the forementioned lesions. Identifying those where axonal regeneration is minimal or none is paramount for establishing a surgical solution for these patients.

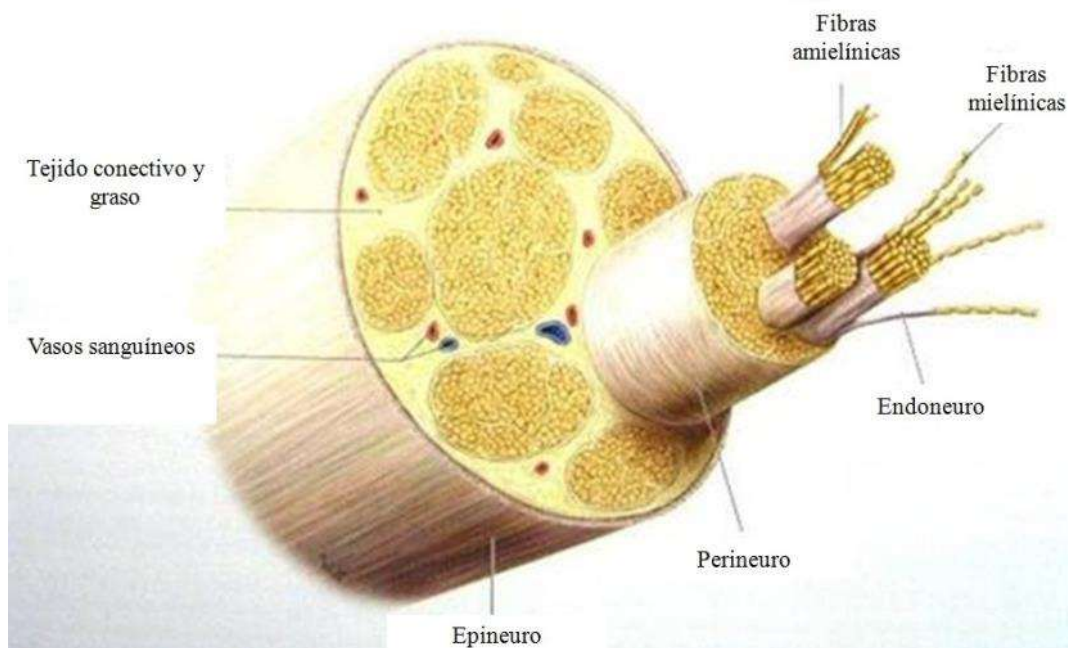


Figure 4. Scheme of the histological structure of a peripheral nerve.

1.2.2.2. According to their location.

Three main groups are distinguished according to the location of the lesion in relation to the collarbone²⁶:

- Supraclavicular lesions. These are the most common stretch lesions, above 70%^{78,92}.
- Retroclavicular lesions.
- Infraclavicular lesions.
- Two level lesions⁹².

1.2.2.3. According to the expanse of the lesion.

There are two big groups determined by the number of affected roots in stretch traumatism of the brachial plexus: complete lesions, when all muscular groups dependent on roots C5-6-7-8 and T1 are affected, and incomplete lesions, which are all the rest.

- Complete brachial plexus lesions. These are the most common ones and make up between 50% and 75%^{9,78,88,92}. The preganglionic lesion of all roots is estimated between 15 and 20%^{9,92,97}. The rate of spontaneous recovery of complete brachial plexus lesions without surgery is 4%⁷⁸.
- Incomplete lesions. Upper roots are commonly more affected than lower roots. C5-6 muscular paralysis is known as “Duchenne-Erb paralysis”, with a 16.3% rate. Spontaneous recovery without surgery rate is 30%⁷⁸. When lesions include C7 together with C5-6, the rate goes up to 40%, and spontaneous recovery without surgery is about 16%^{9,78}. C8-T1 lower roots muscular paralysis is known as “Déjerine-Klumpke paralysis”. Its influence, 3-4%^{9,88} is so low it has been omitted by some authors.

1.2.3. Clinical evaluation and additional examinations.

Evaluation of brachial plexus lesions has three main aims: to determine the expanse, location and severity of the lesion, in order to provide a prognosis and deciding whether or not surgical treatment is needed. Identifying whether or not root avulsion exists is paramount, as they are irrecoverable lesions, and therefore their diagnosis requires early surgical treatment.

1.2.3.1 Clinical evaluation.

Evaluating all motor and sensitive functions of the upper limb, as well as its passive range of motion is essential. Due to the complexity of the innervation of the upper limb, a thorough, sequential examination is advised. Muscular diagrams such as Merle d'Aubigne and Deburge's⁷⁴ may be useful. Russell recommends a 6 step examination⁹⁸.

The roots involved in the nervous lesion can be assessed reliably according to the muscular deficiency observed during the examination⁴⁶, becoming a key aspect those muscles innervated by two or less roots.

Although they have a limited predictive value, there are signs during the patient's examination which can show a lesion caused by avulsion^{26,107}:

- Horner's syndrome (figure 5).
- Paralysis of the serratus anterior muscle, rhomboid muscles, and/or ipsilateral hemidiaphragm.
- Curvature of the head or cervical scoliosis over the contralateral shoulder.
- Severe pain of an insensitive limb due to the rupture of sensory input of the limb after a root avulsion.
- Lack of Tinel's sign.

The worst possible clinical scenario for assessing the severity of the nerve damage is a flaccid arm without sensitivity and with indirect signs of avulsion.



Figure 5A and 5B. Horner and winged scapula syndrome respectively. Clinical findings suggestive of avulsion of roots.

1.2.3.2. Additional examinations.

They are appropriate for traumatic lesions of the brachial plexus which do not show a clinical recovery in the first weeks.

Radiology tests:

- Conventional X-Ray tests: they assess possible cervical, collarbone, shoulder, rib, and/or humeral fractures and/or dislocations.
- Arteriogram: only appropriate if an associated vascular lesion is suspected.
- Cervical myelogram obtained by computer tomography (CT)⁶⁹. Nowadays, radiological technology is considered gold standard for the diagnosis of root avulsion, with a 95% accuracy and a 98% specificity¹³⁸. However, correlation with intraoperative findings ranges between 65 and 85%¹²³. It also permits the pseudomeningocele diagnosis.
- Magnetic resonance (MR) and cervical myelogram using MR. Provides sensitivity, specificity and reliability for the diagnosis of pseudomeningocele. Furthermore, MR permits a better assessment of soft tissues (spinal cord, paraspinal muscles and plexus) than CT, with no need for the patient to be treated with radiation (figure 6).

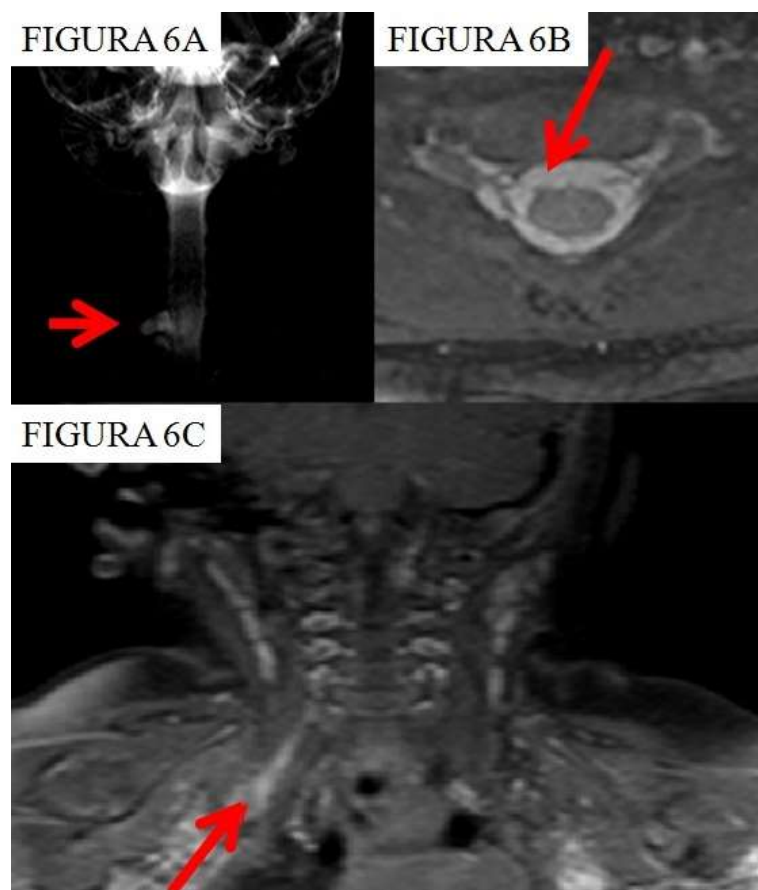


Figure 6. RM images. 6A: Pseudomeningocele. 6B: Avulsion of the anterior root. 6 C: Neuroma. Taken from a patient with obstetric brachial palsy evaluated by the Pediatric Neurosurgery Unit of the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga.

Neurophysiology tests:

They assess the expanse, severity and location of the lesion, as well as assessing if there is axonal regeneration. Therefore, they are very useful for the patient's presurgical assessment, helping us to establish the necessity of surgery. During surgery, they allow us to choose the most appropriate therapeutic procedure. Postsurgical monitoring provides information about the prognosis and results of the chosen treatment.

Among the tests that should be made for the initial assessment of the patient we can mention: electromyography (EMG)^{5,31,52,56,132}, electroneurography (ENG)^{48,56} and the somatosensory evoked potential (SSEP)^{44,84}.

Furthermore, neurophysiology tests are used in exploratory and reconstructive surgery of lesions which directly affect the brachial plexus. They allow the identification of nerve structures present in the surgical field and the definition of the type of nerve lesion supporting the macro and microscopic test of the nerves involved. Among these tests the following can be highlighted: electrical stimulation of the nerve, the nervous action potential (NAP)⁵³ (figure 7), the SSEP⁸⁴ and the motor evoked potential (MEP)¹²⁹.

Macro and microscopic surgical examination, supported by intraoperative neurophysiological tests, is the gold standard procedure for the diagnosis of a nerve lesion.

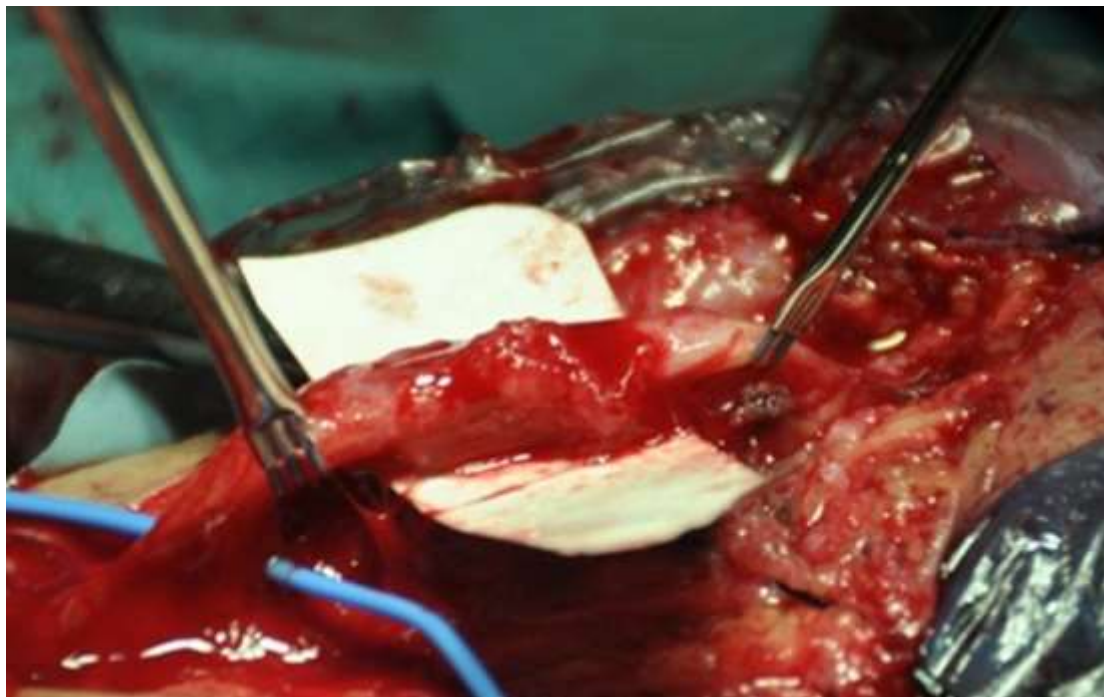


Figure 7. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Neuroma in continuity of the median nerve. Checks the bread through a stimulator proximal and a distal receiver to neuroma. In this case the electrical impulse is transmitted through the neuroma by what only proceeded to a neurolysis.

1.2.4. Surgical treatment for nerve stretch lesions of the brachial plexus

1.2.4.1. Optimal time for surgery

Generally, when facing a stretch lesion of the brachial plexus, a 3-4 month waiting period is recommended, in order for spontaneous signs of recovery to appear. If such signs do not appear, surgical examination and repair, if needed, are recommended. If there is a high suspicion of root avulsion after clinical examination and additional tests, surgery should be taken as soon as possible, as they are irreversible lesions. Something similar could be said about complete lesions, where the rate of spontaneous recovery is 4%^{46,58,78}. Surgical repair performed 9 months after traumatism occurred have a much lower recovery rate^{8,51,54,114}.

1.2.4.2. Priorities of the repair

The surgical reconstruction plan is different in every case, depending on the expanse of the lesion and the possible reconstruction options. If the lesion is large, it will be impossible to repair all the structures of the plexus. Therefore, priorities must be set up according to the functional impotence of the area and the prognosis of recovery expected after reconstruction^{9,78,92,107,125}. The order of priorities from higher to lower can be found below:

- Flexion of the elbow.
- Dynamic stabilisation of the shoulder.
- Sensitivity of hand protection.
- Brachial thoracic pinch.
- Flexion of the wrist and fingers.
- Muscles dependent on the ulnar nerve.

1.2.4.3. Microsurgical techniques.

External neurolysis:

External neurolysis is the circumferencial release of a nerve from its outer coating and/or the scar tissue surrounding it, until a particular length of it is displayed¹¹⁸.

The clinical relevance of the external neurolysis lies on the fact that the scar tissue related to a nerve lesion involves a certain degree of adherence-constriction to the nerve, which in turn interferes in the regeneration and/or conduction of the nerve impulse. For that reason, theoretically, neurolysis can be beneficial for the functional prognosis of a lesion (figure 8). Unfortunately, there is no credible scientific proof of this statement to date. However, many authors favour this technique^{71,117}.

Internal neurolysis:

Internal neurolysis consists on the separation-isolation of the fascicles which form a nerve through a dissection inside the nerve (intranearal), in order to release the fascicles from the scar tissue. Other aims of internal neurolysis include separating damaged nerve fascicles from undamaged ones in a partial nerve lesion, as well as a first step for techniques such as a neurorrhaphy with grafts, a nerve transfer or a resection of a nerve sheath tumour^{11,41,71,90,118}.

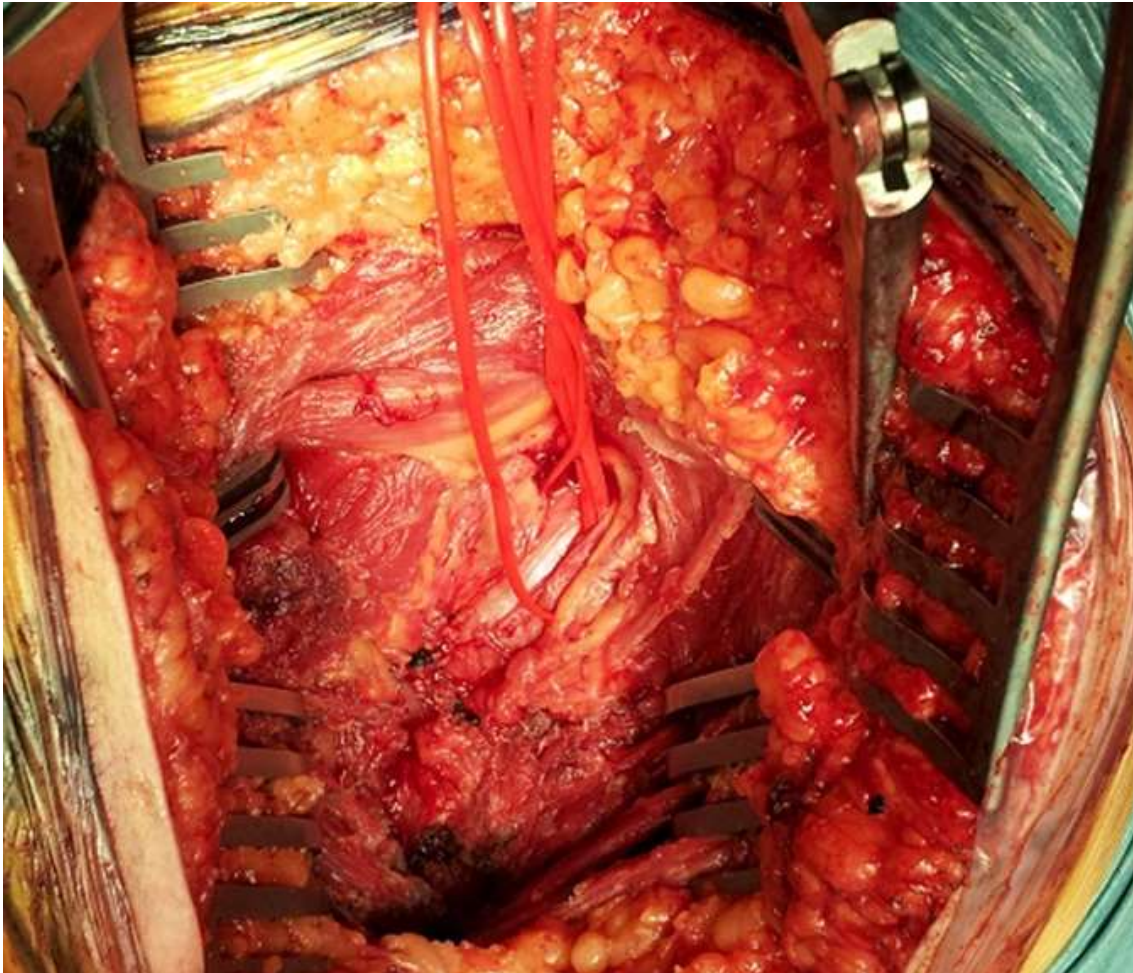


Figure 8. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Extrapelvic endometriosis of the piriformis muscle and perineural fibrosis of the sciatic nerve. It was an external neurolysis.

Direct neurorrhaphy:

Neurorrhaphy is the surgical coaptation of two nerve stumps with the purpose of restoring its morphological continuity, allowing the axonal regeneration from the proximal portion of the nerve to the distal one. Direct neurorrhaphy is conducted without a graft, while indirect neurorrhaphy requires some kind of grafting^{80,118}. Neurorrhaphy has three main principles: to give priority to direct neurorrhaphy over indirect neurorrhaphy, as the former provides better clinical results than the latter; to prevent suture line tightness, as it leads to the failure of the technique and to perform the neurorrhaphy on nerve stumps without scar tissue, as otherwise intraneural fibrosis prevents axonal development⁵⁰.

Neurorrhaphy using grafting:

It is the most common microsurgical technique used for lesions caused by tension of the brachial plexus once the neurotmesic nerve portion has dried out, in order to restore the morphological continuity between the nerve structures involved in the lesion. This is done providing the proximal stump displays an appropriate fascicle structure and/or it not showing avulsion (figure 9). The use of cutaneous nerve autografts such as the sural nerve is nowadays considered a gold standard technique⁸⁰⁻⁸².

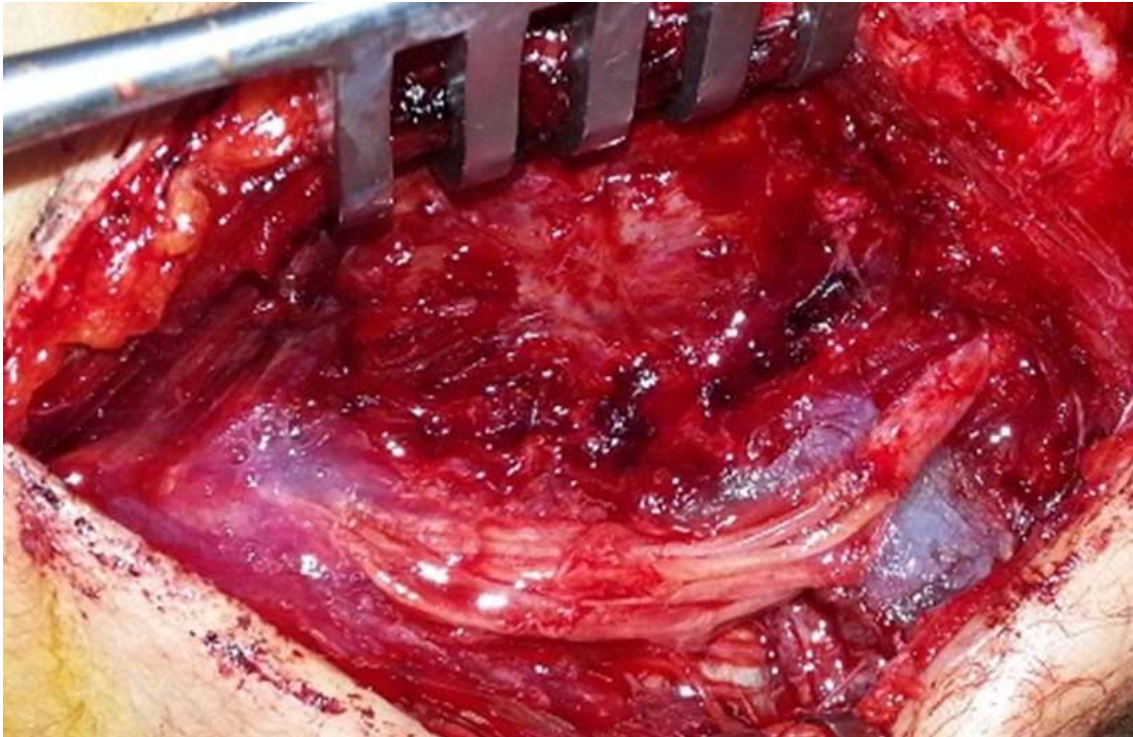


Figure 9. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Traumatic section of the radial nerve in four months. It proceeded through autologous graft of sural nerve reconstruction.

Spinal reattachment of roots:

It is the restoring of the morphological continuity between the spinal cord and the avulsed roots. The first case was described by Bonney in 1977⁹. However, reinnervation in the muscles dependent on the reattached roots was not objectified. Carlstedt's subsequent studies^{12,13} in animals and humans, have proven regeneration. Although some authors are in favour of this technique⁴², it should not be considered a therapeutic option for the reconstruction of the brachial plexus before further investigations have been carried out^{26,46,58,78,107,125}.

Nerve transfers:

Neurotization or nerve transfer is the anastomosis between a functioning nerve (donor) and a damaged nerve (recipient), with the purpose of restoring the recipient's lost function at the expense of the donor's^{94,95}. For this reason, and also because the success of this technique can never be guaranteed, the risk-benefit of sacrificing a function for another must be justified.

Neurotization is the chosen procedure when it is not possible to reconstruct the damaged nerve structure in a direct manner, for example when avulsion of the root is present. There are two types of nerve transfers in brachial plexus surgery: intra-plexal and extra-plexal, depending on whether the donor nerve forms part of the plexus or not. Intra-plexal nerve transfer must be the chosen procedure when the lesion of the plexus is partial, and, therefore, axons which form part of the same plexus are available, as any of these nerve structures offer a higher number of axons than the sum up of all available nerves in order to carry out an extra-plexal transfer, with the exception of the C7 contralateral root^{94,95,119,128} (figure 10).

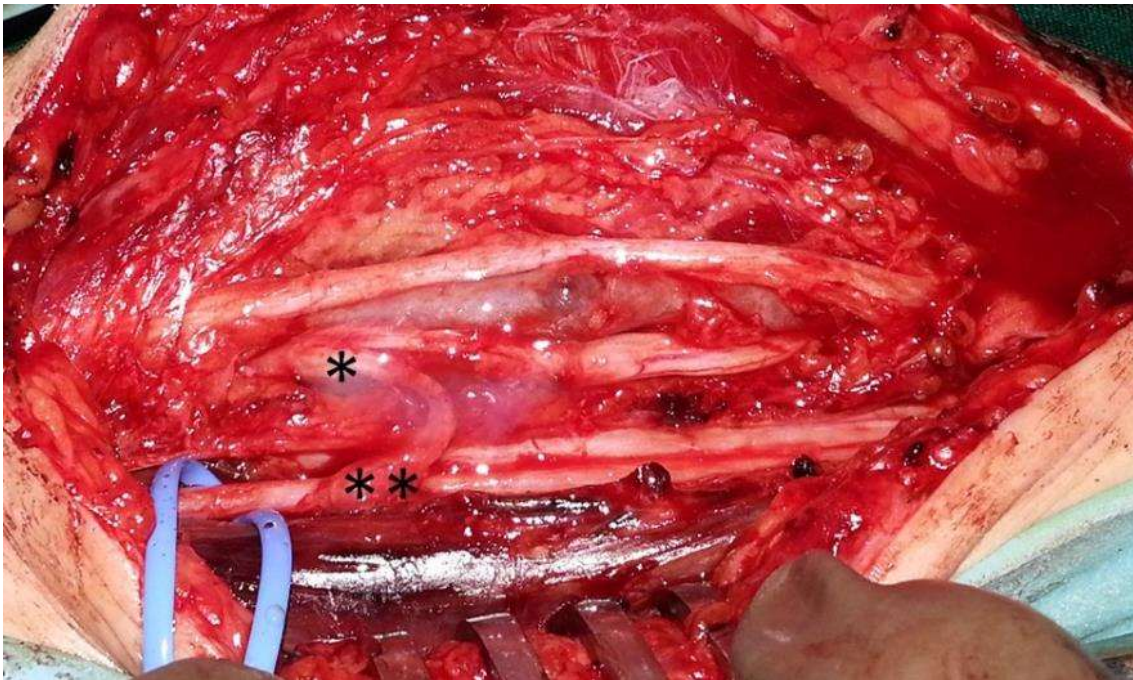


Figure 10. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Avulsion of C5 and C6 roots after trauma by brachial plexus traction. Transfer intraplexual of motor fascicle of the ulnar nerve to motor branch of the biceps (Oberlin technique). *: ulnar fascicle, **: motor branch to the biceps.

1.3.Extra-plexal nerve transfers.

In complete lesions of the brachial plexus, especially in cases when all roots have been avulsed, extra-plexal neurotizations are the only possibility of nerve reconstruction for the patient, with the aim of minimising the severe deficiency they present. As it was previously said, complete lesions of the brachial plexus are the most common ones. Although they do not always involve the avulsion of all roots, they do restrict the possibility of intra-plexal nerve transfers, as no undamaged nerves can be used as donors. It is possible to partially reconstruct the plexus with grafts if not all roots are avulsed, as well as to carry out extra-plexal neurotizations which can complete the reconstruction.

Generally speaking, a transfer can be deemed successful when muscular strength obtained on the MRC scale is equal or more than three, that is to say, when the muscle is able to beat the gravity.

1.3.1. Historical background.

The first cases of nerve transfer were reported by Harris and Low in 1903³⁸, particularly three cases of partial transfer from C6 and C7 to C5, although results were not detailed. A subsequent description of a nerve transfer, using the accessory spinal nerve as donor, was made by Tuttle in 1913¹³⁰. Vulpius and Stoffel¹³⁵, in the 1920s, used nerve branches from the pectoral in order to make a neurotization of the

musculocutaneous and axillary nerves. In 1929, Foerester²⁵ described the use of subscapularis and thoracodorsal nerves as donors of the axillary nerve. There is no nerve transfer bibliography until after World War II. In 1948, Lurje⁶⁴ described the application of these techniques in Erb's palsy, and also suggested to transfer the phrenic nerve. In 1963, Seddon and Yeoman published the first complete description of the technique and its results¹⁰³, using intercostal nerves for neurotization in cases of root avulsion. Despite the promising beginning of nerve transfers in reconstructive surgery of the brachial plexus, several studies defended amputation, arthrodesis, and the use of prostheses as the best therapeutic option for patients with complete lesions of the brachial plexus^{21,68,106}.

From the late sixties until the early eighties, nerve transfers consolidated as an effective treatment in reconstructive surgery of the brachial plexus, thanks to studies from authors such as Tsuyama, Hara, Kotani, Allieu, Brunnelli, Celli, Merle, Millessi and Sedel, setting aside amputation, arthrodesis and prostheses^{2,10,14,37,55,75,81,104,127}. In 1984, Narakas⁸⁷ established the anatomical basis for nerve transfers in surgery of the brachial plexus. During the last decades of the twentieth century, a great number of descriptions of neurotization, with different clinical results, were published, as we will explain later.

1.3.2. Available extra-plexal transfers.

As it was said before, since the beginning of the twentieth century, different nerves have been used as axon donors in order to restore the functionality of certain neuro-muscular groups in traction lesions of the brachial plexus.

It has been proven that the accessory spinal nerve is an effective donor in order to restore the function of nerves such as the suprascapular, axillary and musculocutaneous^{2,66,76,90,100,115,124,126,130,137} (figure 11). The transfer from the accessory spinal nerve to the suprascapular nerve is one of the best options for the reconstruction of lesions of the brachial plexus, because there is no need to use grafting and also because other transfers can be used in order to reinnervate the musculocutaneous nerve (figure 12).

Intercostal nerves have been proven to be efficient for the neurotization of the musculocutaneous nerve^{103,112,127} (figure 13). The use of two intercostals and direct neurotization is recommended in order to get the best results^{45,76,90,91}. Although the most common use of intercostal nerves is the transfer to the musculocutaneous nerve with the aim of restoring the flexion of the elbow, authors like Oberlin have described the transfer to branches of the triceps^{90,66,115} (figure 14).

Sacrificing the damaged brachial plexus contralateral C7 root with the purpose of using it as an axon donor is a technique described and performed for the first time by Gu in China in 1992^{32,35} (figure 15). During subsequent years, several surgeons have performed this technique with technical variations and different results^{1,18,116,126,136}. This technique has been used mainly for the neurotization the median nerve^{18,32,73,116,137,139}. This reconstructive option is not commonly performed due to its complexity, the risk of damaging the patient's healthy limb, some less than satisfactory results, as well as the fact that co-contraction with the healthy limb is possible even though a reinnervation is successful.

The use from the facial nerve branch to the platysma muscle for the neurotization of the pectoral nerve was described by Bertelli in 2007⁷. Socolovsky¹⁰⁹

later described the surgical anatomy of this motor branch. Nowadays, more clinical research is necessary in order to determine the effectiveness of this type of transfer.

Neurotization using cervical roots^{10,115,144} (figure 16) or the hypoglossal nerve (figure 17) has been dropped at the present time due to the poor results observed^{24,67,72}.

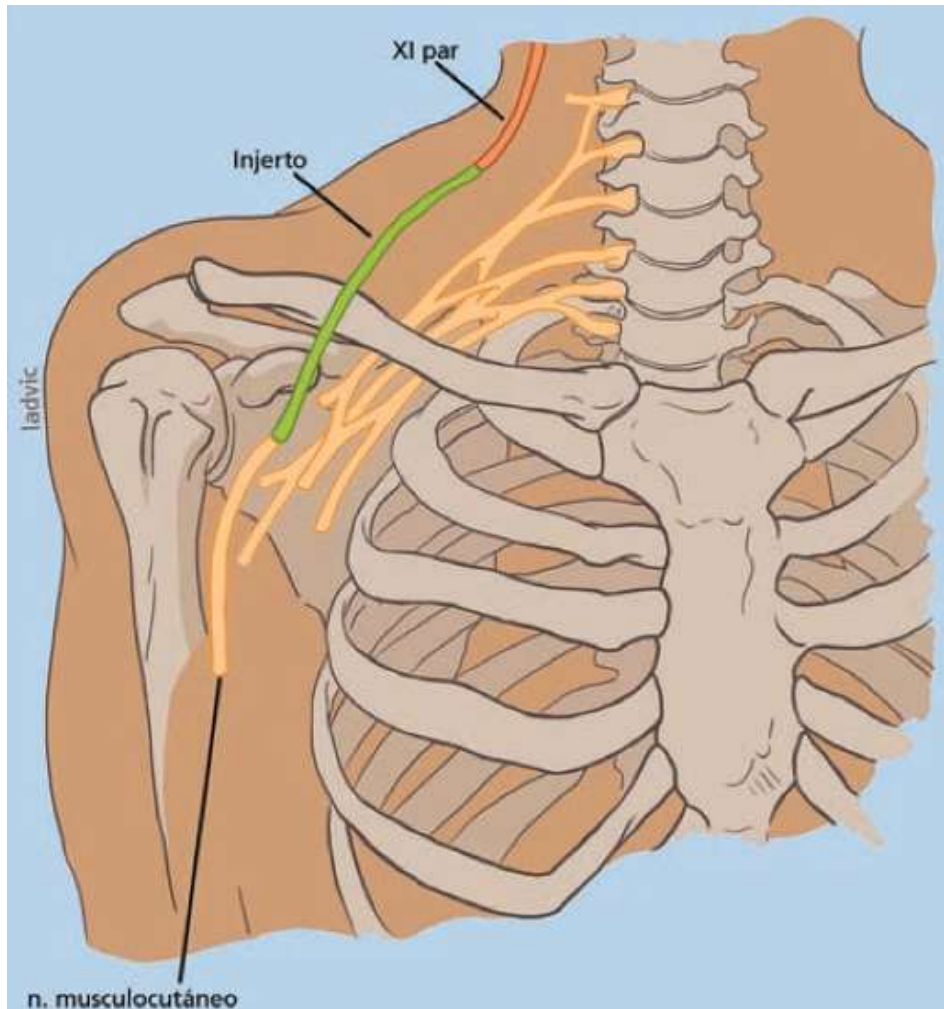


Figure 11. Spinal accessory nerve to musculocutaneous nerve transfer through long graft of sural nerve. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et to the. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexal nerve transfers. Neurocirugía (Astur) 2011; 22:507-20.

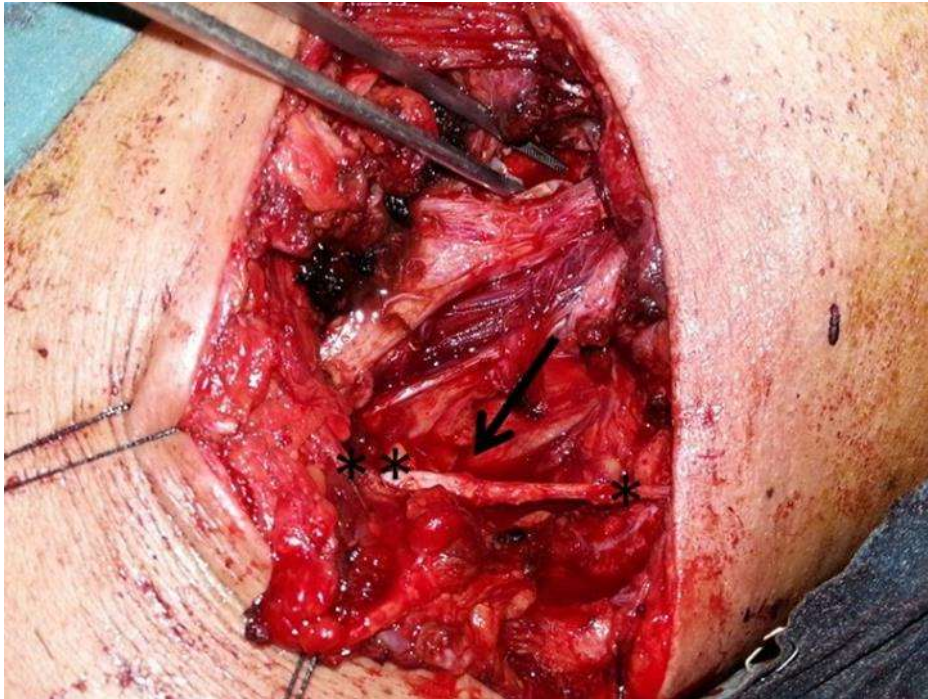


Figure 12. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Avulsion of all roots after trauma by brachial plexus traction. Extraplexual, spinal accessory nerve to the suprascapular nerve transfer. *: spinal accessory nerve, **: suprascapular nerve, arrow: direct neurorrhaphy.

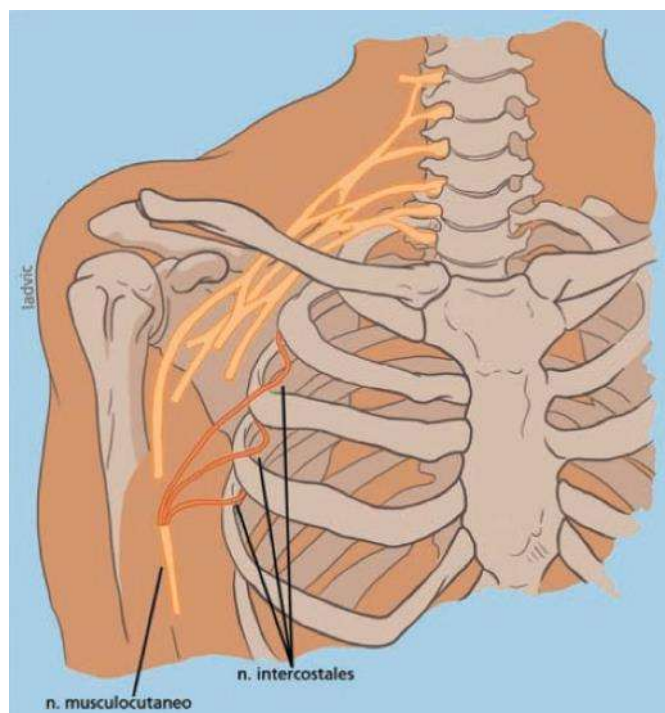


Figure 13. Direct transfer of intercostal nerves to musculocutaneous nerve. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexual nerve transfers. *Neurocirugía (Astur)* 2011; 22:507-20.

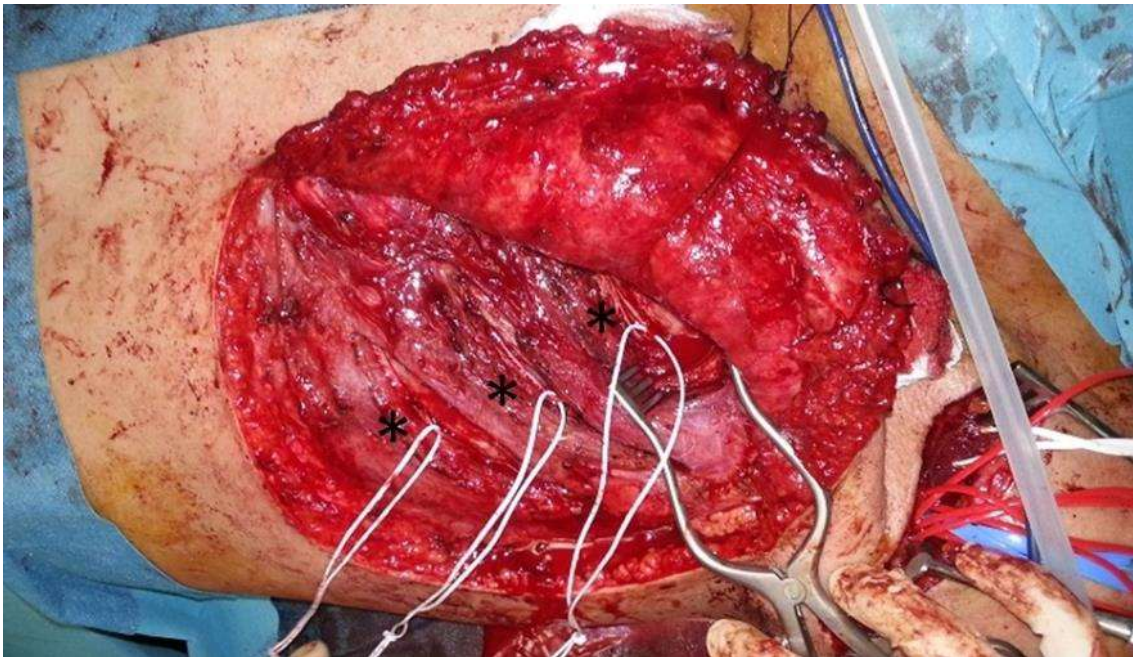


Figure 14. Same patient as in Figure 12. Extraplexal, three nerves intercostal to musculocutaneous nerve transfer. Deltopectoral and transpectoral approach. *: intercostal nerves.

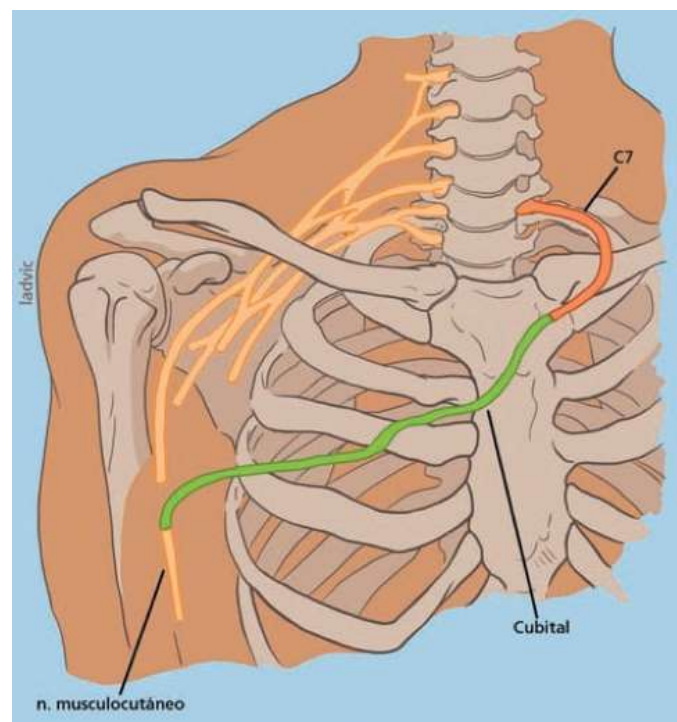


Figure 15. The contralateral C7 root to musculocutaneous nerve transfer. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexal nerve transfers. Neurocirugía (Astur) 2011; 22:507-20.

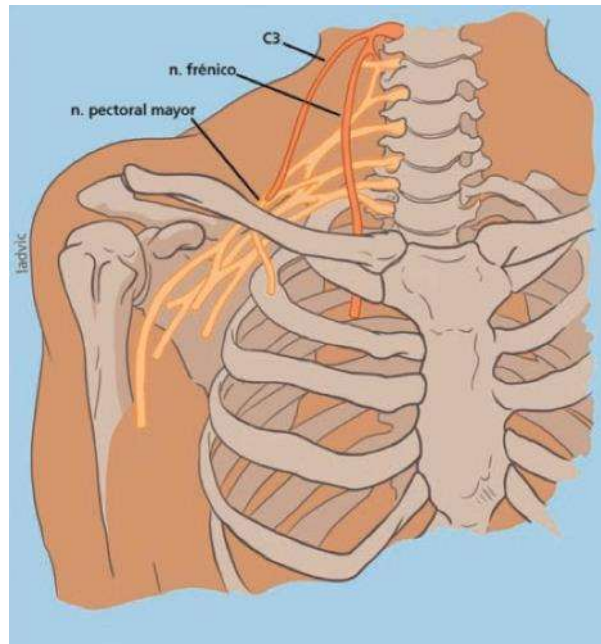


Figura 16. C3 root transfer to pectoral nerve. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexal nerve transfers. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

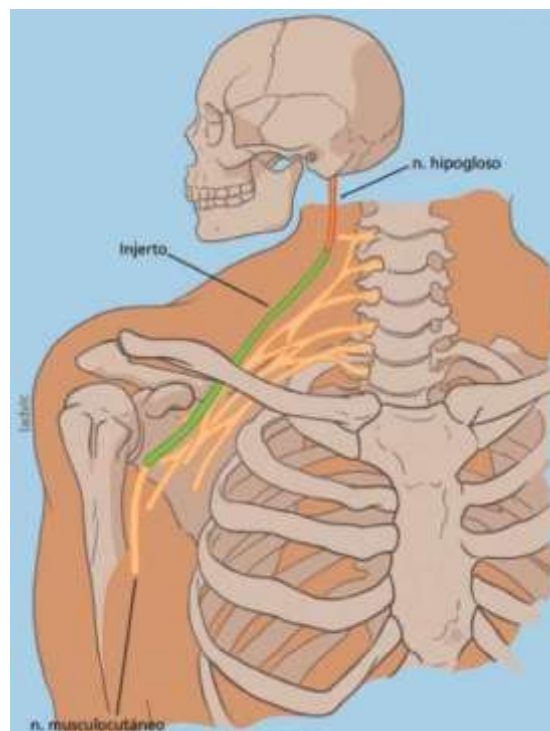


Figure 17. Transfer of the hypoglossal nerve in the musculocutaneous nerve. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexal nerve transfers. Neurocirugía (Astur) 2011; 22:507-20.

1.3.3. The phrenic nerve as donor.

The phrenic nerve is a terminal branch of the cervical plexus, formed by the anterior branch of C4 and a variable contribution of anterior branches of C3 and C5, as well as an accessory phrenic nerve in more than 50% of the cases⁶². It is a pure motor nerve, which a priori makes it an excellent option as axon donor in avulsion lesions of the brachial plexus. Nevertheless, many authors favour other options of neurotization, as they deem unacceptable the risk of damage of the respiratory function when sacrificing the phrenic nerve¹¹⁹. The vast majority of research using this technique correspond to Asian surgeons, while some Western authors do not even mention them as an option in their work^{9,78,92,128} (figure 18).

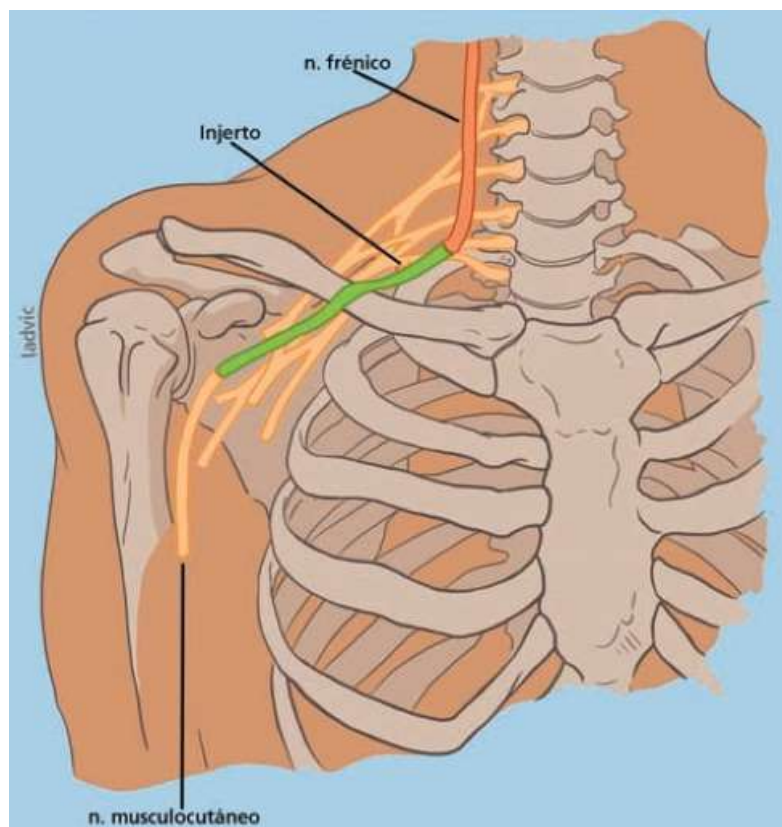


Figure 18. The musculocutaneous nerve to phrenic nerve transfer through long graft of sural nerve. Taken from: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Nerve reconstruction in traumatized brachial plexus surgery techniques. Part 1: extraplexal nerve transfers. Neurocirugía (Astur) 2011; 22:507-20.

The first author who suggested the phrenic nerve as a donor was Lurje in 1948⁶⁴. However, this technique started to be used in China in the seventies. Gu published the first case series in 1989³⁴. In 1996, this author had already transferred the phrenic nerve in 65 patients (to the musculocutaneous nerve in 49 cases). He obtained a motor balance of three or more at the MRC in 77% of cases. He related the delay of the surgery to the prognosis, with an average of 290 days in cases with a good outcome, and an average of 656 days in less successful cases³³. If later publications are studied, a rate of approximately 75% success is observed, with the neurotization of the

musculocutaneous, suprascapular, axillary, median nerves and the anterior division of the superior primary trunk. The rate of respiratory complication with a clinical relevance is 0% if patients to whom the transfer of the phrenic nerve together with intercostal nerves was performed are excluded^{15,19,23,60,63,83,108,113,122,123,141-143,147-149}.

The phrenic nerve has nearly twice the amount of motor axons than the distal portion of an intercostal nerve. Therefore, when performing a transfer of intercostal nerves, two or three are almost always used^{83,108}. For that reason, this technique requires significantly more time. According to Liu's comparative research⁶¹, results when restoring the flexion of the elbow are better when the phrenic nerve is used, without statistical significance. The aesthetic impact when transferring intercostal nerves is much greater than when the phrenic nerve is used (figure 19).

Among the limitations of the phrenic nerve transfer we can mention its contraindication for patients under three years of age⁹⁴, the possibility of the nerve being damaged because of high root avulsion, a patient showing a poor respiratory situation in the context of a multiple trauma, and the risk of the combination of this technique with the transfer of intercostal nerves, although some authors perform that joint technique¹⁴⁷.

Nowadays, the use of the phrenic nerve appears to be a useful option when restoring the flexion of the elbow, although this technique is not spread among all surgeons. Additionally, it seems to be a good option for the neurotization of nerves such as the suprascapular, axillary and median, although there is less experience in those fields.

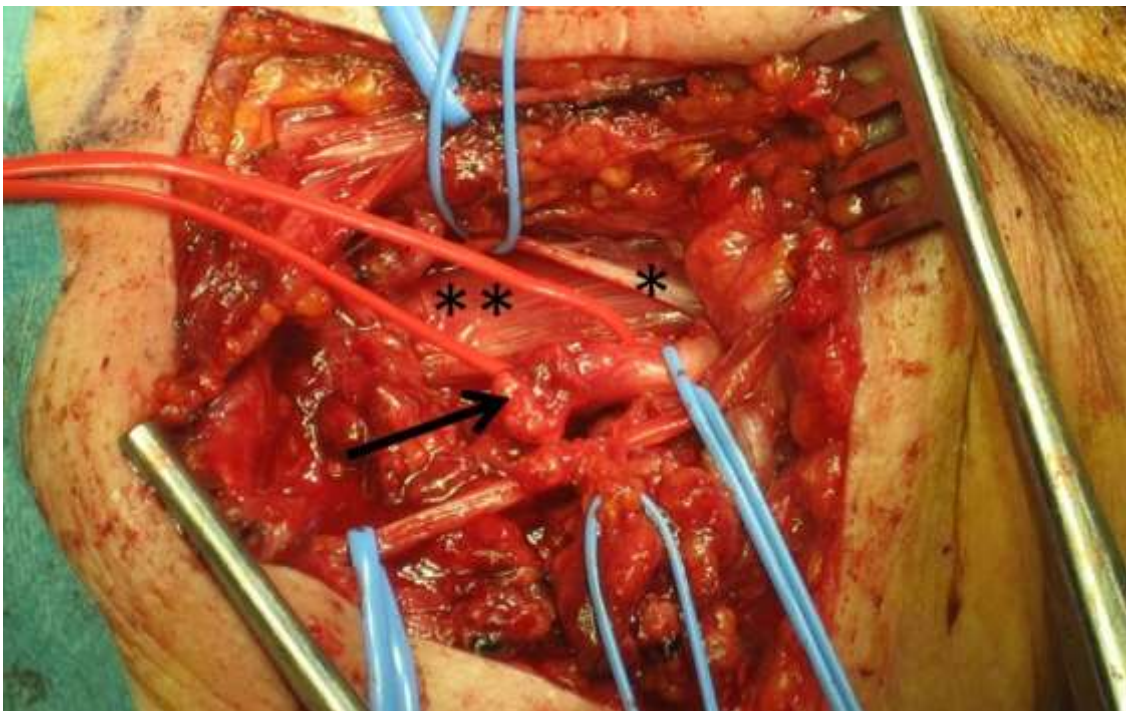


Figure 19. Patient was operated in the Neurosurgery Service of the Regional University Hospital of Málaga. Traumatic upper primary trunk section. Image of surgical exploration. Through a standard supraclavicular approach the phrenic nerve is easily exposed on its way above the anterior scalene muscle. *: phrenic nerve, **: anterior scalene muscle, arrow: upper primary trunk section.



Figure 20. Same patient as in Figure 11 and 12. Supraclavicular tissue damage due to the trauma by traction, secondary fibrous reaction and the consequent anatomical distortion made it impossible to locate the phrenic nerve. The tip of the surgical clamp designates a necrotic cavity in the anatomical area of the anterior scalene muscle, where you should locate the phrenic nerve.

1.4 Hypothesis

Stretch lesions of the brachial plexus in adults, whether they are complete or nearly complete, are devastating for the functionality of the upper limb in the long term. They involve a great damage on the patient's quality of life.

The objective of brachial plexus surgery must be to minimize these consequences. However reconstruction possibilities are limited. Among the therapeutic techniques, we can distinguish between reconstruction using grafting (when there are non-avulsed proximal stumps) and extra-plexal nerve transfer (when roots are avulsed).

In the latter group, the transfer of the accessory spinal nerve and the transfer of intercostal nerves are highly accepted. Nonetheless, the transfer of the phrenic nerve is still not considered a good option by many surgeons, especially because sacrificing the phrenic nerve involves a risk of diaphragmatic paralysis. This work expects to reflect the efficiency and reliability of this extraplexal transfer in adult patients with devastating lesions of the brachial plexus, with the aim of increasing its (limited) therapeutic armoury.

From the data presented above, it is suggested as a working hypothesis that the transfer of the phrenic nerve in adults with C5-C6-C7-C8 and C5-C6-C7-C8-D1 brachial plexus stretch lesions allows for restoring the function of the neurotized nerve in an efficient and reliable manner.

2. Objectives

2.1 Main objective:

- To establish the rate of success and complication of the transfer of the phrenic nerve in adult patients with brachial plexus stretch lesions on C5-C6-C7-C8 and C5-C6-C7-C8-D1.

2.2 Specific objectives:

- To describe the epidemiological and clinical characteristics of the population
- To compare two groups of patients: one in which the transfer of the phrenic nerve was considered successful, on one in which it was not. The following variables will be analysed: age, sex, weight, height, body mass index (BMI), overweight, time lag between traumatism and surgery, cause of the traumatism, expanse of the nerve lesion, length of the grafts used for the transfer, follow-up time of the patient and rating on the scale of adherence to the rehabilitation treatment.
- To compare the rate of success and complication of phrenic nerve transfer to the published historical series about this procedure.

3. Methods

3.1 Study design

Observational, cross-sectional, retrospective, descriptive and analytical study, about a series of adult patients undergoing a phrenic nerve transfer as treatment for a stretch lesion of the brachial plexus.

3.2 Selected population

276 traumatic lesions of the brachial plexus with surgical intervention were reviewed, from January 2004 until December 2013, at the Peripheral Nerves and Brachial Plexus Surgery Unit at the Neurosurgery Service in the University Hospital of Buenos Aires, Argentina. Only adult patients with severe brachial paralysis (C5-6-7-8 and C5-6-7-8-D1) who had undergone an extraplexal transfer of the phrenic nerve were included retrospectively in this study. Patients under 14 years of age, or with a follow-up time lesser than 18 months, or with amputations on the upper limbs, were excluded from the series. A signed informed consent was obtained from each patient. Clinical, demographic and surgical variables were registered, in order to define the series of patients and assessing those variables with a possible prognosis interest for the success of the technique.

3.3 Working protocol

The patients' pre-surgical assessment included: neurophysiological study (ENoG and EMG), respiratory function study and myelogram by MR. Only patients without practicable roots in pre-surgical studies, and after the intraoperative findings which confirmed the avulsion of the roots which form the brachial plexus were considered candidates for an extraplexal nerve transfer.

The surgical technique included a standard supraclavicular approach through an incision parallel to the collarbone, 1.5cm above it, allowing for the complete display of the supraclavicular brachial plexus (C5-C6-C7 roots, upper and middle primary trunk, anterior and posterior divisions of the upper and medium primary trunk, and suprascapular nerve), the phrenic nerve and the accessory spinal nerve. When the structure subject to a neurotization was the anterior division of the upper primary trunk (ADUPT), with the aim of restoring the flexion of the elbow, a short autograft of the sural nerve was used in cases when direct neurotization without tension was not possible. In cases where the structure subject to neurotization was a more distal nerve, a second approach was made through a longitudinal incision at the axillary caudal edge and the internal bicipital groove, until displaying the musculocutaneous nerve or the biceps branches (in order to restore the flexion of the elbow), the radial nerve or triceps branches (in order to restore the extension of the elbow), the pectoral nerve (in order to restore the adduction of the arm), or the axillary nerve (in order to restore the abduction of the arm). In cases where a distal nerve structure was neurotized, a long sural nerve autograft was always necessary. When it was decided to restore a concrete function with the transfer of the phrenic nerve, no other reconstructive procedure which could help to the restitution of such function was carried out.

Postoperative follow-up was carried out through quarterly examinations during a minimum of 18 months. Each patient was included in an intensive rehabilitation programme which started three weeks after surgery. The adherence to this treatment was monitored using a previously published scale¹¹¹ (table 1), which assesses the degree of adherence from one to four. The MRC scale was used in order to establish the degree of strength achieved by the muscle which function was expected to restore. Degrees three and over were considered a good result, while degrees two or under were a bad result. During the follow-up, all patients underwent a questionnaire with the purpose of identifying respiratory problems which derived from sacrificing the function of the phrenic nerve (table 2). In case of suspected respiratory involvement, respiratory function studies were requested in order to measure the damage objectively.

Table 1. Level of adherence to the rehabilitation treatment

<p>Description of the score:</p> <ul style="list-style-type: none"> -1. No rehabilitation or less than one session per week. -2. Rehabilitation more than once per week, but not in Center specializing in neuro-rehabilitation. -3. Good adhesion to full rehabilitation program, but not in a centre specialising in Neurorehabilitation; periodically evaluated at a Center specializing in neuro-rehabilitation. -4. Perfect adherence to the rehabilitation program full at a Center specializing in neuro-rehabilitation.

Table 2. Control questionnaire to identify respiratory problems

<p>Description of the score:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Do you feel difficulty breathing while lying on the bed? -You can get out of bed, bathing and dressing without shortness of breath? -You can run 300 meters without stopping for air? You can climb three flights of stairs without pausing for air?
--

3.4 Definition of variables

3.4.1 Main variables

The main variables of the study were the results of the nerve transfer and the respiratory complications which derived from it.

Results of the nerve transfer:

Several groups were made according to the MRC score obtained during the follow-up:

- Patient group with an MRC 1 score.
- Patient group with an MRC 2 score.
- Patient group with an MRC 3 score.
- Patient group with an MRC 4 score.

During the follow-up, patients who displayed an MRC score of three or over in the neurotized muscle using the phrenic nerve were considered a good result.

During the follow-up, patients who displayed an MRC score of two or under in the neurotized muscle using the phrenic nerve were considered a poor result.

Respiratory complications:

Any respiratory symptoms observed during the follow-up which appeared on the assessment questionnaire were considered respiratory complications.

3.4.2 Variables with a prognosis interest in the results of the transfer

According to what was previously described in literature (110), the following were considered variables with a prognosis interest in the results of the transfer: age, sex, weight, height, BMI, overweight, time lag between traumatism and surgery, cause of the traumatism, expanse of the nerve lesion, length of the grafts used for the transfer, follow-up time of the patient and rating on the scale of adherence to the rehabilitation treatment.

Age: The patient's age was registered at the time of the surgery, and several groups were made according to their age, in order to outline the demographic characteristics of the sample:

- A group of patients between 14 and 19 years of age.
- A group of patients between 20 and 29 years of age.
- A group of patients between 30 and 39 years of age.
- A group of patients aged 40 and over.

The influence of the average age in the results of the nerve transfer was assessed.

Sex: The influence of the patient's sex in the results of the nerve transfer was assessed.

Height: The influence of the average height in centimetres in the results of the nerve transfer was assessed.

Weight: The influence of the average weight in kilograms in the results of the nerve transfer was assessed.

BMI: The influence of the average BMI in the results of the nerve transfer was assessed.

Overweight: Several groups were made according to the weight of the patients, in order to outline the demographic characteristics of the sample:

- A group of patients with a normal weight (BMI 25 or under).
- A group of patients with overweight (BMI 25-30).
- A group of obese patients (BMI above 30).

The influence of the being overweight or not in the results of the nerve transfer was assessed.

Time lag between traumatism and surgery: Several groups were made according to the time lag between traumatism and surgery, in order to outline the demographic characteristics of the sample:

- A group of patients operated during the first 6 months.
- A group of patients operated between the sixth and the twelfth month.
- A group of patients operated after the twelfth month.

The influence in the results of the nerve transfer of the average surgical time lag in months was assessed.

Cause of the traumatism: Several groups were made, in order to outline the demographic characteristics of the sample:

- A group of patients who had suffered a motorbike accident.
- A group of patients who had suffered a car accident.
- A group of patients who had suffered a different type of accident.

The influence in the results of the nerve transfer of whether or not the patient had suffered a motorbike accident was included in the study.

Expansión of the lesion: The influence in the results of the nerve transfer of whether or not the lesion of the plexus was complete (C5-T1) was included in the study.

Length of the grafts used: The influence in the results of the nerve transfer of the average length in centimetres of the graft was included in the study.

Follow-up time of the patient: The influence in the nerve transfer results of the average postsurgical follow-up in months was included in the study.

Adherence to the rehabilitation treatment: Several groups were made according to the score obtained in the scale of adherence to the rehabilitation treatment:

- A group of patients with a score 1.
- A group of patients with a score 2.
- A group of patients with a score 3.
- A group of patients with a score 4.

The influence in the nerve transfer results of the adherence to the treatment was included in the study.

3.4.3 Variables of surgical interest

Neurotized nerve structure: Several groups were made according to the nerve structure which had received the transfer of the phrenic nerve:

- Musculocutaneous nerve.
- Anterior division of the upper primary trunk (ADUPT).
- A different nerve structure.

Location of the distal neurorrhaphy: Several groups were made according to the location of the neurorrhaphy between the graft and the neurotized nerve structure:

- Trunk division.
- Cord.
- Peripheral nerve.

3.5 Comparison between the results and complications and historical series

A comparison between the current series and 15 selected historical series was made, assessing the rate of successful results and the rate of complications of the phrenic nerve transfer.

3.6 Processing and analysis of data

The data collection was carried out using Microsoft Excel 2008 software (Microsoft Inc., Redmond, WA, USA). The analytical study was made using the SPSS Statistics 15.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago IL, USA) statistical programme.

Two types of statistical analysis, descriptive and inferential, were conducted:

- Descriptive: including mean and standard deviation for each quantitative variable and percentage for each qualitative variable.
- Inferential: prior to choosing the appropriate statistical assessment for the inferential analysis, each variable went through the Kolmogorov-Smirnov test in order to confirm the normality. Each variable went through Levene's test in order to assess the equality of variances.

In order to compare the group of patients with good results and the group of patients with poor results, the selected variables with prognosis interest went through the comparative analyses described down below, depending on the characteristics of each variable.

- Qualitative variables: Pearson's chi-squared (χ^2) test.
- Quantitative variables: Student's *t*-test.

4. Results

4.1 Demographic and clinical description of the series

51 from the 271 patients analysed complied with the study's inclusion criteria. From the sample, men were the main group. The main age group was 20-29 years of age group, with 60.8%. Nearly 60% of patients had a normal weight, while the rest were overweight (n=19) or obese (n=2). The traumatic mechanism was the motorbike

accident in all cases, except on 4 of them. Three quarters of patients had a complete brachial plexus lesion (C5-T1), and the rest had a near-complete lesion (C5-C8). All patients displayed avulsion of the affected roots (table 3).

4.2 Surgical description

The average time lag between traumatism and surgery was 5.7 months (standard deviation of 3.5), with a range of 1 to 24 months; 40 patients (78%) underwent reconstructive surgery during the first 6 months, 9 patients (18%), did between month 6 and month 12, and 2 patients (4%) after 12 months. The most common nerve subject to neurotization with the phrenic nerve was the musculocutaneous nerve (n=21, 41%), followed by the anterior division of the upper primary trunk (n=11, 22%). The majority (68.6%) of the grafts were coapted to a phrenic nerve, while the rest were coapted to any of the structures which form the brachial plexus, more specifically, 25.5% to the divisions and 5.9% to the cords.

4.3 Description of the results and follow-up of the series

The average postsurgical follow-up was 32.5 months, ranging from 18 to 57 months. Motor recovery of the neurotized muscle commenced with slight movements related to deep inhalation. During the following 4 to 9 months, the movement became more apparent, but it was still related to breathing (“the breathing arm”). Eventually, after this period, the movement became independent from breathing. Regarding the motor assessment noted in patients, 32 out of 51 (62.7%) developed an MRC score of 4. 11 patients (21.6%) developed an MRC score of 3. 2 patients (3.9%) developed an MRC score of 2. And 6 patients developed an MRC score of 1 (11.8%). An MRC score of 3 or above was considered a successful result, achieved by 43 out of the 51 patients (84.3%). In the scale of adherence to the rehabilitation treatment, 10 patients achieved level 4 (19.6%). 20 patients achieved level 3 (39.2%). 16 patients achieved levels 1 or 2 (31.4%). Only 2 patients developed respiratory symptoms. Both patients had lesions on the right brachial plexus. The first one was an obese, 31 year old male who suffered from dyspnea when running or climbing stairs. The second one was an overweight, 48 year old female presenting the same symptoms. Both patients presented an impaired vital capacity around 20% during the first months. However, after 2 years, this impairment was reduced to 10% and symptoms disappeared (table 4).

Table 3. Clinical and demographic characteristics of the population

	N	%
Sample Size	51	
Males	47	92.2%
Age at time of surgery (years)		
< 20	7	13.7%
20-29	31	60.8%
30-39	8	15.7%
≥ 40	5	9.8%
Weight by BMI		
Normal	30	58.8%
Oberweight	19	37.3%
Obesity	2	3.9%
Lesion extension		
C5-D1	39	76.5%
C5-C8	12	23.5%
Cause of trauma		
Motorcycle accident	47	92.2%
Car crash	3	5.9%
Another	1	2.0%

Table 4. Surgical series description

	N	%
Delay between trauma and surgery		
< 6	40	78%
6-12	9	18%
> 12	2	4%
Neurotized nerve structure		
Musculocutaneous	21	41.2%
DATPS	11	21.6%
Another	19	37.3%
Level of coaptation of the graft		
Division	13	25.5%
Lace	3	5.9%
Peripheral nerve	35	68.6%

4.4 Inferential analysis between groups with good and bad results

There were no significant statistical differences between the two groups regarding the following variables: average age, percentage of females, average height in centimeters, average weight in kg, BMI, overweight percentage, time lag between traumatism and surgery in months, percentage of motorbike accidents, percentage of complete lesions and follow-up time in months.

There were significant statistical differences between the two groups regarding the following variables: average length of the graft (9.8cm vs 15.1cm, groups with good and bad results, respectively, $p=0.01$), and the score in the scale of adherence to the rehabilitation treatment (2.86 vs 2, groups with good and bad results, respectively, $p=0.01$) (table 5 and 6).

Table 5. Monitoring and results of series

	N	%
Tracking		
Average of 32.5 months		
Range of 18-57 months		
Strength of the MRC scale		
M1	6	11.8%
M2	2	3.9%
M3	11	21.6%
M4	32	62.7%
Overall result		
Good	43	84.3%
Bad	8	15.7%
Adherence to the rehabilitation treatment score		
1	4	7.8%
2	16	31.4%
3	20	39.2%
4	10	19.6%
Respiratory symptoms	2	3.9%

Table 6. Comparison between group's good results and bad results

	Good result	Bad result	Test	Significance
N	43	8		
Median Age (years)	27.2	22.8	t = 1.37	p = 0.18
Female (%)	9.3%	0.0%	$\chi^2 = 0.81$	p = 0.37
Median height (cm)	168.7	170.4	t = 0.46	p = 0.65
Median weight (kg)	69.4	72.3	t = 0.68	p = 0.50
Median BMI	24.4	24.7	t = 0.28	p = 0.78
Overweight (%)	50.0%	39.5%	$\chi^2 = 0.31$	p = 0.58
Average delay surgery (months)	5.4	7.3	t = 1.43	p = 0.16
Motorcycle accidents (%)	90.7%	100.0%	$\chi^2 = 0.81$	p = 0.67
C5-D1 (%)	74.4%	87.5%	$\chi^2 = 0.64$	p = 0.42
Graft-average length (cm)	9.8	15.1	t = 2.90	p = 0.01
Median follow-up (months)	32.7	31.0	t = 0.31	p = 0.76
Medium adhesion rehabilitation	2.86	2.00	t = 2.67	p = 0.01

4.5 Comparison of results and complications with historical series

15 historical series were selected^{15,19,23,33,60,63,83,108,113,122,133,141,143,147,149}, a total of 263 patients with traumatic lesion of the brachial plexus who underwent a transfer of the phrenic nerve. 197 patients (75%) had a successful result, ranging from 29 to 100%.

Respiratory consequences of the technique were stated in 11 cases. The majority of patients presented some alteration in respiratory function tests. However, they only showed symptoms in cases where, in addition to the phrenic nerve, intercostal nerves were transferred (most of them for a transitional period and with great effort). Excluding works where the transfer of the phrenic nerve was conducted together with intercostal nerves^{33,147,149} and works where complications were not specified^{19,23,83,133}, the number of patients is 108 and the rate of respiratory complications is zero.

No significant statistical differences were found in the rate of good results between the historical series and the present series (p=0.15).

Significant statistical differences were found in the complication rate between the historical series and the present series (p=0.038).

Evaluating historical and present series data, the success rate of the technique is 76.43%, whereas the complication rate is 1.2%.

Table 7. Good results, comparison between historical and current series.

Tabla de Frecuencias de Resultado (filas) por Muestra (columnas)				
Número de Casos: 314				
Muestra	H	A	Total	
Resultado			Fila	
E	197 62.74	43 13.69	240 76.43	
F	66 21.02	8 2.55	74 23.57	
Total	263	51	314	
Columna	83.76	16.24	100.00	
Chi-Cuadrado de Resultado (filas) por Muestra (columnas)				
Tamaño Muestral:	314			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	2.0993			
G.L.:	1			
p-valor:	0.1474			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	0 de 4, un 0.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	0 de 4, un 0.0000%			

H: Historical series, A: Current series, E: Successes, F: Failures.

Table 8. Complications, comparison between historical and current series.

Tabla de Frecuencias de Complicaciones (filas) por Muestra (columnas)				
Número de Casos: 159				
Muestra	H	A	Total	
Complicaciones			Fila	
N	108 67.92	49 30.82	157 98.74	
S	0 0.00	2 1.26	2 1.26	
Total	108	51	159	
Columna	67.92	32.08	100.00	
Chi-Cuadrado de Complicaciones (filas) por Muestra (columnas)				
Tamaño Muestral:	159			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	4.2892			
G.L.:	1			
p-valor:	0.0384			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	2 de 4, un 50.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	1 de 4, un 25.0000%			

H: Historical series, A: Current series, N: No complications, S: Complications.

5 Discussion

5.1 Success of the technique

The phrenic nerve and the brachial plexus have a common embryological origin. It is a pure motor nerve and owns more than three times the number of motor axons than an intercostal nerve (800-1750 vs 200)^{83,108}. Its location allows for an easy display during a supraclavicular approach to the brachial plexus. This permits the transfer without graft to proximal nerve structures⁶³. If the nerve subject to neurotization is a distal nerve, the transfer without graft has been described after an intra-thoracic dissection with thoracoscopy^{142,143}. However, this technique could involve the contribution of the accessory phrenic nerve. These features make the phrenic nerve a perfect option for an extraplexal nerve transfer.

Results of the success rate (84%) and complication rate (3.9%) of the assessed 51 patient series solidly reflect the efficiency and reliability of the phrenic nerve transfer in adult patients suffering a traumatic brachial paralysis. This success rate is similar to the one which appears in previous literature^{15,19,23,33,60,63,83,108,113,122,133,141,143,147,149}.

Only two of the assessed variables were statistically significant as success predictors of the nerve transfer. The first variable was the length of the graft, with an average of 9.8 cm in the good result group, versus the 15.1 cm of the group showing a poorer evolution. These results diverge with other works previously published¹¹¹, which state that long grafts would theoretically prevent the dispersion of growing axons. This would favour the clinical result by allowing the axons to reach the neurotized neuromuscular structure more precisely. The second variable was the rate of adhesion to the rehabilitation treatment, which results have been stated in previous work¹¹¹.

Although age and time lag between traumatism and surgery did not show statistically significant differences, a trend of success of the technique was evident in older patients with a shorter time lag. The time lag between traumatism and surgery had already been described as a prognosis factor by Gu in 1984³⁴. Liu⁶⁰ did not find differences between using grafts or not, but did state a surgical time lag of more than 4 months as a predictor for a poor result of the technique (table 9).

A confounding factor which could have affected the series results was the existence of a prefixed plexus. A contribution of the C4 root could have provided axons to the muscles neurotized by the phrenic nerve. However, some facts are in favour of a sole reinnervation at the expense of the phrenic nerve. One fact is the “breathing arm” as the first clinical demonstration of innervation. Another fact is cutting beforehand, preventing the growth of axons for a hypothetical contribution of C4, in order to conduct the neurotization of the anterior division of the upper primary trunk. Moreover, according to previous literature, the rate of prefixed plexuses is around 25% of general population. The contribution is less than 5% of the total number of axons which form the suprascapular, axillary and musculocutaneous nerves^{43,89}.

Table 9. Historical series

Author, publication year	Number of patients	Neurotized structure	Result MRC 3 or better	Respiratory complications
Songcharoen, 1995	12	Suprascapular Axillary Musculocutaneous	75%	Asymptomatic 9.4% reduced CV
Chuang, 1995	37	Suprascapular Axillary	59.4%	Non specify symptoms
Gu, 1996	65	Musculocutaneous	77%	A 5 year old patient with transient breathing problems* CPT and CV diminished one year later regarding normal values
Sungpet, 2000	10	Suprascapular	100%	Asymptomatic
Luedemann, 2002	12	Musculocutaneous	92%	Asymptomatic CV diminished 14.3% right side, 3.6% left side
El-Gammal, 2002	4	Musculocutaneous	100%	Non specify symptoms
Xu, 2002	11	Musculocutaneous	73%	Asymptomatic Respiratory function tests one year later were similar regarding pre-surgery test
Chalidapong, 2004	17	Musculocutaneous	29%	Asymptomatic Respiratory function tests decreased one year later regarding pre- surgery test
Vekris, 2006	17	Musculocutaneous	100%	Non specify symptoms
Monreal, 2007	20	Musculocutaneous	70%	Non specify symptoms
Siqueira, 2009	10	Musculocutaneous	70%	Asymptomatic CV diminished one year later, two years later only the CVF and CPT were decreased

Xu, 2008	3	Median	100%	Asyntomatic Respiratory function decreased up to 6 months and recovered after one year
Zheng, 2010 y 2012	12	ADUPT	75%	Symptoms with great efforts* Diminished, but not below the normal range,CVF, VEF and CPT
Liu, 2013	33	ADUPT	85%	Asyntomatic

* Symptoms in patients who were transferred also intercostal nerves.

5.2 Reliability of the technique

The main problem when considering the phrenic nerve as a donor in reconstructive surgery of the brachial plexus is the temporary or permanent risk of impairment of the respiratory function.

Luedemann⁶³, in his series of 12 patients, identified a statistically significant reduction in vital capacity (VC) only when the right phrenic nerve was used, without a clinical impact for the patients. He came to the conclusion that the use of the phrenic nerve is only contraindicated if preoperative maximum inspiratory pressure (PiMax) becomes reduced. Both patients suffering from respiratory problems from the series of our study had right brachial plexus lesions. However, the size of the sample is too small to conduct a statistical assessment. Songcharoen¹¹³ studied 12 patients for 2 years, finding no respiratory signs or symptoms. Furthermore, 25% showed a normal diaphragmatic mobility on the affected side, and all respiratory function tests were normal, with the exception of a VC reduction of 9.4% (which eventually became normal before 24 months). Gu³³, in his series of 65 patients, described a drop of the VC and the total lung capacity (TLC) one year after the surgery, registering a significant improvement of the same parameters two years after the surgery. It is worth stressing that the only patient from the series who presented temporary respiratory symptoms had also undergone an intercostal nerve transfer. In the series of Siqueira¹⁰⁸, Sungpet¹²², Chalidapong¹⁵, Liu⁶⁰ and Xu^{141,143}, no patients who had undergone a phrenic nerve transfer registered respiratory signs or symptoms. Respiratory complications which appear in our study, 3.9%, diverge from previous publications, where the percentage of respiratory complications (excluding Gu³³) is zero. A reason for this can be the questionnaire created by our work team, which makes it difficult for a patient with symptoms to go unnoticed. Another reason can be the bias of removing series in which it was not specified if patients had respiratory symptoms or not^{19,23,83,133} from the statistical assessment.

When assessing the main works where phrenic nerve transfer is combined with the transfer of intercostal nerves, we can mention that Zheng (in his 2012 publication¹⁴⁷) observed a drop of forced vital capacity (FVC), forced expiratory volume (FEV) and TLC of 26.3, 28 and 25.2% respectively in his patients. This is linked to a rise of the affected diaphragm from 1 to 1.5 intercostal spaces in 90.5% of cases. Only 2% of patients showed symptoms related to physical efforts. Results were similar in the long term for the group of patients who underwent a phrenic nerve transfer and for the group of patients who underwent a combined transfer of phrenic nerve and intercostal nerves^{147,148}. Chuang²⁰, in his 19 patient series, described a 42% of patients suffering from dyspnea only during the first six months after surgery. However, TLC and FVC decreased by 8% permanently. Both Zheng's and Chuang's studies have been excluded from the previously assessed historical series, as previous works from both authors have already been included and there was a risk of assessing the same patients several times. About the reliability of using a combined transfer of the phrenic nerve and intercostal nerves, it is possible to conclude that there is little evidence in literature on this matter. If this procedure is conducted, it is recommended to perform it in two stages.

In other series where the phrenic nerve was damaged as a complication derived from a procedure unrelated to the reconstruction of the brachial plexus, such as cardiac ablation, the rate of symptomatic patients was substantially higher. 88% suffered from dyspnea, coughs and hiccoughs. The recovery time was 4-5 months, and symptoms

persisted in 16% of cases after three years^{3,16,99}. This contrast in the rate of complications corresponds to the patient's age and previous pathology. In the case of reconstructive surgery of the brachial plexus, patients were mostly young and healthy. The rest suffered from some cardiopulmonary pathology. Therefore, if a patient presents any alteration in the respiratory function tests, the phrenic nerve must not be used as a donor. Neither should it be used in the event of thoracic trauma, multiple costal fractures and/or lung contusions, at least until the patient has recovered from these pathologies. Obesity is another contraindication that should be considered.

The use of the phrenic nerve as donor is also contraindicated in children under the age of three, due to the severe complications which the loss of diaphragmatic function involves in these patients^{20,145}: a higher percentage of respiratory problems, thoracic deformities and intestinal disorders. This seems to be due to the late development of the accessory respiratory musculature, the paradoxical movements which involves a paralysis of the hemidiaphragm, the mediastinal hypermobility and the higher volume of respiratory secretions, among others^{36,105}.

As previously stated, sacrificing a patient's phrenic nerve with no underlying cardiopulmonary pathology has minimal effects in the respiratory function^{15,33,60,63,108,113,122,141,143}. Several factors can explain this fact:

- The presence of an accessory phrenic nerve⁶².
- The existence of compensatory mechanisms related to the increased activity of the accessory respiratory musculature^{4,28,96}.
- The "crossed phrenic phenomenon"^{29,30,59,85,134}.

5.3 Phrenic nerve transfer versus transfer of intercostal nerves

When conducting reconstructive surgery of brachial plexus lesions with avulsion of all roots of the accessory spinal nerve, it is common the use of the suprascapular nerve as donor, with the aim of recovering shoulder function. In this cases, the transfer of the phrenic nerve or intercostal nerves is used for recovering the flexion of the elbow.

When selecting the series in which the phrenic nerve was used for recovering the flexion of the elbow^{15,23,33,60,63,83,108,113,133,141,149} (including the series of this research), a total of 264 patients with a success rate of 77.6% is obtained.

When assessing the works which conducted a transfer between intercostal nerves to the musculocutaneous nerve¹¹², we obtain 823 patients with a success rate of 72.6%. Even though results seem to be better in the series of phrenic nerve transfers, there are no significant statistical differences between them ($p=0.11$) (table 10). Liu⁶¹, in his retrospective assessment of 33 patients, obtained a success rate of 83% for the phrenic nerve and 70% for intercostal nerves. In this case, there are no significant statistical differences either ($p=0.646$).

Table 10. Results phrenic versus intercostal

Tabla de Frecuencias de Resultado (filas) por FRENICO VS IC (columnas)				
Número de Casos: 1087				
FRENICO VS IC Resultado	F	I	Total Fila	
E	205 18.86	598 55.01	803 73.87	
F	59 5.43	225 20.70	284 26.13	
Total Columna	264 24.29	823 75.71	1087 100.00	
Chi-Cuadrado de Resultado (filas) por FRENICO VS IC (columnas)				
Tamaño Muestral:	1087			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	2.5792			
G.L.:	1			
p-valor:	0.1083			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	0 de 4, un 0.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	0 de 4, un 0.0000%			

F: Phrenic nerve, I: Intercostal neves, E: Successes, F: Failures.

6. Study limitations

The main limitations of this research are those related to a retrospective assessment and the comparison with historical series of literature on this matter.

7. Conclusions

Analysis in detail of the results obtained, we have drawn up the following conclusions:

1. Complete stretch lesions of the brachial plexus with avulsion of all roots require an early reconstructive treatment via extraplexal nerve transfers.
2. The transfer of the phrenic nerve for reconstructive surgery of the brachial plexus is an effective technique, with a success rate of 84% in the present series, and a success rate of 75% in previous series.
3. The rate of respiratory symptoms related to this technique is low, with a 3.9% in the present series. In historical series, functional respiratory tests almost always show disorders after the phrenicotomy, which diverges from the incidence of respiratory symptoms (0%).
4. A higher adhesion to the rehabilitation treatment and the use of a short graft in order to conduct the nerve transfer are statistically significant predictive factors in favour of the success of the technique.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1 Introducción

Las lesiones traumáticas del plexo braquial en el adulto son devastadoras, debido al profundo impacto económico y social de por vida que acarrearán las secuelas que generan al originar un importante grado de discapacidad^{17,93,140}. Actualmente los resultados del tratamiento quirúrgico, a pesar de los avances acontecidos en las últimas décadas, distan de ser ideales. No obstante, los resultados de la cirugía siguen siendo muy superiores a los alcanzados si ésta no se realiza, lo cual adquiere una importancia capital en un paciente que está sumamente discapacitado. Mención especial requieren las lesiones completas del plexo braquial con avulsión de las raíces que lo conforman, donde la regeneración espontánea es nula y la única opción de reparación quirúrgica sobre el plexo braquial son las transferencias nerviosas extraplexuales. Este procedimiento consiste en la anastomosis entre un nervio funcional (donante) y un nervio lesionado (receptor), con el fin de restituir la función perdida del receptor a expensas de sacrificar la del donante.

1.1 Anatomía quirúrgica del plexo braquial

El plexo braquial se origina a nivel de la columna vertebral y generalmente incluye los nervios raquídeos C5, C6, C7, C8 y T1, que a su vez se unen para constituir los troncos primarios superior, medio e inferior. De cada uno de ellos se origina una división anterior y posterior, que a su vez dan lugar a los cordones posterior, lateral y medial; originándose de estos últimos los nervios principales de la extremidad superior^{78,98}(figura 1).

1.1.1 Nervios raquídeos

Los nervios raquídeos se forman a nivel del neuroforamen vertebral por la unión de dos raíces que surgen de la médula: una raíz anterior (que porta axones motores somáticos y vegetativos) y una raíz posterior (que porta axones sensitivos). Anexo a esta raíz sensitiva, a nivel intraforaminal, se encuentra el ganglio dorsal, donde se alojan las neuronas pseudounipolares sensitivas.

Los arrancamientos radiculares se pueden dividir en dos grupos, preganglionares o postganglionares, en función de la localización proximal o distal al ganglio respectivamente. En el foramen vertebral la duramadre pasa a ser epineuro, conformándose el nervio raquídeo, que posteriormente dará lugar a dos ramos mixtos: uno posterior, que inerva los músculos paraespinales y la piel del dorso, y otro anterior, que se combinará con los adyacentes conformando el plexo braquial^{78,98}.

Deben tenerse en cuenta ciertas características anatómicas con relevancia en la fisiopatología de las lesiones por estiramiento del plexo braquial⁷¹:

- La raíz anterior y posterior, así como el inicio del nervio raquídeo, carecen de epineuro, lo cual aumenta su vulnerabilidad ante lesiones por tracción.
- El tránsito de duramadre a epineuro a nivel del neuroforamen suele desgarrarse en los arrancamientos producidos durante las lesiones por tracción, originando la fuga de líquido cefalorraquídeo y dando lugar a la formación de pseudomeningoceles.
- El nervio raquídeo no está anclado al canal intraforaminal, pero sí a las apófisis transversas cervicales a través de expansiones fibrosas que son mucho más importantes en las raíces altas (C5-6-7) y más laxas en las bajas (C8-T1)¹²¹. Esto se traduce en dos hechos: la porción más vulnerable a la lesión de las raíces es la intrarraquídea, y las raíces más susceptibles a la rotura por tracción son las bajas (C8-T1).

Cabe destacar que los nervios raquídeos establecen anastomosis con la cadena simpática cervical tras emerger del foramen vertebral. Esto explica la presencia del signo de Horner en las lesiones proximales de T1 y los trastornos vegetativos del miembro superior en lesiones proximales más amplias del plexo braquial (anhidrosis, sequedad de piel y trastornos vasomotores)⁹⁸.

Antes de que los nervios raquídeos se unan dando lugar a los tres troncos nerviosos, participan en la formación de tres nervios⁹⁸:

- Nervio frénico: recibe ramos motores de C3-4-5, inerva el diafragma ipsilateral (figuras 1 y 2).
- Nervio torácico largo: se forma tras la unión de ramos de C5-6-7, inerva al músculo serrato anterior.
- Nervio dorsal de la escápula: se forma exclusivamente de C5, inerva el músculo romboides mayor y menor.

La importancia de conocer la localización anatómica de estos nervios radica en que su afectación indica una lesión proximal del plexo braquial.

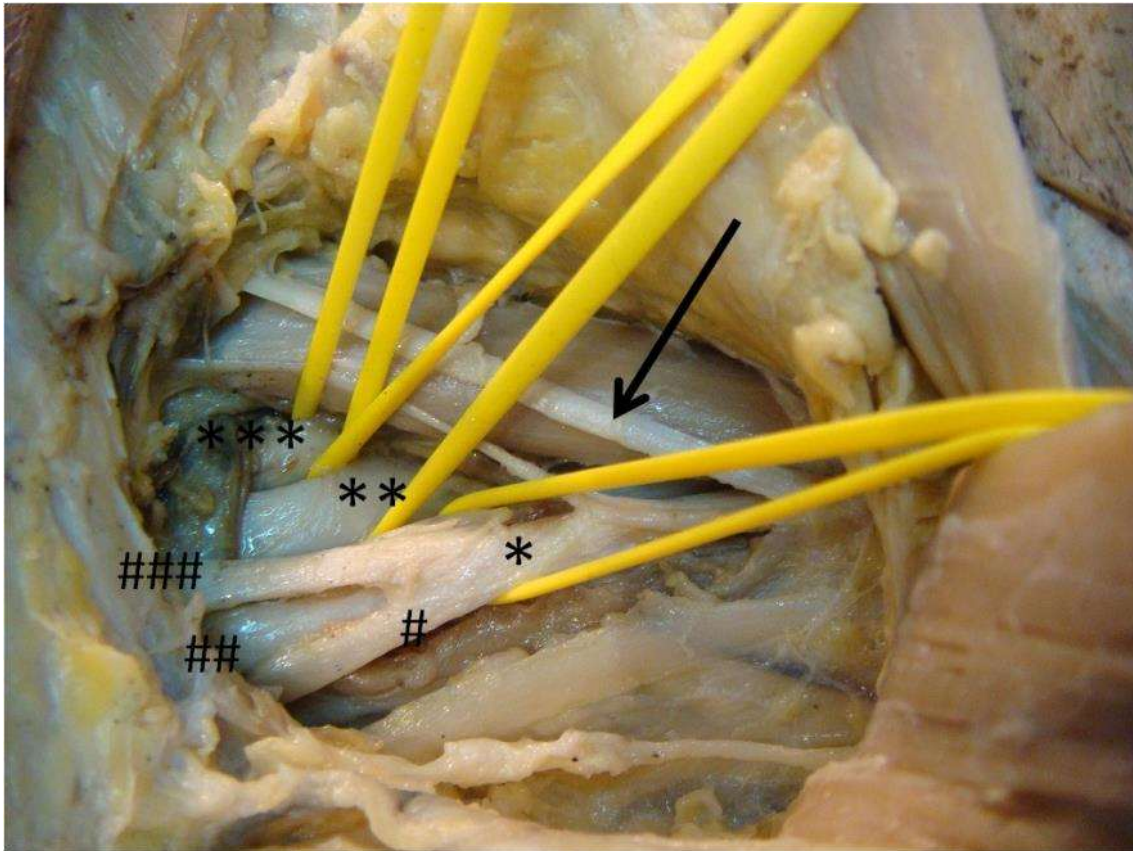


Figura 1. Diseción en cadáver. Abordaje supraclavicular al plexo braquial. *: tronco primario superior, **: tronco primario medio, ***: tronco primario inferior. #: nervio supraescapular, ##: división posterior, ###: división anterior, flecha: nervio frénico.

1.1.2 Troncos primarios

Los ramos anteriores de los mencionados nervios raquídeos se unen entre sí para formar los troncos primarios del plexo braquial. Los nervios raquídeos C5-6 se unen para formar el tronco primario superior, C7 constituye el tronco primario medio y C8-T1 conforman el tronco primario inferior; todos ellos localizados por encima de la clavícula y con un trayecto inicial entre los músculos escaleno anterior y medio.

Del tronco primario superior surge a nivel medial el nervio para el músculo subclavio, que puede confundirse con el nervio frénico. Si se continúa distalmente la disección del tronco se trifurca en tres estructuras, de lateral a medial: el nervio supraescapular que inerva a los músculos supraespinoso e infraespinoso, la división posterior y la división anterior.

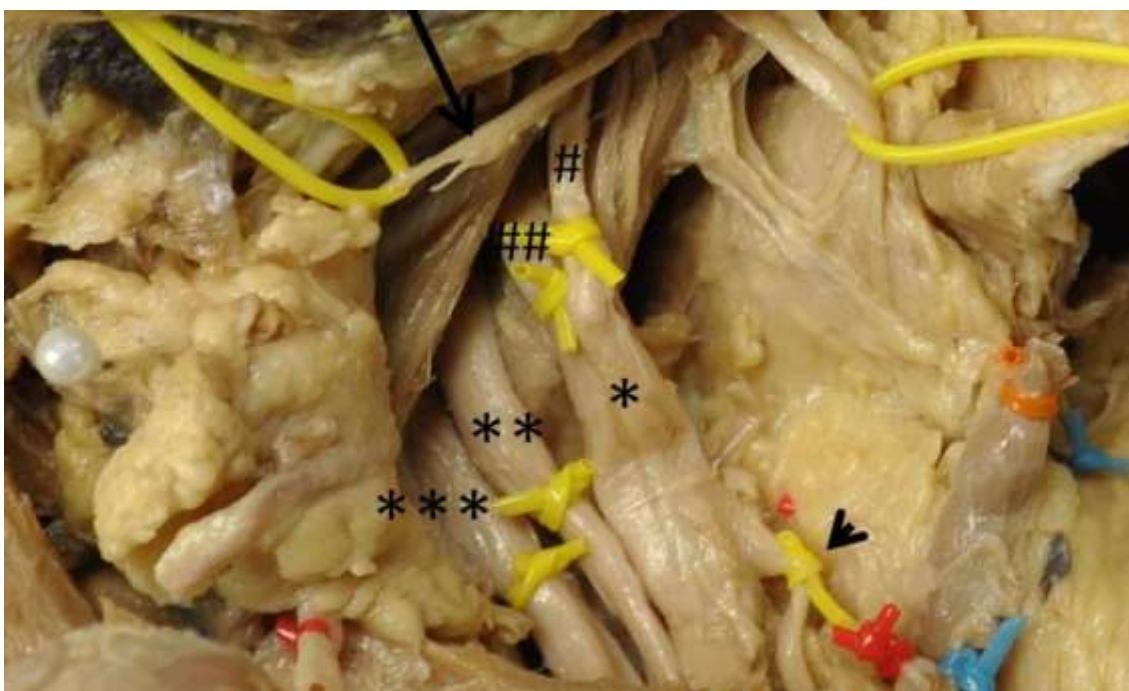


Figura 2. Diseción en cadáver llevada a cabo en la sala de disección de la Universidad de Málaga. Abordaje supraclavicular al plexo braquial. *: tronco primario superior, **: tronco primario medio, ***: tronco primario inferior, #: raíz C5, ##: raíz C6, flecha larga: nervio frénico, flecha corta: nervio supraescapular.

El tronco primario medio suele tener un calibre menor que el de los otros troncos, y es habitual que existan bastantes adherencias entre ellos. Su trayecto suele ser más horizontal respecto el tronco primario superior.

El tronco primario inferior es relativamente corto, y para su exposición suele ser necesaria la disección de la arteria subclavia. Es frecuente que esté cruzado por la arteria y vena escapular dorsal, que a su vez se relacionan anatómicamente a nivel lateral con las divisiones de los dos troncos anteriores.

1.1.3 Divisiones

De cada tronco primario surgen dos divisiones, una anterior y otra posterior, topográficamente por detrás de la clavícula. La división anterior del tronco primario superior y medio se unen dando lugar al cordón lateral, la división anterior del tronco inferior conforma el cordón medial.

Las tres divisiones posteriores se unen formando el cordón posterior.

Exponer las divisiones requiere de una disección supraclavicular de los troncos primarios hacia distal e infraclavicular de los cordones hacia proximal, además de movilizar la clavícula cráneo-caudalmente de forma alternante.

1.1.4 Cordones

La nomenclatura de los cordones: lateral, medial y posterior, viene determinada por la relación anatómica con la arteria axilar. Se localizan por debajo de la clavícula y para su exposición se requiere de la disección del músculo pectoral mayor y menor.

El cordón lateral suele ser el primer elemento neural que se expone en un abordaje infraclavicular. El primer ramo al que da lugar es el nervio pectoral lateral que inerva al músculo pectoral mayor. Finalmente se divide en dos estructuras, a nivel lateral en el nervio musculocutáneo, y a nivel medial en la contribución lateral del nervio mediano.

El cordón posterior se aborda con una disección latero-posterior a la arteria axilar. Inicialmente surgen varias ramas que constituyen los nervios subescapular superior e inferior (que inervan al músculo subescapular) y el nervio toracodorsal (que inerva al músculo dorsal ancho). Posteriormente el cordón posterior se divide en sus dos ramas principales, el nervio axilar y el nervio radial. No es infrecuente que el nervio toracodorsal surja de la porción proximal del nervio axilar en lugar de hacerlo del cordón. Una referencia anatómica muy importante a la hora de identificar estas estructuras nerviosas es la relación entre la rama profunda de la arterial axilar y el nervio radial.

El cordón medial se encuentra en íntima relación a la vena axilar, lateral a ella, lo que implica que existan adherencias que obligan a una disección meticulosa entre ambas estructuras. El primer ramo nervioso es el nervio pectoral medial, que inerva al músculo pectoral menor, siendo muy habitual encontrar conexiones (incluso a modo de plexo) entre los dos nervios pectorales, cruzando por encima de la arteria axilar. Los siguientes nervios que surgen del cordón medial son el nervio cutáneo braquial medial y el nervio cutáneo antebraquial medial, ambos sensitivos. Finalmente, el cordón medial se divide dando lugar a la contribución medial del nervio mediano y al nervio cubital. La confluencia entre la contribución lateral y medial del nervio mediano se denomina comúnmente “V del mediano”, de gran ayuda a la hora de identificar las estructuras nerviosas.

Cabe destacar que en las lesiones por estiramiento del plexo braquial, la anatomía topográfica de las estructuras nerviosas mencionadas, y su relación de vecindad con los elemento anatómicos adyacentes, puede cambiar, a lo que hay que sumar tejido cicatricial en mayor o menor grado. Esto convierte la disección del plexo braquial traumatizado en un gran reto para cualquier cirujano.

También es importante mencionar variabilidades anatómicas como los denominados plexos braquiales prefijados o postfijados, donde existe una gran contribución de C4 y T2 respectivamente, con una incidencia en la población general en torno al 25%⁴³(figura 3).

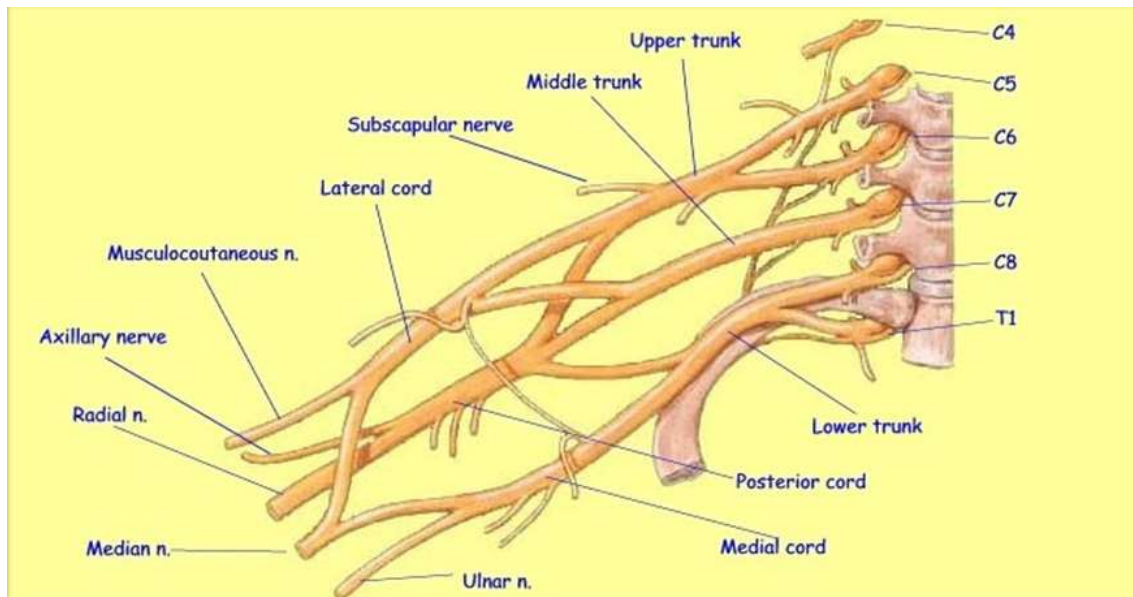


Figura 3. Esquema de la conformación completa del plexo braquial.

1.2 Traumatismos del plexo braquial en el adulto: lesiones por estiramiento/contusión

En función del mecanismo lesivo, la patología traumática del plexo braquial en el adulto se puede dividir en tres grandes grupos: lesiones por traumatismo cortante/contuso-cortante, lesiones por arma de fuego y lesiones por estiramiento/contusión del plexo braquial, siendo estas últimas las más frecuentes.

El mecanismo de las lesiones por estiramiento/contusión del plexo braquial se produce generalmente cuando la cabeza-cuello y el hombro-brazo son empujados en direcciones contrarias de forma violenta, provocando el estiramiento intenso de las estructuras blandas supraclaviculares y laterocervicales, lo que incluye a los nervios que constituyen el plexo, y en menor medida a los vasos¹⁴⁶.

Por lo general, la tracción en sentido caudal del hombro y del brazo afecta a las raíces superiores del plexo (C5-6), la tracción lateral a la raíz C7 y la tracción en sentido craneal a las raíces bajas (C8-T1)¹⁰⁷. La cantidad de energía del traumatismo, y la velocidad de transmisión de la misma redundará en el grado de estiramiento de los diferentes elementos del plexo braquial y en la gravedad de las lesiones, dando lugar a un espectro lesivo bastante heterogéneo como se describirá en apartados posteriores del trabajo.

1.2.1 Epidemiología

La lesión más común del plexo es la causada por estiramiento/contusión, generalmente secundaria a accidentes de motocicleta. De los 1019⁴⁷ pacientes con lesión de plexo braquial intervenidos quirúrgicamente en el Centro Universitario de Ciencias de la Salud del Estado de Lousiana entre 1968 y 1998, el 50% respondían a dicho mecanismo lesivo. Narakas⁸⁶ estima que aproximadamente el 2% de las víctimas de un accidente de motocicleta presenta una lesión de plexo braquial.

Este mismo autor, elaboró la regla de los “siete setenta”, proporcionando una idea aproximada de las estadísticas sobre lesiones de plexo braquial:

- El 70% de las lesiones traumáticas de plexo braquial son provocadas por accidentes de tráfico.
- El 70% de las lesiones por accidente de tráfico son provocadas por motocicleta o bicicleta.
- El 70% de estos pacientes asocian múltiples lesiones.
- El 70% presenta una lesión de plexo supraclavicular.
- El 70% de los pacientes con lesión supraclavicular tendrá al menos una raíz avulsionada del cordón medular.
- El 70% de los pacientes con avulsión de raíz tendrá avulsionada una raíz baja (C7, C8, T1 o C8-T1).
- El 70% de los pacientes con avulsión de raíz baja padecerá dolor persistente.

Del trabajo de Narakas⁸⁶ se concluye que la lesión traumática de plexo braquial más habitual se produce por accidente de motocicleta en el contexto de un paciente politraumatizado, localizándose la lesión a nivel supraclavicular e incluyendo alguna raíz baja avulsionada. Otros autores como Birch⁹, también describen como causa más frecuente de las lesiones de plexo braquial por estiramiento, los accidentes de motocicleta, un 70.3% . En el trabajo epidemiológico de Midha⁷⁷ las lesiones de plexo braquial se presentan en el 4.2% de los accidentes de motocicleta y afectan al 1.2% de los politraumatizados. Rosson⁹⁷, en un estudio de 102 pacientes con lesión de plexo braquial tras accidente de motocicleta en Inglaterra, observó que la edad media era de 21 años, que la mayoría eran varones, la cilindrada del motor era inferior a 125 cc y que con más frecuencia afectaba a la mano dominante. En el análisis epidemiológico de la serie de Palazzi⁹², 524 pacientes atendidos entre 1972 y 2001, el 82% eran de sexo masculino, con una edad media de 22 años (rango de 5 a 56), siendo la causa más frecuente del traumatismo el accidente de tráfico con un 85% (68% accidentes de motocicleta), seguido del accidente laboral con un 8.7%.

Aunque el accidente de tráfico es con diferencia la principal causa de las lesiones por estiramiento del plexo braquial, se han descrito otras etiologías, generalmente en un contexto deportivo: fútbol americano, actividades ecuestres, deportes de nieve, lucha etc^{49,92}.

1.2.2 Clasificación de las lesiones por estiramiento del plexo braquial

1.2.2.1 En función de su relación con el ganglio sensitivo raquídeo

Se distinguen fundamentalmente dos tipos en función de la localización de la lesión respecto el ganglio raquídeo:

- Lesión preganglionar o avulsión radicular. Se trata del arrancamiento de la raíz dorsal-ventral de la médula, por lo que son lesiones intradurales que suelen acompañarse de la laceración de la duramadre en la zona de transición con el

epineuro, con la consiguiente fuga de líquido cefalorraquídeo, lo que se denomina pseudomeningocele. Es característico que el soma neuronal del ganglio sensitivo raquídeo sobreviva, así como el axón sensitivo periférico. Aunque se han distinguido diferentes subtipos en función de la localización de la zona de ruptura respecto la zona de transición medular, existe un denominador común a todas ellas, es la lesión más grave posible, ya que no existe ninguna posibilidad de regeneración espontánea y tampoco es una lesión subsidiaria de reparación quirúrgica directa, salvo excepciones. Además, se trata del tipo de lesión más frecuente en los traumatismos por estiramiento del plexo braquial en el adulto. Birch en su publicación de 2011 expone que, en 1500 pacientes intervenidos (en total 7500 nervios expuestos quirúrgicamente), aproximadamente en la mitad de ellos existía una lesión preganglionar⁹. En el trabajo de Zhao y en el de Zorub, la incidencia de lesión preganglionar también se produce en torno al 50%⁴⁷. Y autores como Narakas y Kim cifran la incidencia de una o más avulsiones radiculares en un 70%⁸⁶.

- Lesión postganglionar. Ocurre en los elementos nerviosos extraforaminales que conforman el plexo, constituidos por la estructura histológica clásica de los nervios periféricos: tejido axonal, tejido conectivo endoneural, tejido conectivo perineural y tejido conectivo epineural (figura 4). Podemos clasificar la lesión del nervio periférico en diferentes grados (atendiendo a varias clasificaciones), cada uno de ellas con un pronóstico distinto. La primera clasificación fue establecida por Seddon en 1943¹⁰², distinguiendo tres grandes grupos de lesiones nerviosas:
 - o Neuroapraxia, bloqueo funcional sin lesión estructural evidente y con buen pronóstico funcional en días-semanas;
 - o Axonotmesis, pérdida de la continuidad axonal con integridad del tejido conectivo nervioso (aunque existe degeneración Walleriana el axón es capaz de regenerar ya que las estructuras conectivas que atraviesa están intactas, por lo que la recuperación suele ser completa en un lapso de semanas-meses);
 - o Neurotmesis, pérdida de la continuidad axonal y conectiva del nervio, no siendo posible la regeneración espontánea.

La segunda clasificación, establecida por Sunderland en 1951¹²⁰, ampliaba la de Seddon, distinguiendo cinco tipos de lesión nerviosa:

- o Tipo I, equivalente a la neuroapraxia;
- o Tipo II, equivalente a la axonotmesis;
- o Tipo III, interrupción axonal y endoneural, implicando esto último cierto grado de fibrosis intraneural que impide la regeneración axonal completa;
- o Tipo IV, interrupción axonal, endoneural y perineural, la regeneración axonal es mínima;
- o Tipo V, equivalente a la neurotmesis.

Cabe destacar la aportación de Mackinnon en 1989⁶⁵ a la clasificación de Sunderland, incluyendo el grado VI: diferentes grados de Sunderland en un mismo segmento nervioso lesionado.

Es importante enfatizar que las lesiones del plexo braquial en los traumatismos por estiramiento son habitualmente una combinación de todas las descritas. Identificar aquellas donde la regeneración axonal es mínima o nula es prioritario a la hora de establecer la indicación quirúrgica en estos pacientes.

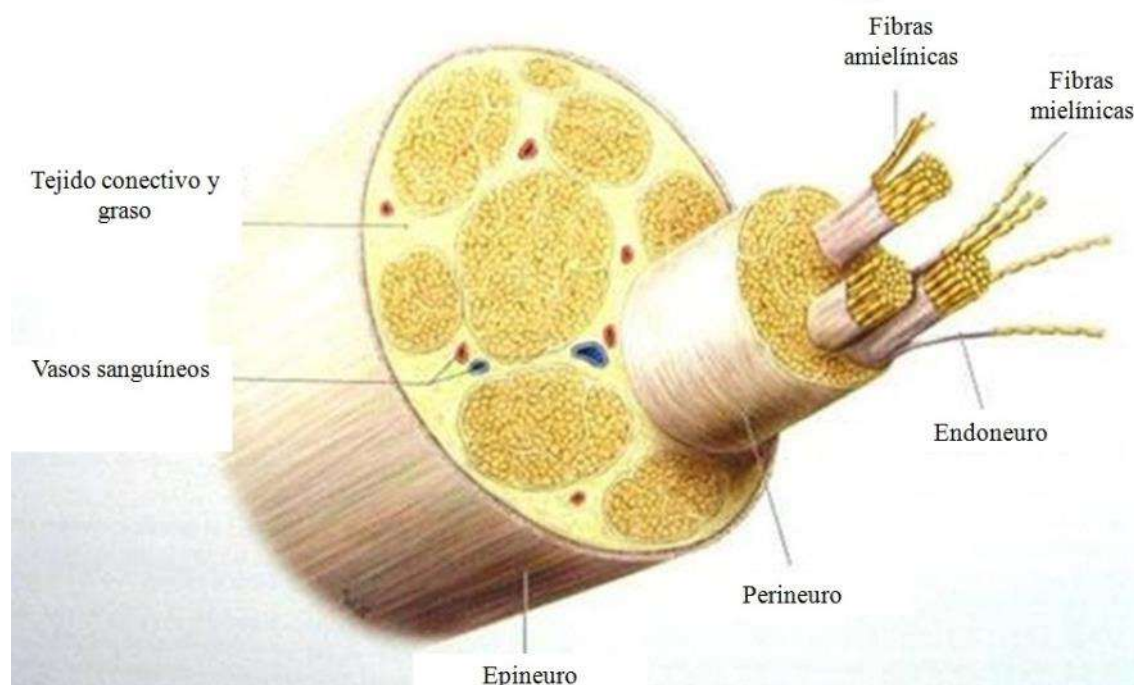


Figura 4. Esquema de la estructura histológica de un nervio periférico.

1.2.2.2 En función de su localización topográfica

Se distinguen tres grandes grupos atendiendo a la localización de la lesión respecto la clavícula²⁶:

- Lesiones supraclaviculares. En las lesiones por estiramiento del plexo braquial son las más frecuentes, algo más del 70%^{78,92}.
- Lesiones retroclaviculares. Anecdóticas, suelen aparecer en el contexto de una fractura de clavícula.
- Lesiones infraclaviculares. Más frecuentes que las anteriores, ocurren en el contexto de luxaciones de hombro, lesiones acromio-claviculares y fracturas proximales de húmero. Es característico que acontezcan en zonas donde los nervios están más adheridos, como el nervio supraescapular a su paso por la escotadura coracoidea.
- Lesiones de doble nivel. Suceden en un 10% de las lesiones supraclaviculares, generalmente asociándose una lesión infraclavicular⁹².

1.2.2.3 En función de la extensión de la lesión

El número de raíces afectas en los traumatismos por estiramiento del plexo braquial determina que se distingan dos grandes grupos: las lesiones completas, cuando se afectan todos los grupos musculares dependientes de las raíces C5-6-7-8 y T1; y las lesiones incompletas, que son todas las demás.

- Lesiones completas del plexo braquial. Son las más frecuentes y constituyen el 61.5% en la serie de 338 plexos intervenidos de Kline⁷⁸, el 60% de las 341 lesiones supraclaviculares de Palazzi⁹² y el 49% en la serie de 301 pacientes de Birch⁹, aunque autores como Narakas las cifran en un 75%⁸⁸. El miembro superior pierde toda su función por lo que queda flácido, comúnmente llamado brazo de polichinela. El patrón lesivo suele ser una lesión postganglionar de todo el plexo, una lesión postganglionar de las raíces altas y avulsión de las bajas, o una avulsión de todo el plexo. La lesión preganglionar de todas las raíces constituye el 17% de la serie de Birch⁹, el 18.7% de la serie de Rosson⁹⁷ y el 22% de la serie de Palazzi⁹². El porcentaje de recuperación espontánea de las lesiones completas del plexo braquial sin cirugía es del 4%⁷⁸.
- Lesiones incompletas. Se afectan de forma mucho más frecuente las raíces altas que las bajas. La parálisis de la musculatura dependiente de C5-6 es la denominada “parálisis de Duchenne-Erb”, la incidencia se cifra en un 16.3%, siendo la recuperación espontánea sin cirugía del 30%⁷⁸. Si a la lesión de C5-6 se le suma la de C7, la incidencia asciende a aproximadamente un 40% y la recuperación espontánea sin cirugía se cifra en un 16%^{9,78}. La parálisis de la musculatura dependiente de las raíces bajas C8-T1 es la denominada “parálisis de Déjerine-Klumpke”; su incidencia es muy baja, siendo omitida de la casuística por algunos autores. La incidencia es del 3-4%^{9,88}.

1.2.2.4 Lesiones asociadas

Como se ha descrito anteriormente, las lesiones traumáticas de plexo braquial por estiramiento suelen ocurrir en el contexto de traumatismos de alta energía, existiendo lesiones asociadas en aproximadamente un 80% de los casos⁸⁸.

La incidencia de estas lesiones varía de forma significativa en función de la serie clínica analizada. En el trabajo de Birch se describen como más frecuentes las siguientes⁹:

- Traumatismo torácico y/o contusión pulmonar (53%).
- Fractura-luxación del miembro superior ipsilateral (45.8%).
- Traumatismo cráneo-encefálico (27.7%).
- Traumatismo raquídeo-medular (14%).
- Lesión de la arteria subclavia (10%).

La existencia de estas lesiones tiene implicaciones pronósticas en los pacientes con lesiones de plexo braquial, tanto por dificultar su diagnóstico como por interferir en la funcionalidad del miembro.

1.2.3 Evaluación clínica y exámenes complementarios

La evaluación de las lesiones de plexo braquial persigue tres objetivos fundamentales: determinar la extensión de la lesión, la localización y la severidad de la misma, de cara a establecer el pronóstico y la necesidad tratamiento quirúrgico. Para

ello es imprescindible llevar a cabo una valoración clínica del paciente, apoyada con pruebas complementarias de imagen y neurofisiológicas.

Identificar si existe o no avulsión de raíces es prioritario, dado que son lesiones irreversibles, y por tanto su diagnóstico implica la necesidad de tratamiento quirúrgico precoz. En caso de que no existan indicios de avulsión de raíces, el seguimiento de la evolución clínica, es, a veces, la única forma de determinar si la lesión es irreversible o no.

1.2.3.1 Evaluación clínica

Se debe hacer lo más precozmente posible, aunque en ocasiones resulte difícil por la presencia de politraumatismos o lesiones potencialmente mortales. Es imprescindible evaluar todas las funciones motoras y sensitivas del miembro superior, así como el rango de movimiento pasivo del mismo. Para determinar el balance motor la escala más utilizada es la del Medical Research Council (MRC) de Gran Bretaña, esta escala evalúa la fuerza de 0 a 5 (0: parálisis, 1: contracción muscular sin movimiento, 2: contracción muscular con movimiento sin vencer gravedad, 3: contracción muscular con movimiento venciendo gravedad, 4: contracción muscular con movimiento venciendo resistencia, 5: contracción muscular normal). Dada la complejidad de la inervación del miembro superior, es aconsejable llevar a cabo una exploración secuencial y rigurosa, para la cual pueden ser útiles diagramas musculares como el de Merle d'Aubigné y Deburge⁷⁴. Russell recomienda la exploración en 6 pasos⁹⁸:

- Primero: la espalda. Comenzar con la inspección, posteriormente explorar músculo romboides, dorsal ancho y trapecio. Determinar si existe escápula alada.
- Segundo: el hombro. Explorar músculo supraespinoso, deltoides, redondo mayor, pectoral mayor e infraespinoso.
- Tercero: el brazo. Explorar músculo tríceps, bíceps y braquiorradial.
- Cuarto: el antebrazo. Explorar supinación, pronación, flexo-extensión de muñeca y extensión de dedos.
- Quinto: la mano. Comenzar con la inspección, posteriormente explorar la flexión de dedos, la musculatura intrínseca tenar-hipotenar, músculos interóseos y lumbricales.
- Sexto: la piel. Evaluar la sensibilidad, determinar la existencia de masas, de pulsos, de reflejos ósteo-tendinosos y de signo de Tinel.

En función del déficit muscular observado durante la exploración se puede determinar de forma fiable las raíces implicadas en la lesión nerviosa⁴⁶, cobrando especial interés aquellos músculos inervados por dos raíces o menos:

- C5: músculo supraespinoso, infraespinoso, deltoides, romboides y serrato anterior.
- C6: músculo bíceps, braquiorradial y supinador.
- C7: músculo tríceps y pronador redondo.

- C8: musculatura flexora de muñeca y flexo-extensora de los dedos, musculatura intrínseca de la mano.
- T1: musculatura intrínseca de la mano.

Aunque de valor predictivo limitado, existen signos durante la exploración del paciente que pueden reflejar la existencia de una lesión por avulsión^{26,107}:

- Síndrome de Horner, indicativo de avulsión C8-T1, por interrupción de la cadena cervical simpática (figura 5).
- Parálisis del músculo serrato anterior, inervado por el nervio torácico largo, lo que provoca una escápula alada (figura 5); de los romboides, inervado por el nervio dorsal de la escápula; y/o del hemidiafragma ipsilateral, inervado por el nervio frénico. Indicativo de avulsión de raíces altas.
- Desviación de la cabeza o escoliosis cervical sobre el hombro controlateral, signo de la bailarina balinesa, indicativo de lesión preganglionar por denervación de la musculatura paraespinal.
- Dolor severo en una extremidad insensible a consecuencia de la desaferenciación del miembro en avulsiones radiculares.
- Ausencia de signo de Tinel, parestesias en el territorio sensitivo de una raíz a la palpación/percusión de la misma a nivel de la fosa supraclavicular.

El peor escenario clínico posible a la hora de establecer la gravedad del daño nervioso, es encontrar un brazo flácido, sin sensibilidad y con signos indirectos de avulsión. En estos casos, si la situación clínica general del paciente lo permite, se debe actuar de forma precoz completando la evaluación con pruebas complementarias de cara a proceder al tratamiento quirúrgico lo antes posible si está indicado, lo cual redundará en el éxito del mismo.

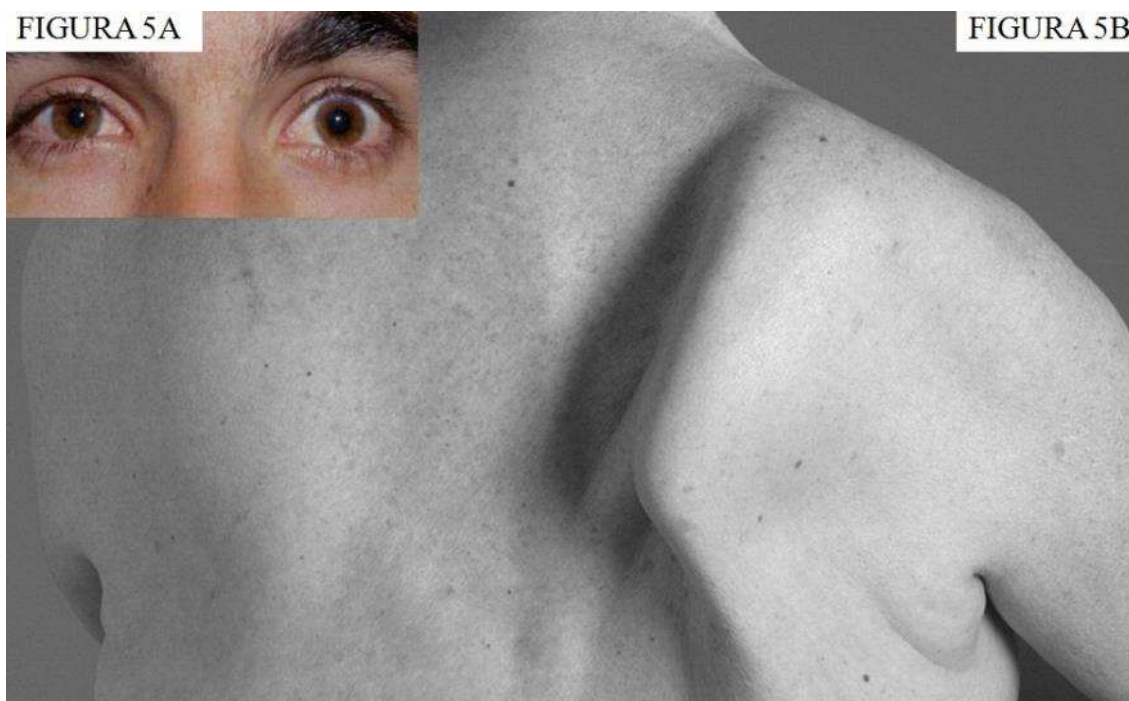


Figura 5A y 5B. Síndrome de Horner y escápula alada respectivamente. Hallazgos clínicos sugestivos de avulsión de raíces.

1.2.3.2 Exámenes complementarios

Indicados en toda lesión traumática del plexo braquial que no presenta recuperación clínica en las primeras semanas.

Estudios radiológicos:

Radiología simple. Es la técnica inicial en muchos pacientes politraumatizados, dada su gran disponibilidad y bajo coste. Permite evaluar posibles fracturas y/o luxaciones a nivel cervical, clavicular, escapular, costal y/o humeral, que como ya se describió anteriormente, acompañan frecuentemente a las lesiones por estiramiento del plexo braquial. Mención especial a la radiografía de tórax en inspiración y espiración, ya que puede poner de manifiesto una parálisis frénica, no sólo de cara a establecer el posible riesgo de avulsión de la raíz C5, sino también de cara a evaluar la posibilidad de utilizar dicho nervio en una transferencia nerviosa.

Arteriografía. Sólo indicada en caso de sospecha de lesión vascular asociada, siendo la más frecuente la de arteria subclavia. Ante una masa supraclavicular pulsátil siempre debe descartarse la existencia de un pseudoaneurisma, situación de alto riesgo en una eventual cirugía sobre el plexo braquial.

Mielografía cervical por tomografía computerizada (TC). Introducida en la práctica clínica en 1975, no fue hasta 1986 que se publicó la primera serie clínica sobre lesiones por estiramiento del plexo braquial⁶⁹. Actualmente se considera la técnica radiológica “gold standard” a la hora de diagnosticar la avulsión de raíces, con una sensibilidad del 95% y una especificidad del 98%¹³⁸; si bien, la correlación con los

hallazgos intraoperatorios varía entre el 65 y el 85%¹²³. También permite el diagnóstico de pseudomeningoceles habiéndose demostrado que no es infrecuente que existan avulsiones radiculares sin pseudomeningocele y viceversa. Entre sus principales limitaciones se encuentra la escasa sensibilidad a la hora de evaluar lesiones del cordón medular, además de tratarse de una técnica que irradia al paciente y que requiere de la introducción de un contraste en el espacio intratecal mediante punción lumbar, existiendo riesgo de reacción alérgica y neurotoxicidad.

Resonancia magnética (RM) y mielografía cervical por RM. Desde la introducción de las técnicas mielográficas 3D en RM, los resultados de sensibilidad, especificidad y fiabilidad a la hora de establecer el diagnóstico de avulsión radicular están por encima del 90%²⁷. Mejores resultados obtiene en cuanto al diagnóstico de pseudomeningocele. Además, la RM permite evaluar mucho mejor los tejidos blandos (cordón medular, plexo y musculatura paraespinal) que la TC, y sin necesidad de que el paciente sea irradiado. La hiperintensidad de la musculatura paraespinal es un indicador de avulsión nerviosa, hallazgo que se pone de manifiesto a partir del día 15 tras el traumatismo¹³. La administración de contraste ha demostrado un realce en el muñón radicular y en la zona de entrada a la médula tras una avulsión, con una sensibilidad y especificidad del 47 y 98% respectivamente³⁹. El engrosamiento de los troncos nerviosos que conforman el plexo es un dato a favor de que la lesión sea postganglionar^{22, 40} (figura 6).

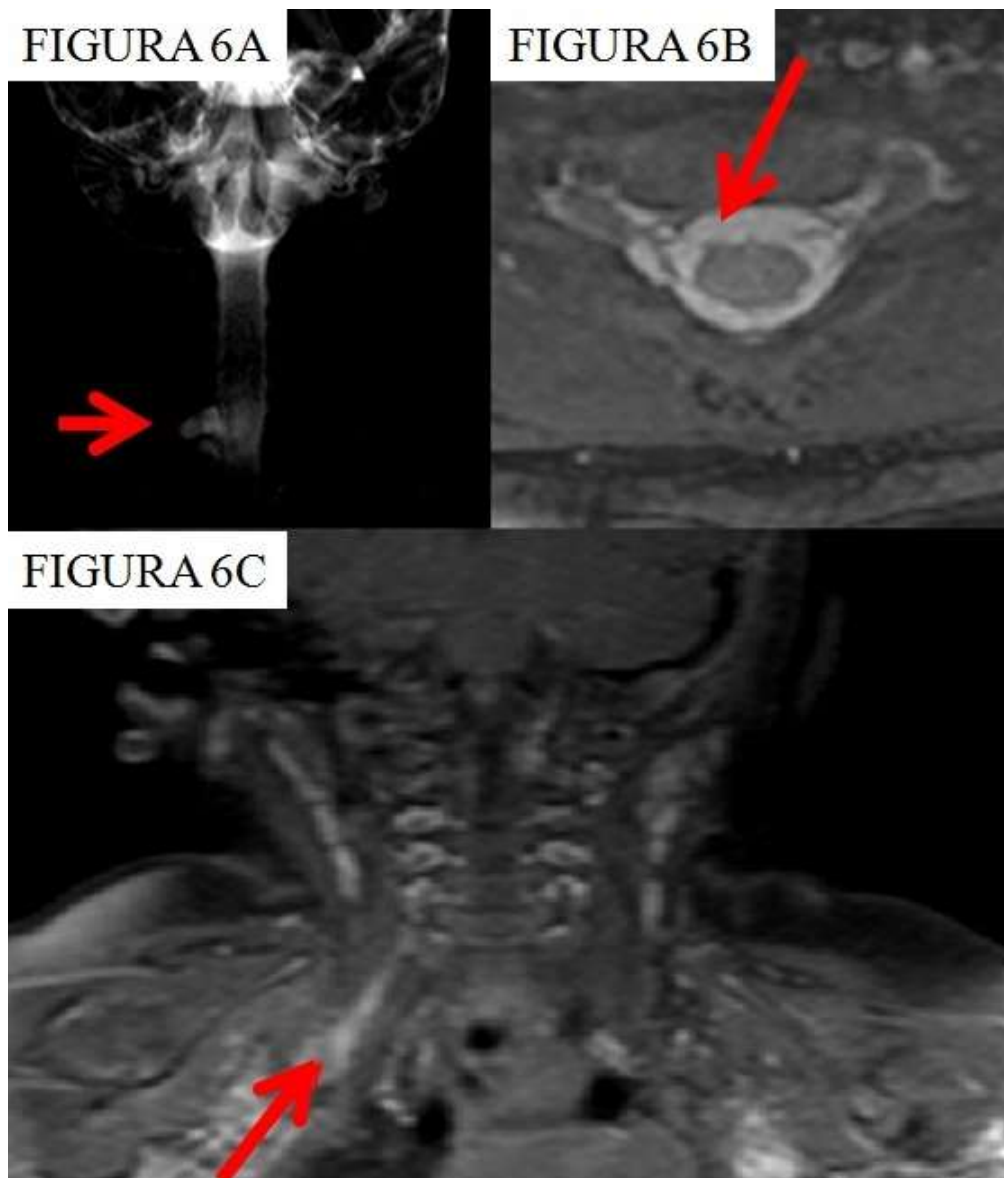


Figura 6. Imágenes de RM. 6A: pseudomeningocele. 6B: avulsión de raíz anterior. 6C: neuroma. Tomadas de un paciente con parálisis braquial obstétrica evaluado por la Unidad de Neurocirugía Pediátrica del Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga.

Por tanto, podemos afirmar que tanto la mielografía-RM como la mielografía-TC, poseen una capacidad diagnóstica de avulsión radicular similar. La posibilidad de evaluar mejor los tejidos blandos, la no necesidad de introducir un contraste en el espacio intratecal y la ausencia de radiación, son factores que sitúan la RM como la prueba de elección inicial en los pacientes con lesiones traumáticas de plexo por estiramiento.

Estudios neurofisiológicos:

Definen la extensión, gravedad y localización de la lesión, y además, permiten evaluar si existe regeneración axonal, por lo que son de gran utilidad en la evaluación prequirúrgica del paciente ayudando a establecer la necesidad de cirugía. En el acto quirúrgico permiten elegir el procedimiento terapéutico más adecuado. En el seguimiento posterior aportan datos sobre el pronóstico y resultados del tratamiento llevado a cabo.

Cabe destacar que el momento idóneo para llevar a cabo los estudios neurofisiológicos es una vez establecida la degeneración Walleriana, es decir a las 2-3 semanas del traumatismo, ya que antes no serán evidentes todos los cambios eléctricos que nos permiten definir la lesión nerviosa⁵³.

Entre los diferentes estudios que se deben realizar en la valoración inicial del paciente destacan: la electromiografía (EMG), la electroneurografía (ENG) y el potencial evocado somatosensitivo (PESS).

Electromiografía (EMG). Permite estudiar la actividad eléctrica originada en el músculo mediante un electrodo de aguja. Se valora: la actividad de inserción (es la actividad eléctrica tras colocar la aguja en el músculo), el músculo en reposo y el músculo en actividad voluntaria o tras la estimulación del nervio correspondiente^{5,31}.

En el músculo sano existe actividad de inserción, el reposo muestra una curva plana y la actividad muscular genera un potencial de acción motora (PAM) de duración y amplitud determinada. En la denervación grave existe pérdida de la actividad de inserción, en el músculo en reposo la curva plana da lugar a una actividad espontánea constituida por fibrilaciones, y a una ausencia de PAM al intentar contraer el músculo. En la reinervación, los cambios eléctricos descritos sólo comenzarán a revertir una vez que los axones han crecido llegando al músculo, por lo que lesiones nerviosas proximales y/o a gran distancia de la diana muscular, a pesar de que se esté produciendo una regeneración axonal adecuada, pueden no evidenciar eléctricamente la reinervación^{52,56,132}.

En la evaluación de las lesiones por estiramiento del plexo braquial deben estudiarse los músculos dependientes del plexo inervados por diferentes nervios periféricos pero que dependen de raíces comunes, los músculos dependientes de elementos nerviosos proximales del plexo braquial (músculo romboides y serrato anterior) y la musculatura paravertebral profunda del cuello. La afectación de los músculos romboides, serrato anterior y musculatura paravertebral profunda es indicativa de lesión preganglionar^{5,56}.

Electroneurografía (ENG). Consiste en aplicar un estímulo eléctrico mediante electrodo percutáneo a un nervio en concreto, dando lugar a un potencial de acción (PA) o potencial de acción evocado (PAE) que es registrado mediante otro electrodo de superficie colocado a una distancia determinada. Esto permite evaluar la amplitud, duración, latencia y velocidad de conducción del PA, que estará ausente en caso de lesiones nerviosas completas. Existe ENG motora, sensitiva y mixta, siendo la sensitiva la de mayor utilidad a la hora de evaluar las lesiones por estiramiento del plexo braquial,

ya que la presencia en un PAE sensitivo en un territorio anestesiado es indicativa de lesión preganglionar. Esto se explica porque en las lesiones preganglionares el soma de la neurona sensitiva mantiene su continuidad con el axón periférico y no sufre degeneración Walleriana^{48,56}.

Potencial evocado somatosensitivo (PESS). Es el potencial cortical registrado a nivel del cuero cabelludo tras el estímulo eléctrico percutáneo de un nervio con componente sensitivo o de un dermatoma sensitivo determinado. Se realiza ante sospecha de avulsión, ya que la ausencia del PESS la confirma. Sin embargo su presencia no descarta la avulsión, pudiendo existir falsos positivos, por afectación de la raíz anterior de la médula en ausencia de afectación de la raíz posterior o porque la preservación de un número mínimo de fibras sensitivas ya da lugar a que se pueda registrar el PESS^{44,84}.

Estudios neurofisiológicos durante el acto quirúrgico:

Además, los estudios neurofisiológicos se utilizan en la cirugía exploratoria y reparadora de las lesiones que afectan de forma directa al plexo braquial. Permiten identificar las estructuras nerviosas presentes en el campo quirúrgico y definir el tipo de lesión nerviosa apoyando el examen macro-microscópico de los nervios implicados. Entre los diferentes estudios destacan: la estimulación eléctrica del nervio, el potencial de acción nervioso (PAN)⁵³ (figura 7), el PESS⁸⁴ y el potencial evocado motor (PEM)¹²⁹.

Estimulación eléctrica del nervio. Tiene como objetivo comprobar si se produce respuesta en el músculo en el que se sitúan los electrodos de registro, permitiendo localizar la lesión y las estructuras nerviosas sanas. En caso de lesiones neuromatosas, la conducción del impulso a través de la misma estaría a favor de no usar reconstrucción con injerto o transferencias nerviosas, por lo que estas pruebas también ayudan a decidir la actitud terapéutica. Su importancia también radica en localizar y evaluar la viabilidad de nervios que pueden ser utilizados como donantes en las transferencias nerviosas.

Potencial de acción nervioso (PAN). Permite evaluar la conducción de una estructura nerviosa en un segmento determinado, mediante un estímulo proximal y un receptor distal a una zona que parece lesionada, generalmente en el contexto de una lesión en continuidad. Su utilidad se basa en que un neuroma en continuidad, a pesar de que exista una regeneración axonal adecuada, puede no mostrar actividad muscular distal si el axón aún no ha llegado a éste. Una lesión en continuidad que no trasmite el PAN sería subsidiaria de tratamiento con injerto nervioso⁵³ (figura 7).

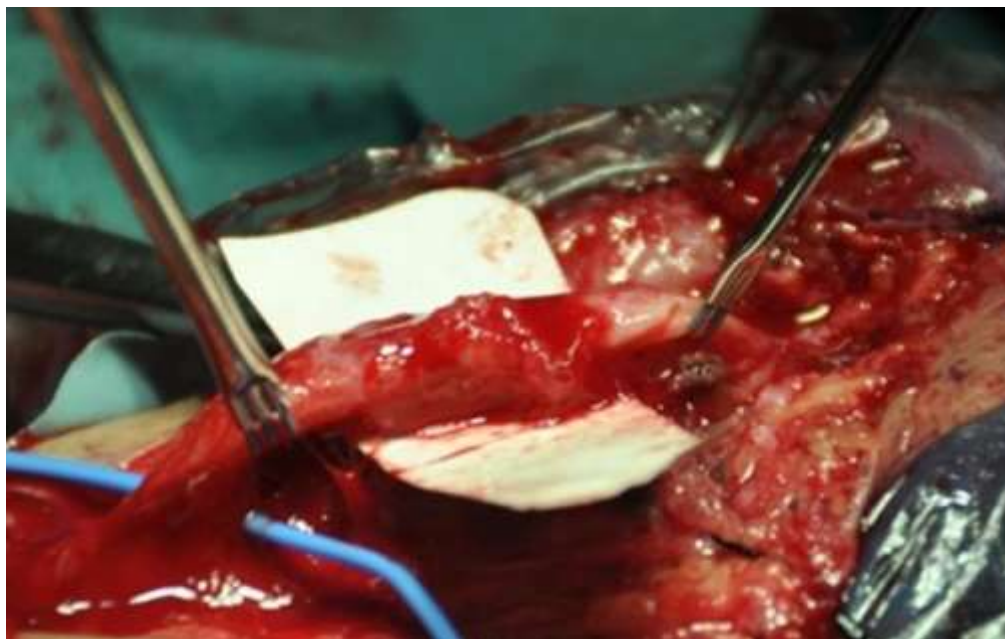


Figura 7. Paciente intervenido en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Neuroma en continuidad del nervio mediano. Se comprueba el PAN mediante un estimulador proximal y un receptor distal al neuroma. En este caso el impulso eléctrico se transmitía a través del neuroma por lo que sólo se procedió a una neurolisis.

Potencial evocado somatosensitivo PESS. Útiles para confirmar una lesión preganglionar durante la cirugía, estimulando directamente el nervio o raíz cerca del neuroforamen⁸⁴.

Potencial evocado motor (PEM). Se mide la respuesta a la estimulación eléctrica transcraneal de la corteza motora a través de un registro en raíces, troncos o músculos. Permite evaluar la integridad de la raíz anterior, aportando datos de la severidad de la lesión, siendo la amplitud del potencial la expresión del número de axones dañados¹²⁹.

La exploración quirúrgica macro-microscópica, apoyada por los exámenes neurofisiológicos intraoperatorios, es el “gold standard” a la hora de establecer el diagnóstico de la lesión nerviosa.

1.2.4 Tratamiento quirúrgico de las lesiones nerviosas por estiramiento de plexo braquial.

1.2.4.1 Momento óptimo para la cirugía.

Actualmente no existe un protocolo clínico aceptado de forma unánime por los cirujanos a la hora de establecer la indicación quirúrgica en las lesiones por tracción del plexo braquial, existiendo disparidad de criterios entre los diferentes especialistas.

La actitud expectante a la espera de recuperación espontánea brinda la posibilidad de evitar la intervención quirúrgica del paciente. Sin embargo, la precocidad del tratamiento es uno de los factores pronósticos positivos más importantes respecto el

resultado de la reparación quirúrgica. En general, ante una lesión por estiramiento del plexo braquial, se recomienda un periodo expectante de 3-4 meses, a la espera de que aparezcan signos de recuperación espontánea. En caso de no producirse existe indicación de exploración quirúrgica y de reparación si procede. Si existe una alta sospecha de avulsión de raíces tras la exploración clínica y las pruebas complementarias, la cirugía debe indicarse lo antes posible, se tratan de lesiones irreversibles. Algo parecido se podría decir de las lesiones completas, donde el porcentaje de recuperación espontánea es del 4%^{46,58,78}. Las reparaciones quirúrgicas llevadas a cabo por encima de los 9 meses del traumatismo tienen un porcentaje de recuperación significativamente menor^{8,51,54,114}.

1.2.4.2 Prioridades de reparación.

El plan de reconstrucción quirúrgica depende de cada caso en particular, en base a la extensión de la lesión y a las opciones de reconstrucción disponibles. Si la lesión es extensa se debe asumir la imposibilidad de reparar todas las estructuras que conforman el plexo, por lo que se deben establecer una serie de prioridades en función de la impotencia funcional que acarrea un déficit motor en cuestión y del pronóstico de recuperación posterior esperable tras la reconstrucción^{9,78,92,107,125}. A continuación se describe el orden de prioridades de mayor a menor:

- Flexión de codo: brinda estabilidad a la articulación escápulo-humeral y permite ubicar la mano en el espacio.
- Estabilización dinámica del hombro: un hombro estable facilita la flexión del codo, además de contribuir a la ubicación de la mano en el espacio.
- Sensibilidad de protección de la mano.
- Pinza braquitorácica.
- Flexión de la muñeca y dedos.
- Extensión de la muñeca y dedos.
- Musculatura dependiente del nervio cubital: constituyen la última prioridad, dado el pronóstico de recuperación desfavorable que presenta.

1.2.4.3 Técnicas microquirúrgicas.

Neurolisis externa:

Se define como neurolisis externa a la liberación circunferencial de un nervio de los tejidos de revestimiento y/o cicatriciales que lo rodean, hasta exponer una longitud determinada del mismo¹¹⁸.

En cirugía nerviosa esta técnica es la piedra angular de todo procedimiento, ya que para abordar y exponer quirúrgicamente un nervio se debe proceder en primer lugar a su neurolisis externa. En caso de patología traumática cobra más importancia si cabe, ya que el nervio en cuestión presenta en la gran mayoría de los casos algún grado de tejido cicatricial a su alrededor¹¹⁸.

La importancia clínica de la neurolisis externa radica en que el tejido cicatricial asociado a una lesión nerviosa implica cierto grado de adherencia-constricción en el nervio, lo que a su vez interfiere en la regeneración y/o en la conducción del impulso nervioso. Es por ello que la neurolisis brinda teóricos beneficios en cuanto al pronóstico funcional de una lesión (figura 8).

Lamentablemente, a día de hoy no existe una demostración científica fehaciente de esta afirmación, si bien son numerosos los autores que están a favor de la eficacia de esta técnica^{71,117}.

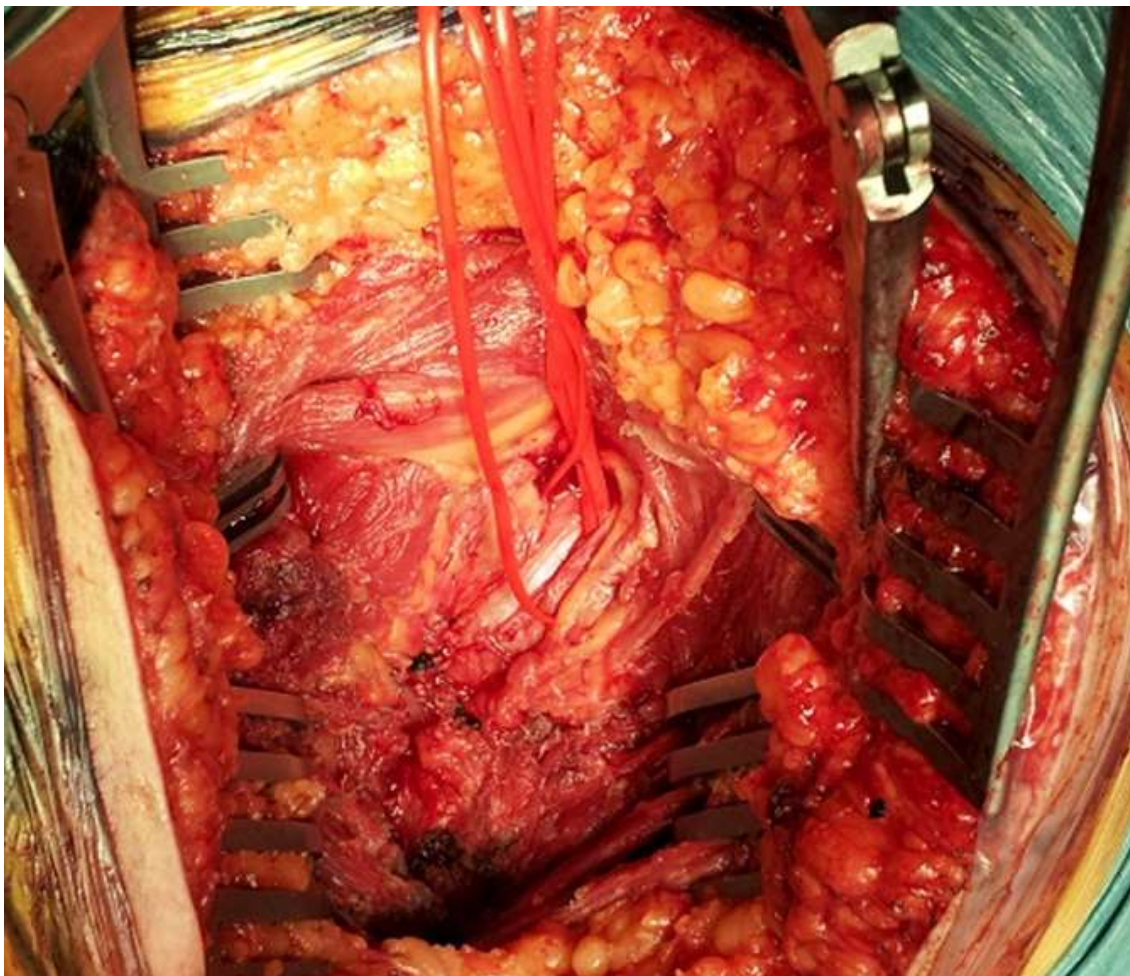


Figura 8. Paciente intervenida en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Endometriosis extrapélvica del músculo piriforme y fibrosis perineural del nervio ciático. Se procedió a una neurolisis externa.

Neurolisis interna:

La neurolisis interna consiste en la división-aislamiento de los fascículos y/o grupos fasciculares que componen un nervio a través de una disección dentro del mismo (intraneural), con el objetivo de proceder a la liberación de los mismos de tejido cicatricial. Otras indicaciones de la neurolisis interna son para separar los fascículos lesionados de los indemnes en una lesión nerviosa parcial y también como paso previo a

realizar técnicas como una neurorrafia con injertos, una transferencia nerviosa o una resección de un tumor de la vaina nerviosa^{11,41,71,90,118}.

En el caso de las lesiones traumáticas parciales, la neurolisis interna permite explorar los diferentes fascículos que componen el nervio, con la finalidad de identificar aquellos que se encuentran lesionados. En función del grado de lesión de dicho fascículo se puede optar por liberarlo del tejido cicatricial o por sustituirlo mediante un injerto nervioso. Destacar que el papel de la neurolisis interna como técnica terapéutica es controvertido, ya que en el intento de liberar los fascículos nerviosos de tejido cicatricial se puede generar más fibrosis y no existen estudios que avalen de forma sólida el éxito clínico de la técnica. La indicación habitualmente establecida en la literatura para realizar una neurolisis interna en lesiones nerviosas traumáticas es una lesión nerviosa en continuidad con una pérdida parcial de la función del nervio distal al sitio lesional asociada a un dolor neuropático severo⁴¹.

Las transferencias nerviosas en las que sólo se utiliza parte del nervio donante como fuente de axones, como por ejemplo, el fascículo de nervio cubital al ramo al bíceps del nervio músculo-cutáneo (llamada técnica de Oberlin) o un fascículo del nervio hipogloso al nervio facial, requieren de una neurolisis interna con el fin de aislar-seleccionar el fascículo que se anastomosará con el nervio receptor^{11,90}, a lo que seguiría una neurorrafia sin injertos.

Neurorrafia directa:

Se entiende por neurorrafia la coaptación quirúrgica de dos cabos nerviosos con el fin de restituir la continuidad morfológica del mismo, permitiendo la regeneración axonal desde la porción proximal del nervio a la distal. La neurorrafia directa (también llamada termino-terminal) es aquella llevada a cabo sin injerto interpuesto, e indirecta la que requiere de algún tipo de injerto^{80,118}. Existen tres principios generales a toda neurorrafia: priorizar la neurorrafia directa sobre la indirecta, ya que tiene mejores resultados clínicos; evitar la tensión en la línea de sutura, ya que conduce al fracaso de la técnica; y llevar a cabo la neurorrafia sobre cabos nerviosos sin tejido cicatricial, ya que de lo contrario la fibrosis intraneural impide el crecimiento axonal⁵⁰.

En las lesiones traumáticas por tracción del plexo braquial, tras la resección de una lesión en continuidad, la distancia entre los cabos nerviosos suele hacer imposible la neurorrafia directa¹⁰⁷. Sin embargo, se utiliza frecuentemente a la hora de coaptar un nervio donante con un nervio receptor en determinadas transferencias nerviosas.

Neurorrafia con injerto interpuesto:

Es la técnica microquirúrgica más empleada en las lesiones por tracción de plexo braquial una vez reseca la porción nerviosa neurotmésica, con el fin de restituir la continuidad morfológica entre las estructuras nerviosas implicadas en la lesión, y siempre y cuando el cabo proximal presente una estructura fascicular adecuada y/o no esté avulsionado (figura 9).

Considerada una técnica subóptima en cirugía nerviosa hasta la década de los 60, actualmente existe unanimidad acerca de su eficacia en la reparación de lesiones nerviosas en las que no es posible realizar una neurorrafia directa, si bien los resultados no siempre son satisfactorios. Según autores como Millesi^{80,81,82}, esto se debe fundamentalmente a una serie de factores, algunos de ellos evitables:

- La regeneración axonal debe atravesar dos zonas de coaptación.
- Clásicamente se ha considerado la distancia entre los dos cabos nerviosos a reparar como un factor negativo en el resultado clínico de la reparación nerviosa, induciendo a muchos cirujanos a minimizar esta distancia, lo que puede conducir a realizar una neurorrafia con injerto interpuesto bajo tensión. Trabajos recientes muestran que la longitud del injerto no es a priori un factor de mal pronóstico¹¹¹.
- La menor viabilidad del injerto nervioso en caso de no utilizar injertos autólogos y/o individuales¹⁰¹.

En general, realizando la cirugía en el momento adecuado, con una técnica microquirúrgica depurada, seleccionando de forma adecuada el tipo de injerto y logrando una coaptación sin tensión, es posible obtener, como ya se ha mencionado, buenos resultados al emplear esta técnica (figura 9).

Millesi en sus trabajos describe las características que debe reunir el injerto nervioso óptimo⁸⁰:

- Nervio cutáneo, por la escasa morbilidad derivada de su extracción, la facilidad técnica de la misma y su mayor viabilidad en comparación con troncos nerviosos utilizados como injerto.
- Gran longitud, permitiendo obtener varios injertos con el fin de reparar el defecto entre cabos coaptando todos los fascículos implicados en la lesión.
- Estroma y endoneuro íntegro, así como presencia de capilares, fibroblastos y gran cantidad de células de Schwann, lo que favorece la regeneración nerviosa.
- Autólogo, con el fin de evitar problemas inmunológicos presentes en el caso de utilizar aloinjertos y/o xenoinjertos.

La utilización de un nervio cutáneo como injerto acarrea dos problemas fundamentales. El primero, la pérdida de sensibilidad, la cual suele ser bien tolerada por los pacientes, además del hecho de que la colateralidad de nervios cutáneos adyacentes hace que se minimice con el tiempo. El segundo problema es el riesgo de que el paciente desarrolle un neuroma doloroso en el cabo proximal del nervio cutáneo sacrificado, por lo que nunca debemos alojar dicha zona de sección en el espacio subcutáneo, pero sí a nivel subfascial o en plano muscular.

A continuación se exponen los autoinjertos cutáneos más utilizados y la longitud de los mismos:

- Nervio sural: es el más utilizado, pudiendo obtenerse a través de 3-5 incisiones en su trayecto, el cual discurre a nivel subcutáneo desde la zona posterior del maléolo externo hasta la línea media que divide las masas musculares del gastrocnemio, donde se hace subfascial en su trayecto hacia el hueco poplíteo.

Se pueden conseguir unos 30-40 cm de injerto con cada uno y siempre se recomienda su extracción completa con el fin de minimizar el riesgo de neuroma doloroso.

- Nervio medial antebraquial cutáneo, con unos 20 cm.
- Nervio lateral femoral cutáneo, con unos 30 cm.
- Nervio dorsal antebraquial cutáneo, con unos 15-20 cm.
- Nervio lateral antebraquial cutáneo, con unos 15 cm.
- Ramo superficial del nervio radial, con unos 25 cm.
- Nervios intercostales, con unos 20 cm.
- Nervio safeno interno, con unos 40 cm.

Actualmente el uso de autoinjertos de nervios cutáneos como el sural, es considerada la técnica “gold standard”⁸⁰⁻⁸² (figura 9).



Figura 9. Paciente intervenido en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Sección traumática del nervio radial de cuatro meses de evolución. Se procedió a la reconstrucción nerviosa a través de injertos autólogos de nervio sural.

Reimplantación medular de raíces:

Consiste en restituir la continuidad morfológica entre la médula y las raíces avulsionadas. El primer caso fue descrito por Bonney en 1977⁹, sin embargo no se objetivó reinervación en la musculatura dependiente de las raíces reimplantadas. Los trabajos posteriores de Carlstedt^{12,13}, en modelo animal y en humanos, sí han mostrado

regeneración. Si bien algunos autores defienden esta técnica⁴², en general no debe ser considerada una opción del arsenal terapéutico en la cirugía reconstructiva del plexo braquial hasta que no existan más investigaciones al respecto^{26,46,58,78,107,125}.

Transferencias nerviosas:

Se define como neurotización o transferencia nerviosa a la anastomosis entre un nervio funcionante (donante) y un nervio lesionado (receptor), con el fin de restituir la función perdida del receptor a expensas de sacrificar la del donante^{94,95}. Por este motivo, además de que nunca se puede asegurar el éxito de la técnica, el riesgo-beneficio de sacrificar una función por otra debe estar justificado.

La neurotización es el procedimiento de elección cuando no es posible reconstruir la estructura nerviosa lesionada de manera directa, por ejemplo en casos de avulsión radicular. En cirugía de plexo braquial se distinguen dos tipos de transferencias nerviosas, las intraplexuales y las extraplexuales, en función de que el nervio donante forme parte del plexo o no. La transferencia nerviosa intraplexual es el procedimiento de elección cuando la lesión de plexo es parcial, y por tanto, están disponibles axones que forman parte del mismo plexo puesto que cualquiera de estas estructuras nerviosas ofrece un número mayor de axones que la suma de todos los nervios disponibles para llevar a cabo una transferencia extraplexual, sin contar la raíz C7 controlateral^{94,95,119,128} (figura 10).

Se han descrito una serie de postulados básicas con importancia pronóstica a la hora de llevar a cabo estas técnicas de transferencia nerviosa^{95,119,128}:

- Los fascículos nerviosos del nervio donante deben coincidir con los del nervio receptor, no sólo en número y tamaño, sino también en función. Por lo tanto, en caso de que el nervio receptor sea motor, los nervios donantes motores son preferibles a los mixtos.
- Tanto el nervio donante como el receptor deben estar cerca, de forma que sea posible llevar a cabo una neurorafia directa. Además, de esta forma disminuye el tiempo necesario hasta obtener la reinervación, lo cual conlleva una menor atrofia.
- La función del nervio donante no ha de ser antagonista a la del receptor, con el fin de evitar fenómenos de contracción muscular simultánea que repercutan en el resultado clínico de la técnica.

1.3 Transferencias nerviosas extraplexuales.

En las lesiones completas de plexo braquial, especialmente en los casos de avulsión de todas las raíces, las neurotizaciones extraplexuales son la única posibilidad de reconstrucción nerviosa que tienen estos pacientes, todo ello con el fin de minimizar el gravísimo déficit que presentan. Como se ha mencionado con anterioridad, las lesiones completas de plexo braquial son las más frecuentes, y aunque no siempre implican la avulsión de todas las raíces, sí limitan la posibilidad de transferencias nerviosas intraplexuales, al no tratarse de nervios sanos los que se pueden usar como donantes. Si no todas las raíces están avulsionadas existe la posibilidad de reconstruir

parcialmente el plexo con injertos, a lo que hay que sumar la posibilidad de llevar a cabo neurotizaciones extraplexuales que completen la reconstrucción.

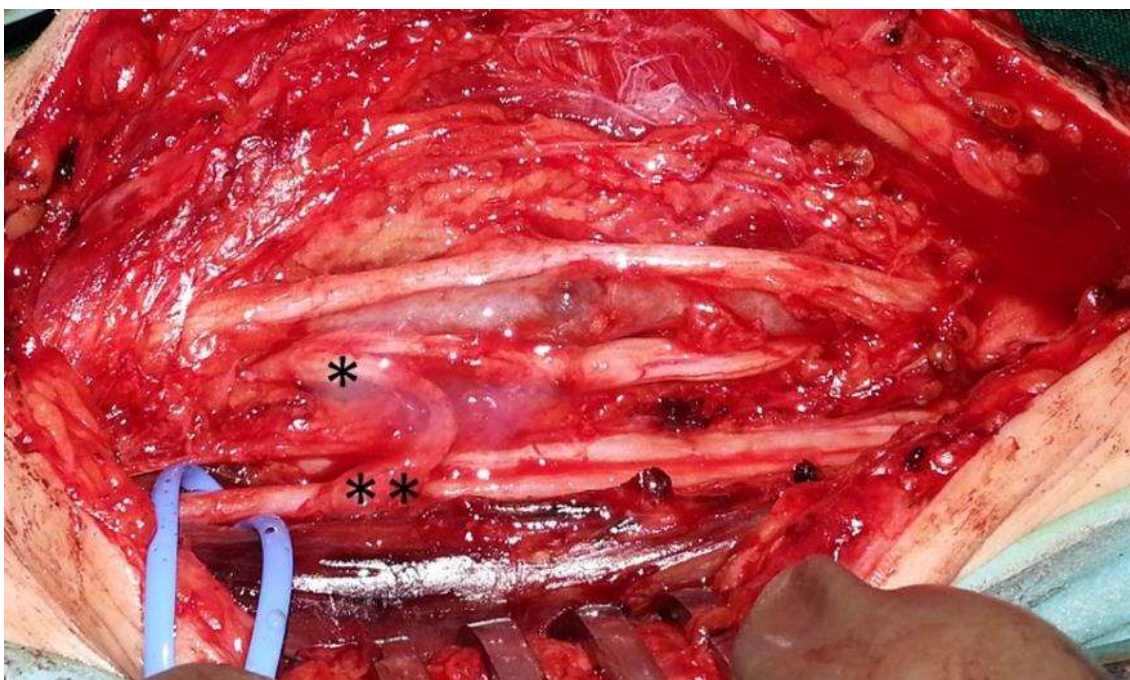


Figura 10. Paciente intervenido en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Avulsión de raíces C5 y C6 tras traumatismo por tracción del plexo braquial. Transferencia intraplexual de fascículo motor del nervio cubital a ramo motor del bíceps (técnica de Oberlin). *: fascículo cubital, **: ramo motor al bíceps.

En la literatura se observa discrepancia a la hora de determinar el éxito de una técnica reconstructiva nerviosa debido al uso de diferentes escalas de gradación de fuerza y a que a veces los resultados se exponen como rango de movimiento.

En general, se puede considerar una transferencia como de buen resultado cuando el balance muscular obtenido en la escala MRC es igual a tres o superior, es decir, cuando el músculo es capaz de vencer la gravedad.

1.3.1 Antecedentes históricos

Los primeros casos de transferencia nerviosa fueron reportados por Harris y Low en 1903³⁸, en concreto tres casos de transferencia parcial de C6 y C7 a C5, aunque no se aportaron los resultados. La siguiente descripción de una transferencia nerviosa, utilizando como donante el nervio espinal accesorio, se atribuye a Tuttle en 1913¹³⁰. Vulpius y Stoffel¹³⁵, en la segunda década del siglo veinte, utilizan ramos nerviosos del pectoral para neurotizarse el nervio musculocutáneo y el axilar. Foerester en 1929²⁵ además describe el uso de los nervios subescapular y toracodorsal como donantes del nervio axilar. Hasta después de la Segunda Guerra Mundial no se encuentra bibliografía relacionada con las transferencias nerviosas. Lurje en 1948⁶⁴ describe la aplicación de

las técnicas descritas en parálisis de Erb, y además propone la opción de transferir el nervio frénico. En 1963 Seddon y Yeoman publican la primera descripción técnica completa y sus resultados¹⁰³, utilizando los nervios intercostales para neurotizarse en casos de avulsión radicular. A pesar de estos inicios prometedores de las transferencias nerviosas en la cirugía reconstructiva del plexo braquial, hasta la década de los 80 diferentes trabajos defendían la amputación, artrodesis y el uso de prótesis como la mejor opción terapéutica en los pacientes con lesiones completas de plexo braquial^{21,68,106}. Desde finales de los sesenta hasta principios de los ochenta, las transferencias nerviosas se consolidan como un tratamiento eficaz en la cirugía reconstructiva de plexo braquial, gracias a los trabajos de autores como Tsuyama, Hara, Kotani, Allieu, Brunnelli, Celli, Merle, Millessi y Sedel, relegando la amputación, artrodesis y prótesis al último escalón terapéutico^{2,10,14,37,55,75,81,104,127}. Narakas en 1984⁸⁷ establece las bases y fundamentos anatómicos de las transferencias nerviosas en la cirugía de plexo braquial, apareciendo en las últimas décadas del siglo veinte la descripción de gran cantidad de neurotizaciones con diferentes resultados clínicos, como se describe más adelante.

1.3.2 Transferencias extraplexuales disponibles

Como se ha comentado con anterioridad, desde principios del siglo veinte se han utilizado diferentes nervios como donantes de axones con el fin de restituir la función de determinados grupos neuro-musculares en las lesiones por tracción del plexo braquial.

1.3.2.1 Nervio espinal accesorio

El nervio espinal accesorio ha demostrado ser un donante eficaz para restituir la función de nervios como el supraescapular, axilar y musculocutáneo^{2,66,76,90,100,115,124,126,130,137} (figura 11).

Waikakul¹³⁷ en su serie de 130 pacientes obtuvo buenos resultados (un 83%) reinervando el nervio musculocutáneo, comparando además de forma prospectiva y aleatorizada con la transferencia de nervios intercostales, donde obtuvo resultados más pobres (un éxito del 64%). Como complemento a esta comparación entre el nervio espinal accesorio y los nervios intercostales están los resultados del metanálisis efectuado por Merrell⁷⁶, donde se obtiene un balance muscular MRC de cuatro o mejor del 41% y 29% respectivamente a la hora de reinervar el nervio musculocutáneo, siendo del 72% y 77% respectivamente si el balance muscular MRC era igual a tres o superior. Posteriormente, Samii¹⁰⁰ demostró que factores como el tiempo y la longitud del injerto interferían en el éxito de la técnica, obteniendo buenos resultados en el 86% si se hacía antes de los seis meses y el injerto medía menos de 12 cm, frente el 65% en caso contrario.

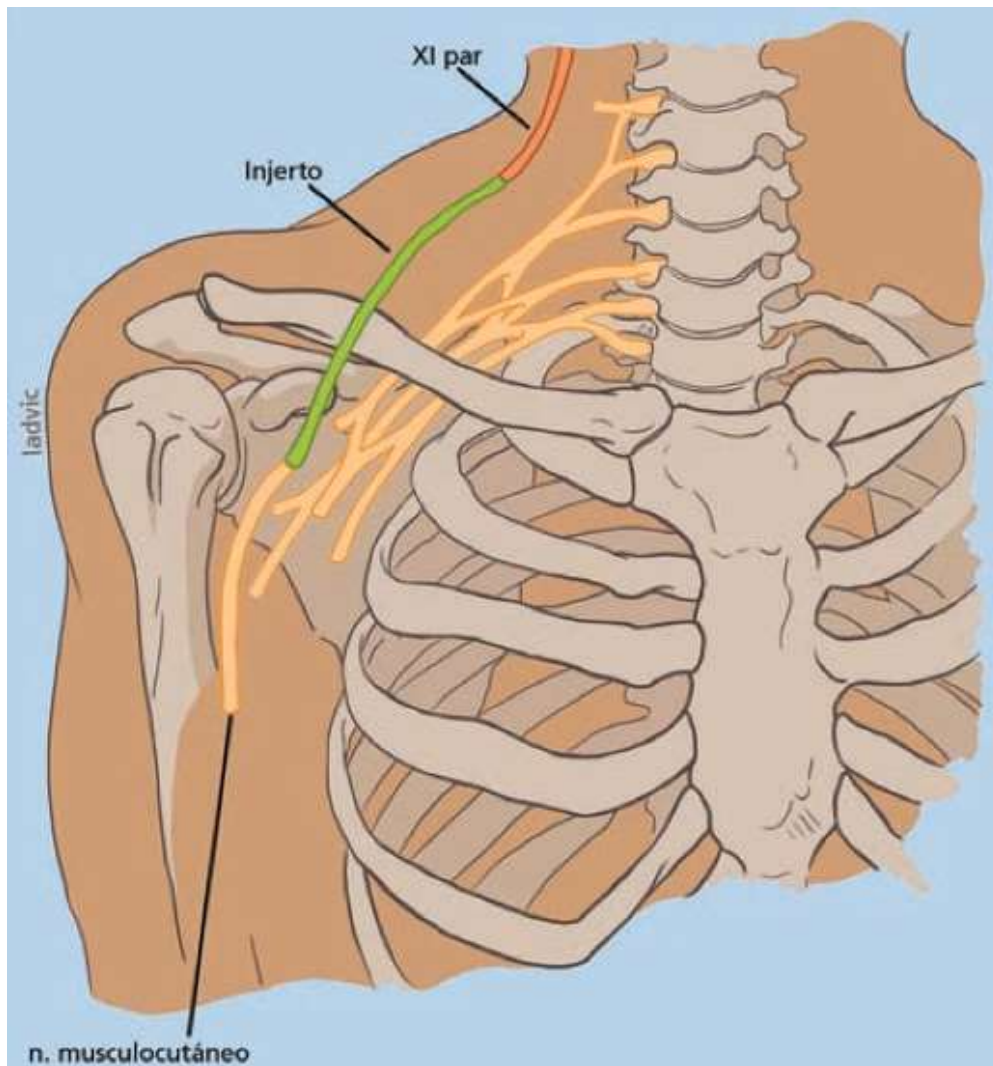


Figura 11. Transferencia de nervio espinal accesorio a nervio musculocutáneo a través de injerto largo de nervio sural. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

Terzis^{124,126} publicó su experiencia neurotizando el nervio supraescapular en 118 pacientes, utilizando en 80 de ellos el nervio espinal accesorio y obteniendo resultados buenos o excelentes en el 79%. Merrell, en su metanálisis de 2001⁷⁶ puso de manifiesto mejores resultados al neurotizarse el nervio supraescapular frente al nervio axilar, con un éxito del 92% y 69% respectivamente. Estas cifras contrastan con las publicadas por Malessy y Oberlin^{66,90}, con una tasa de éxito inferior al 20% al utilizar el nervio espinal accesorio como donante del nervio supraescapular. Songchaoren¹¹⁵, en su serie de 577 casos, obtuvo un balance motor MRC igual a tres o superior al neurotizarse el nervio supraescapular en un 80%, el nervio musculocutáneo en un 74% y el nervio axilar en un 60%.

En resumen, el nervio espinal accesorio se utiliza en la actualidad como donante de axones del nervio musculocutáneo con el fin de restituir la flexión del codo, y de los nervios supraescapular y axilar con el fin de restituir la estabilidad dinámica del hombro.

Factores como la no necesidad de utilizar un injerto interpuesto y la opción de poder recurrir a otras transferencias para reinervar el nervio musculocutáneo, posicionan la transferencia del nervio espinal accesorio al nervio supraescapular como una de las mejores opciones de reconstrucción en las lesiones de plexo braquial (figura 12).

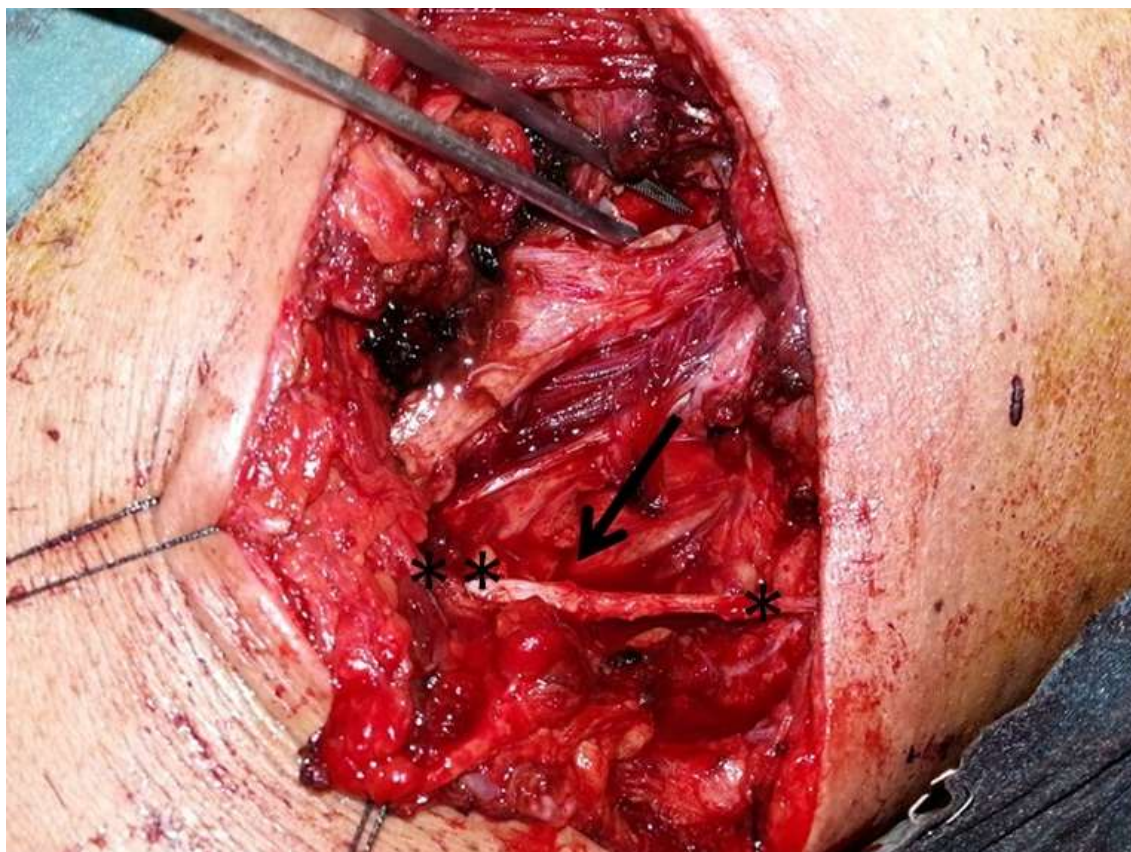


Figura 12. Paciente intervenido en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Avulsión de todas las raíces tras traumatismo por tracción del plexo braquial. Transferencia extraplexual, nervio espinal accesorio a nervio supraescapular. *: nervio espinal accesorio, **: nervio supraescapular, flecha: neurorrafia directa.

1.3.2.2 Nervios intercostales

El uso de los nervios intercostales para neurotizarse el nervio musculocutáneo fue descrita por primera vez por Seddon y Yeoman¹⁰³ en 1963. Sin embargo, a tenor de la experiencia acumulada, su principal impulsor fue Tsuyama¹²⁷, quien recomendaba el uso de dos o más nervios intercostales a través de una neurorrafia directa, concretamente los 3º, 4º y 5º (figura 13).

En la revisión de Socolovsky de 2013¹¹² se analizan 26 series, 706 casos en total, en los cuales se pone en práctica esta transferencia, apreciándose un balance muscular del MRC de tres o mejor en el 60% y 80% de los pacientes, en función de si la serie clínica era de países del oeste o este respectivamente.

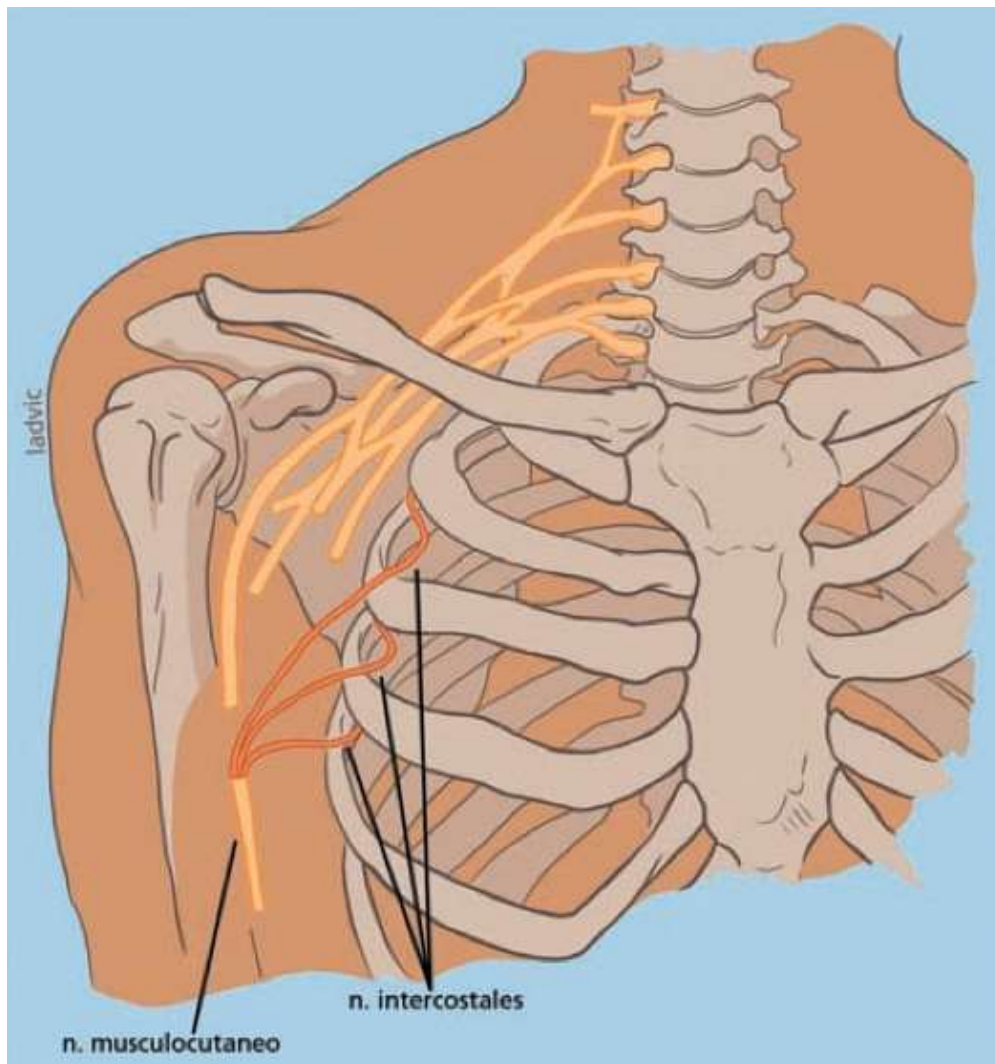


Figura 13. Transferencia directa de nervios intercostales a nervio musculocutáneo. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

Los nervios intercostales han demostrado su eficacia neurotizando el nervio musculocutáneo^{103,112,127} (figura 13), recomendándose el uso de dos intercostales y la neurorrafia directa para optimizar los resultados^{45,76,90,91}. Aunque el uso más extendido de los nervios intercostales es la transferencia al nervio musculocutáneo para restituir la flexión del codo (figura 14), autores como Oberlin han descrito la transferencia a ramas del tríceps^{66,90,115}.

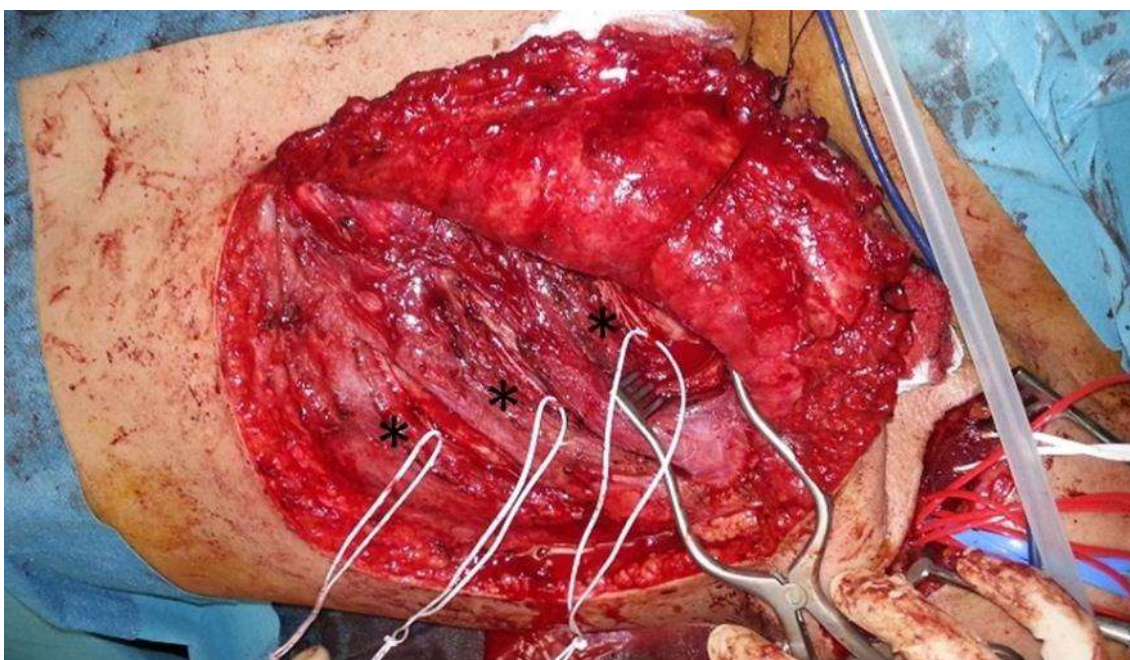


Figura 14. Mismo paciente que en la figura 12. Transferencia extraplexual, tres nervios intercostales a nervio musculocutáneo. Abordaje transpectoral y deltopectoral. *: nervios intercostales.

Si la transferencia de los nervios intercostales al nervio musculocutáneo tiene éxito, durante los dos primeros años el brazo se contrae con los movimientos respiratorios, aunque finalmente se consigue el control voluntario¹¹³. Se ha descrito mediante RM funcional la activación de la corteza motora primaria en pacientes sometidos a esta técnica⁶⁶.

1.3.2.3 Raíces cervicales

El uso de las raíces cervicales C3 y C4, inmediatamente distales a la salida del nervio frénico, para neurotizar diferentes elementos del plexo braquial, fue descrito por Yamada en 1991¹⁴⁴ (figura 15), basándose en el trabajo anatómico de Brunelli realizado 15 años antes¹⁰. En su casuística obtuvo buenos resultados en 9 de 12 pacientes, destacando la importancia de la cirugía precoz. Las críticas de autores como Kline y Songcharoen¹¹⁵, así como la ausencia de buenos resultados registrada por otros autores, ha conducido al abandono de esta técnica.

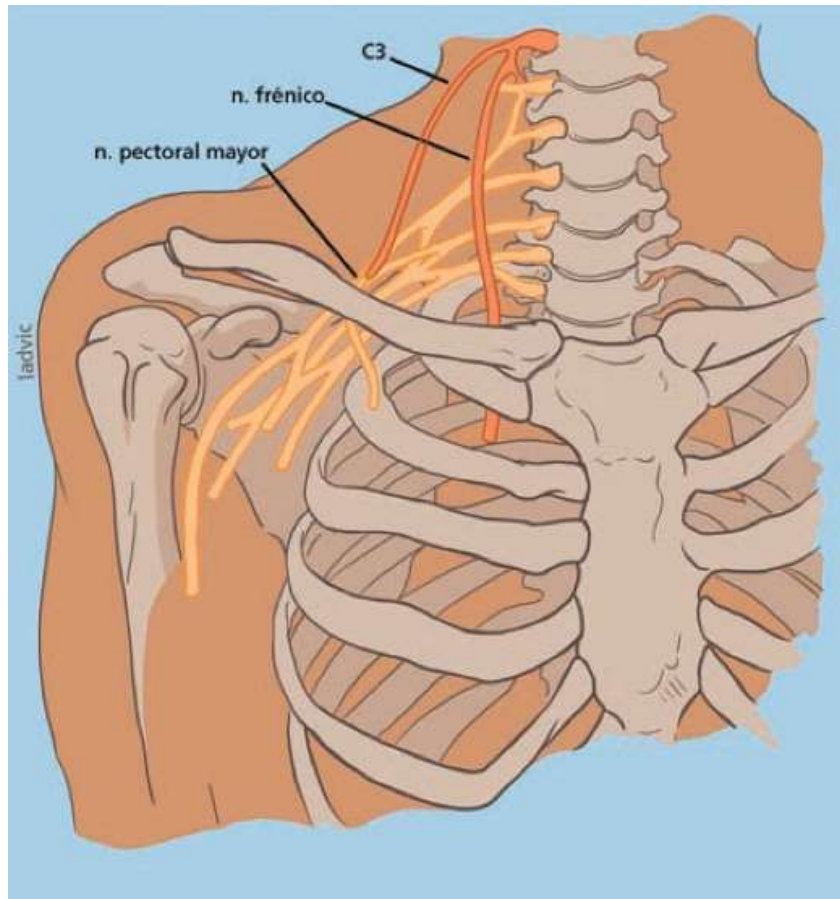


Figura 15. Transferencia de la raíz C3 al nervio pectoral mayor. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

1.3.2.4 Nervio hipogloso

A pesar de que el uso del nervio hipogloso para neurotizar el nervio facial ha cosechado excelentes resultados⁷², no se puede afirmar lo mismo en el caso del plexo braquial. Si bien la experiencia es escasa, destacando los trabajos de Malesy y Ferraresi^{67,24}, y aunque se obtuvo reinervación con un balance muscular MRC de tres o mejor en algunos casos, la falta de control voluntario de los músculos reinervados ha hecho que esta técnica sea abandonada (figura 16).

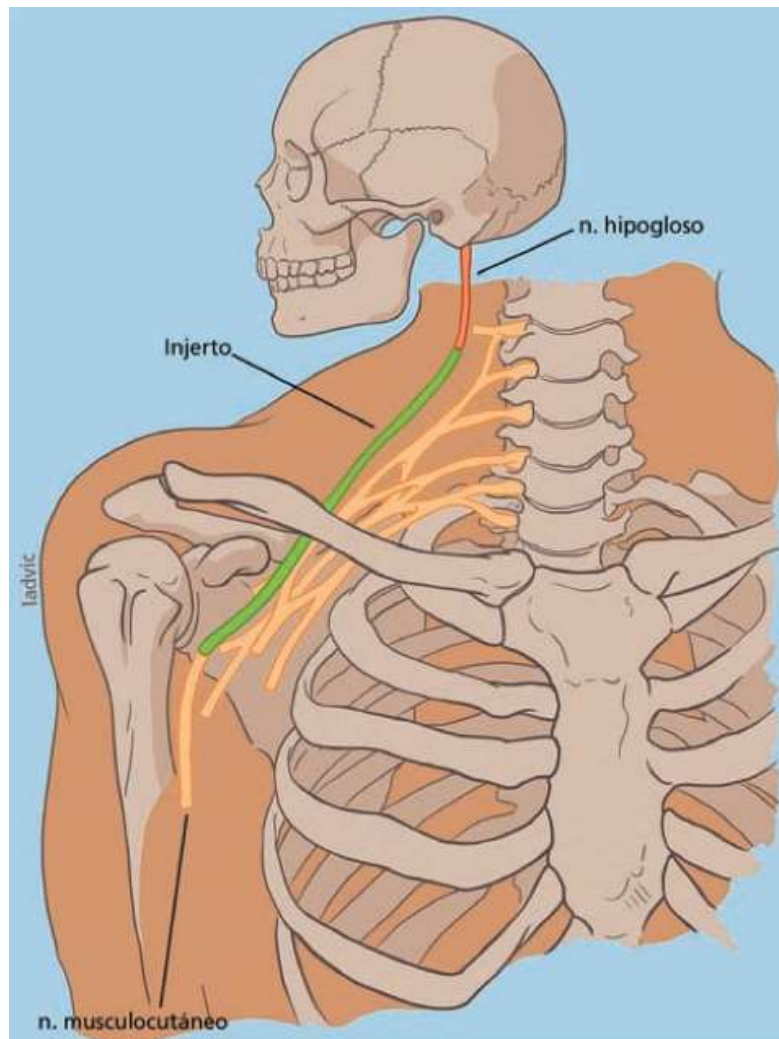


Figura 16. Transferencia del nervio hipogloso al nervio musculocutáneo. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

La neurotización usando raíces cervicales (figura 15)^{10,115,144} o el nervio hipogloso (figura 16) ha sido abandonada en la actualidad debido a los pobres resultados observados^{24,67,72}.

1.3.2.5 Ramos del nervio facial

El uso del ramo del nervio facial al músculo platisma para neurotizarse el nervio pectoral fue descrito por Bertelli en 2007⁷ que publicó el primer caso utilizando el ramo motor del nervio facial al músculo platisma para neurotizarse el nervio pectoral a través de un injerto largo, consiguiendo una aducción del brazo de cuatro del MRC. Posteriormente Socolovsky¹⁰⁹ describió la anatomía quirúrgica de este ramo motor.

Actualmente son necesarios más estudios clínicos para determinar la eficacia de esta transferencia.

1.3.2.6 Raíz C7 contralateral

Sacrificar la raíz C7 contralateral al plexo braquial lesionado para ser utilizada como donante de axones es una técnica descrita y llevada a cabo por primera vez por Gu en China en 1992^{32,33} (figura 17). El riesgo de seccionar la raíz C7 es bajo, suele provocar un déficit motor clínicamente no significativo en el músculo tríceps y un déficit sensitivo que suele compensarse con el tiempo. Sin embargo, se han descrito casos de déficit motor en la extensión de la muñeca y de dolor neuropático^{1,18,126,137}. Esto último parece evitable si sólo se utiliza la parte anterior de la raíz C7¹¹⁶.

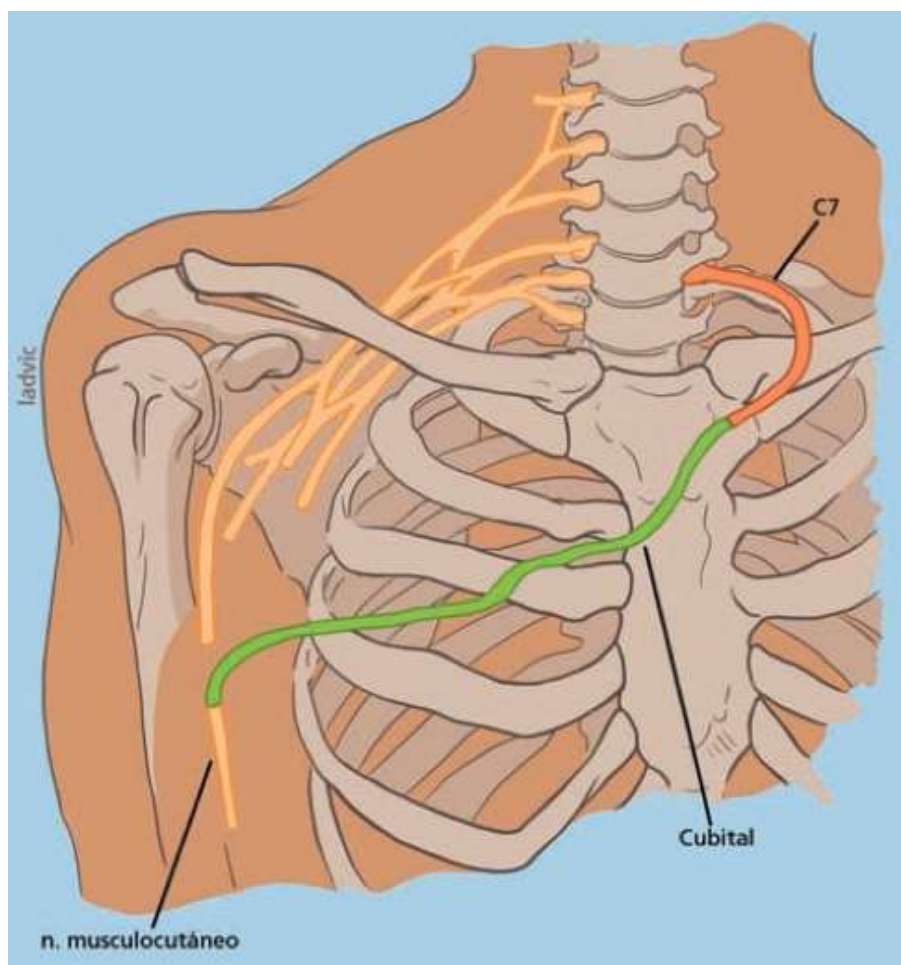


Figura 17. Transferencia de la raíz C7 contralateral al nervio musculocutáneo. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

Esta técnica se ha utilizado fundamentalmente para neurotizarse el nervio mediano, a través de injertos largos, a pesar de diferentes vías de transposición de la raíz C7 como la prefaríngea o prespinal. La imposibilidad de una neurografía directa justificaría los pobres resultados obtenidos, con una tasa de éxito del 20% al reinervar la función motora del nervio mediano y del 50% al reinervar la función sensitiva^{18,32,73,116,136,137}.

En un intento por optimizar los resultados, recientemente se ha descrito la doble neurotización en 75 pacientes, directa del tronco inferior y a través de injerto largo del nervio musculocutáneo, requiriendo en la mitad de ellos de una osteotomía humeral de unos 3 o 4 cm para evitar el injerto. Los resultados descritos son de un balance muscular tres o mejor del MRC en el 60%, 64%, 53% y 72%, para la flexión de codo, flexión de dedos, flexión pulgar y flexión de muñeca, respectivamente¹³⁹.

La complejidad técnica, el riesgo de provocar un déficit en el miembro sano del paciente, unos resultados no totalmente satisfactorios, además de que a pesar de que se consiga la reinervación está descrita la cocontracción con el miembro sano⁶, hacen que el uso de esta opción reconstructiva de plexo no esté muy extendida.

1.3.3 El nervio frénico como donante

El nervio frénico es una rama terminal del plexo cervical, constituido por el ramo anterior de C4 y una contribución variable de los ramos anteriores de C3 y C5, así como un nervio frénico accesorio en más del 50% de los casos⁶². Se trata de un nervio motor puro, lo que a priori lo convierte en una opción excelente como donante de axones en las lesiones avulsivas del plexo braquial. Sin embargo, son numerosos los autores que abogan por otras opciones de neurotización, considerando inaceptable el riesgo de detrimento de la función respiratoria al sacrificar el nervio frénico¹¹⁹. Las mayores series clínicas utilizando esta técnica corresponden a cirujanos orientales, mientras que algunos autores occidentales ni siquiera la nombran como opción en sus trabajos^{9,78,92,128} (figura 18).

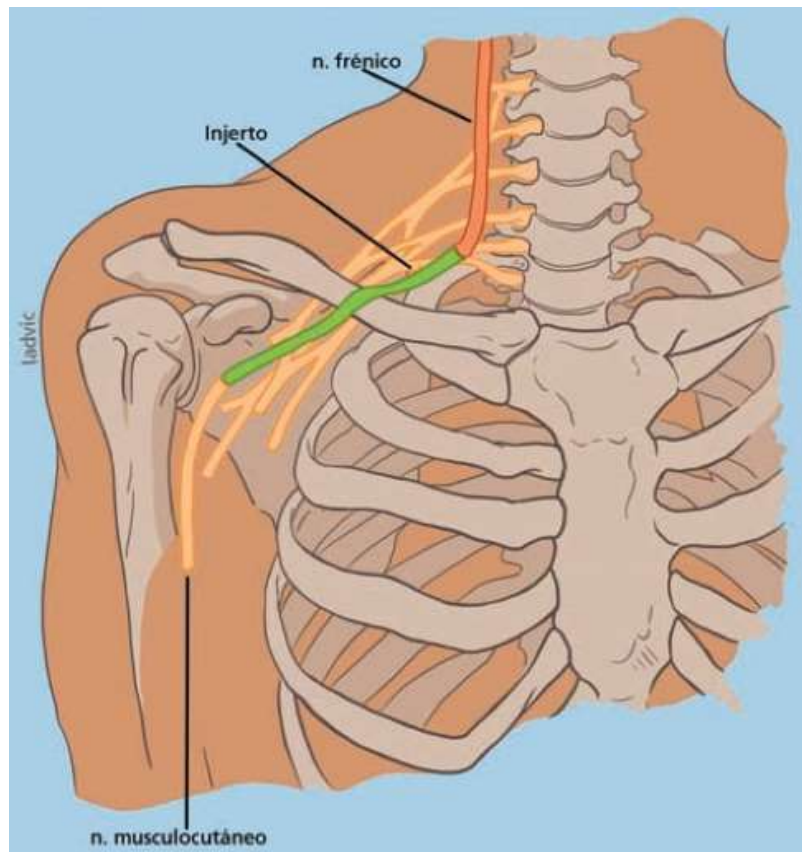


Figura 18. Transferencia del nervio frénico al nervio musculocutáneo a través de injerto largo de nervio sural. Tomado de: Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. Neurocirugía (Astur) 2011;22:507-20.

El primer autor en proponer el nervio frénico como donante fue Lurje en 1948⁶⁴, sin embargo, fue en la década de los 70 cuando comenzó a utilizarse esta técnica en China, publicando Gu la primera serie clínica en 1989³⁴. Este mismo autor en 1996 ya había transferido el nervio frénico en 65 pacientes (en 49 casos al nervio musculocutáneo) obteniendo un balance motor de tres o mejor del MRC en el 77% y relacionando la demora de la cirugía con el pronóstico, con un promedio de 290 días los casos con buen resultado y de 656 los que no³³. Si se analiza el resto de publicaciones posteriores se observa un éxito que oscila en torno al 75%, neurotizando el nervio musculocutáneo, supraescapular, axilar, mediano y la división anterior del tronco primario superior. La tasa de complicaciones respiratorias con relevancia clínica es del 0% si son excluidos los pacientes en los que se llevó a cabo la transferencia del nervio frénico junto los nervios intercostales^{15,19,23,60,63,83,108,113,122,123,141,143,147-149}.

La técnica quirúrgica para llevar a cabo la transferencia del nervio frénico es sencilla. Con el abordaje supraclavicular estándar que se utiliza para exponer y explorar el plexo braquial en las lesiones por estiramiento del mismo se localiza el nervio frénico, siempre en la cara anterior del músculo escaleno anterior, con una trayectoria

única de lateral a medial que hace fácil su identificación (figura 19). A pesar de esto, es recomendable su estimulación eléctrica directa, no sólo para confirmar que se trata del nervio en cuestión, sino también para comprobar que es un nervio funcional y que puede ser utilizado como donante de axones. Una vez se vaya a proceder a la transferencia, es recomendable que el nervio se seccione lo más distal posible, ya que si la diana nerviosa a neurotizarse encuentra a nivel supraclavicular (nervio supraescapular o la división anterior del tronco primario superior) se podrá realizar una neurografía directa. En caso de que la diana nerviosa sea distal (nervio musculocutáneo o ramo motor al bíceps) el uso de injerto largo es obligado. Mientras que la transferencia proximal a la división anterior del tronco primario superior a través de una neurografía directa tiene la ventaja de evitar el injerto, los axones en crecimiento tenderán a dispersarse sobre estructuras nerviosas que no interesan de cara a restituir la flexión del codo. La transferencia distal al ramo motor del bíceps o al nervio músculo cutáneo evita esta dispersión, sin embargo requiere de un injerto largo. Liu⁶⁰ en un estudio comparativo sobre 33 pacientes, no encontró diferencias a la hora de utilizar el nervio frénico con o sin injerto, relacionando la demora quirúrgica por encima de los 4 meses como un factor de mal pronóstico. Una opción descrita recientemente en la literatura es la sección distal del nervio frénico a través de toracoscopia con el fin de neurotizarse el nervio musculocutáneo sin injerto interpuesto, obteniendo el autor un resultado de fuerza bicipital de tres o mejor del MRC en el 70%^{142,143}.

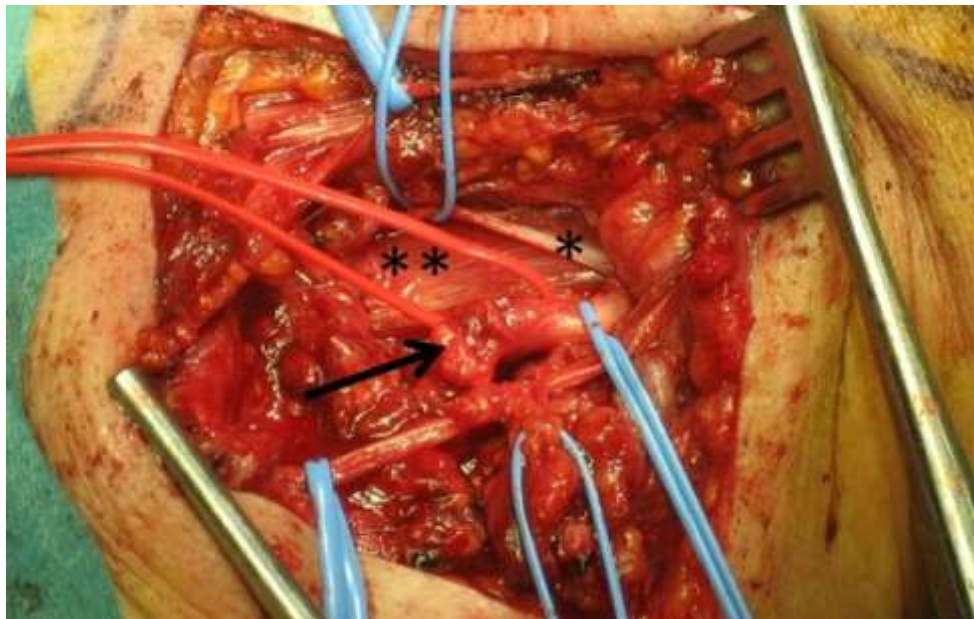


Figura 19. Paciente intervenida en el Servicio de Neurocirugía del Hospital Regional Universitario de Málaga. Sección traumática del tronco primario superior. Imagen de la exploración quirúrgica. A través de un abordaje supraclavicular estándar el nervio frénico se expone fácilmente en su trayecto por encima del músculo escaleno anterior. *: nervio frénico, **: músculo escaleno anterior, flecha: sección del tronco primario superior.

El nervio frénico tiene casi el doble de axones motores que la porción distal de un nervio intercostal. Por lo tanto, en la transferencia de nervios intercostales casi siempre se utilizan dos o tres^{83,108}. Esto origina que el tiempo quirúrgico de esta última técnica sea considerablemente mayor, y según el estudio comparativo de Liu⁶¹ los resultados a la hora de restituir la flexión del codo son mejores al usar el nervio frénico, sin significación estadística. También señalar el impacto estético de la transferencia de nervios intercostales, mucho mayor que al usar el nervio frénico.

Entre las limitaciones de la transferencia del nervio frénico se describe la contraindicación de esta técnica en pacientes menores de tres años de edad⁹⁴, la posibilidad de que el nervio se encuentre lesionado por la avulsión de raíces altas (figura 20), que el paciente presente una situación respiratoria pobre en el contexto del politraumatismo y el riesgo del uso combinado de la transferencia de nervios intercostales, aunque algunos autores ponen en práctica esta técnica conjunta¹⁴⁷.



Figura 20. Mismo paciente que en la figura 11 y 12. El daño tisular supraclavicular por el traumatismo por tracción, la reacción fibrosa secundaria y la distorsión anatómica consecuente hicieron imposible localizar el nervio frénico. La punta de la pinza quirúrgica señala una cavidad necrótica en la zona anatómica del músculo escaleno anterior, donde debería ubicarse el nervio frénico.

En la actualidad, aunque el uso del nervio frénico no está extendido entre los diferentes cirujanos, parece una opción útil a la hora de restituir la flexión del codo; asimismo, aunque la experiencia es menor, también parece una buena opción en el contexto de neurotizarse nervios como el supraescapular, axilar y mediano.

1.4. Hipótesis y justificación del estudio

Las lesiones por tracción, completas o casi completas del plexo braquial en el adulto son devastadoras para la funcionalidad del miembro superior a largo plazo e implican un gran detrimento de la calidad de vida de estos pacientes. Minimizar estas secuelas debe ser un objetivo de la cirugía del plexo braquial. Sin embargo, las posibilidades reconstructivas son limitadas.

En el arsenal terapéutico se distinguen la reconstrucción con injerto (cuando existe algún cabo proximal no avulsionado) y la transferencia nerviosa extraplexual (cuando las raíces están avulsionadas).

En este último grupo, gozan de gran aceptación la transferencia del nervio espinal accesorio y la transferencia de los nervios intercostales. Sin embargo, la transferencia del nervio frénico aún no es considerada como una buena opción por muchos cirujanos, especialmente por el riesgo de parálisis diafragmática que conlleva el sacrificio de dicho nervio.

A partir de los datos expuestos con anterioridad proponemos como hipótesis de trabajo que la transferencia extraplexual del nervio frénico, en adultos con lesión a nivel de C5-C6-C7-C8 y C5-C6-C7-C8-D1 del plexo braquial por tracción permitiría restituir la función del nervio neurotizado de forma eficaz y segura, permitiendo por tanto ampliar el arsenal terapéutico en los pacientes adultos con lesiones devastadoras de plexo braquial.

Para demostrar esta hipótesis hemos planteado los siguientes objetivos.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Establecer la eficacia y seguridad de la transferencia del nervio frénico en los pacientes adultos con lesiones C5-C6-C7-C8 y C5-C6-C7-C8-D1 de plexo braquial por tracción mediante un ensayo retrospectivo, observacional transversal, descriptivo y analítico.

2.2 Objetivos específicos

- Describir las características epidemiológicas y clínicas de la población
- Comparar los pacientes en los que la técnica quirúrgica no fue exitosa frente a aquellos en los que la técnica quirúrgica fue exitosa en base a las siguientes variables: edad, sexo, peso, altura, índice de masa corporal (IMC), sobrepeso, causa del traumatismo, extensión de la lesión nerviosa, demora entre el traumatismo y la realización de la cirugía, longitud de los injertos utilizados en la transferencia, tiempo de seguimiento del paciente y puntuación en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador.
- Comparar la tasa de éxito y complicaciones de la transferencia del nervio frénico en nuestro grupo con las series históricas publicadas en la literatura de este procedimiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Diseño del estudio

Estudio retrospectivo observacional transversal, descriptivo y analítico, sobre una serie de casos de pacientes adultos sometidos a una transferencia del nervio frénico como tratamiento de una lesión por tracción del plexo braquial.

3.2 Población seleccionada

Se revisaron 276 lesiones traumáticas de plexo braquial intervenidas quirúrgicamente, desde enero de 2004 hasta diciembre de 2013, en la Unidad de Cirugía de los Nervios Periféricos y Plexo Braquial del Servicio de Neurocirugía del Hospital Universitario de Buenos Aires, Argentina.

Fueron incluidos de forma retrospectiva en el estudio todos los pacientes de ambos géneros, mayores de 14 años, con parálisis braquial severa (C5-6-7-8 y C5-6-7-8-D1) sometidos a la transferencia extraplexual del nervio frénico seguidos en nuestra unidad. Los pacientes menores de 14 años, o con un seguimiento inferior a los 18 meses, o con alguna amputación del miembro superior, quedaron excluidos de la serie.

Se obtuvo un consentimiento informado firmado de cada paciente.

3.3 Protocolo y plan de trabajo desarrollados

Se registraron variables clínicas, demográficas y quirúrgicas, con la finalidad de definir la serie de pacientes y evaluar aquellas con posible interés pronóstico en el éxito de la técnica.

La evaluación prequirúrgica de los pacientes incluyó: estudio neurofisiológico (ENG y EMG), estudio de función respiratoria y mielografía por RM. Sólo se consideraron candidatos a transferencia nerviosa extraplexual los pacientes sin raíces viables en los estudios preoperatorios y tras los hallazgos intraoperatorios que confirmaron la avulsión de raíces que conforman el plexo braquial.

La técnica quirúrgica incluyó un abordaje supraclavicular estándar a través de una incisión paralela a la clavícula, 1.5 cm por encima de ésta, permitiendo la exposición completa del plexo braquial supraclavicular (raíces C5-C6-C7, tronco primario superior y medio, división anterior y posterior del tronco primario superior y medio, y nervio supraescapular), el nervio frénico y el nervio espinal accesorio.

- Cuando la estructura a neurotizarse fue la división anterior del tronco primario superior (DATPS), con la finalidad de restituir la flexión del codo, se utilizó un autoinjerto corto del nervio sural en los casos donde no fue posible la neurografía directa sin tensión.
- Cuando la estructura a neurotizarse fue un nervio más distal, se procedió a un segundo abordaje a través de una incisión longitudinal en el margen caudal de la axila y la corredera bicipital interna hasta exponer el nervio musculocutáneo o los ramos al bíceps (para restituir la flexión del codo), el nervio radial o los ramos al tríceps (para restituir la extensión del codo), el nervio pectoral (para restituir la aducción del

brazo) o el nervio axilar (para restituir la abducción del brazo). En los casos en los que se procedió a neurotizarse una estructura nerviosa distal siempre fue necesario un autoinjerto largo de nervio sural.

- Cuando se decidió restituir una función concreta con la transferencia del nervio frénico, no se procedió a ningún otro procedimiento reconstructivo que pudiese ayudar a la restitución de dicha función.

El seguimiento postoperatorio se llevó a cabo a través de una revisión trimestral durante un mínimo de 18 meses. Cada paciente fue incluido en un programa intensivo de tratamiento rehabilitador que comenzó tres semanas después de la cirugía.

La adherencia a este tratamiento fue monitorizada a través de una escala ya validada¹¹¹, donde se califica de uno a cuatro el grado de adherencia (tabla 1).

Se utilizó la escala MRC para determinar el grado de fuerza alcanzado por el músculo cuya función se pretendía restituir, considerándose un buen resultado el grado tres o mejor, y mal resultados el grado dos o peor.

Todos los pacientes se sometieron durante el seguimiento a un cuestionario con la finalidad de identificar problemas respiratorios derivados de sacrificar la función del nervio frénico (tabla 2). En caso de sospecha de compromiso respiratorio se solicitaron estudios de función respiratoria para cuantificar de forma objetiva el déficit.

Tabla 1. Escala de adherencia al tratamiento rehabilitador

Descripción de la puntuación:

- 1. No rehabilitación o menos de una sesión por semana.
- 2. Rehabilitación más de una vez por semana, pero no en centro especializado en neuro-rehabilitación.
- 3. Buena adherencia al programa de rehabilitación completo, pero no en un centro especializado en neurorehabilitación; periódicamente evaluado en un centro especializado en neuro-rehabilitación.
- 4. Perfecta adherencia al programa de rehabilitación completo en un centro especializado en neuro-rehabilitación.

Tabla 2. Cuestionario de control para identificar problemas respiratorios

Descripción de la puntuación:

- ¿Siente dificultad para respirar cuando está acostado en la cama?
- ¿Puede levantarse de la cama, bañarse y vestirse sin dificultad respiratoria?
- ¿Puede correr 300 metros sin detenerse por falta de aire?
- ¿Puede subir tres tramos de escaleras sin detenerse por falta de aire?

3.4 Definición de variables

3.4.1 Variables principales

El resultado de la transferencia nerviosa y las complicaciones respiratorias derivadas de la misma fueron consideradas las variables principales del estudio.

Resultado de la transferencia nerviosa:

Se procedió a una distribución por grupos en base a la puntuación del MRC obtenida durante el seguimiento:

- Grupo de pacientes con puntuación MRC 1.
- Grupo de pacientes con puntuación MRC 2.
- Grupo de pacientes con puntuación MRC 3.
- Grupo de pacientes con puntuación MRC 4.

Se definió como buen resultado a aquellos pacientes que mostraron un balance muscular MRC de tres o superior en el músculo neurotizado con el nervio frénico durante el seguimiento.

Se definió como mal resultado a aquellos pacientes que mostraron un balance muscular MRC de dos o inferior en el músculo neurotizado con el nervio frénico durante el seguimiento.

Complicaciones respiratorias:

Cualquier síntoma respiratorio registrado durante el seguimiento tras someter al paciente al cuestionario de control se consideró como una complicación respiratoria.

3.4.2 Variables con interés pronóstico en el resultado de la transferencia

En base a lo descrito previamente en la literatura¹¹⁰, como variables de interés pronóstico en el resultado de la transferencia se seleccionaron las siguientes: edad, sexo, peso, altura, IMC, sobrepeso, demora entre el traumatismo y la cirugía, causa del traumatismo, extensión de la lesión nerviosa, longitud de los injertos utilizados en la transferencia, tiempo de seguimiento del paciente y puntuación en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador.

Edad: Se registró la edad en el momento de la cirugía y se procedió a una distribución por grupos de edad, de cara a definir las características demográficas de la muestra:

- Grupo de pacientes entre 14 y 19 años.
- Grupo de pacientes entre 20 y 29 años.
- Grupo de pacientes entre 30 y 39 años.
- Grupo de pacientes de 40 o más años.

Se estudió la influencia de la edad media en años en el resultado de la transferencia nerviosa.

Sexo: Se estudió la influencia de la distribución por sexo en el resultado de la transferencia nerviosa.

Altura: Se estudió la influencia de la altura media en cm en el resultado de la transferencia nerviosa.

Peso: Se estudió la influencia del peso medio en kg en el resultado de la transferencia nerviosa.

IMC: Se estudió la influencia del IMC medio en el resultado de la transferencia nerviosa.

Sobrepeso: Se procedió a una distribución por grupos de peso, de cara a definir las características demográficas de la muestra:

- Grupo de pacientes con peso normal (IMC 25 o menor).
- Grupo de pacientes con sobrepeso (IMC 25-30).
- Grupo de pacientes obesos (IMC > 30).

Se estudió la influencia de la distribución por sobrepeso o no en el resultado de la transferencia nerviosa.

Causa del traumatismo: Se procedió a una distribución por grupos, de cara a definir las características demográficas de la muestra:

- Grupo de pacientes que sufrieron accidentes de motocicleta.
- Grupo de pacientes que sufrieron accidentes de coche.
- Grupo de pacientes que sufrieron otro tipo de accidente.

Se estudió la influencia de la distribución por accidente de motocicleta o no en el resultado de la transferencia nerviosa.

Demora entre el traumatismo y la cirugía: Se procedió a una distribución por grupos de demora quirúrgica, de cara a definir las características demográficas de la muestra:

- Grupo de pacientes intervenidos en los primeros 6 meses.
- Grupo de pacientes intervenidos entre el mes 6 y 12.
- Grupo de pacientes intervenidos a partir del mes 12.

Se estudió la influencia de la demora quirúrgica media en meses en el resultado de la transferencia nerviosa.

Extensión de la lesión: Se estudió la influencia de la distribución por lesión completa de plexo (C5-T1) o no en el resultado de la transferencia nerviosa.

Longitud del injerto: Se estudió la influencia de la longitud del injerto media en cm en el resultado de la transferencia nerviosa.

Seguimiento del paciente: Se estudió la influencia del seguimiento postquirúrgico medio en meses en el resultado de la transferencia nerviosa.

Adherencia al tratamiento rehabilitador: Se procedió a una distribución por grupos en base a la puntuación recibida en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador:

- Grupo de pacientes con puntuación 1.
- Grupo de pacientes con puntuación 2.
- Grupo de pacientes con puntuación 3.
- Grupo de pacientes con puntuación 4.

Se estudió la influencia de la adherencia al tratamiento, como puntuación media, en el resultado de la transferencia nerviosa.

3.4.3 Variables de interés quirúrgico

Estructura nerviosa neurotizada: Se procedió a una distribución por grupos en base a la estructura nerviosa que recibió la transferencia del nervio frénico:

- Nervio musculocutáneo.
- DATPS.
- Otra estructura nerviosa.

Localización de la neurorrafia distal: Se procedió a una distribución por grupos en base a la localización de la neurorrafia entre el injerto y la estructura nerviosa neurotizada:

- División del tronco.
- Cordón.
- Nervio periférico.

3.5 Comparación de resultado y complicaciones con series históricas

Dado que no contábamos con un grupo control propiamente definido, se procedió a la comparación entre la serie actual con 15 series históricas seleccionadas, evaluando la tasa de buenos resultados y la tasa de complicaciones de la transferencia del nervio frénico.

3.6 Procesamiento y análisis de datos

La recogida de datos se realizó en el programa Microsoft Excel 2008 (Microsoft Inc, Redmond, WA, USA). Para el estudio analítico de los resultados se empleó el programa estadístico SPSS Statistics 15.0 para Windows (SPSS Inc, Chicago IL, USA).

Se realizaron dos tipos de análisis estadístico, descriptivo e inferencial:

- Descriptivo: incluyendo media y desviación típica para cada variable cuantitativa y porcentaje para cada variable cualitativa.
- Inferencial: de forma previa a seleccionar el test estadístico adecuado para el análisis inferencial se sometió a cada variable al test de Kolmogorov-Smirnov

para verificar la normalidad y al test de Levene para evaluarla igualdad de las varianzas.

Las variables con interés pronóstico seleccionadas, para comparar el grupo de pacientes con buen resultado y el grupo de pacientes con mal resultado, se sometieron a los análisis comparativos detallados a continuación, en función de las características de cada variable.

- Variables cualitativas: test χ^2 de Pearson.
- Variables cuantitativas: test t de Student.

RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1 Descripción demográfica y clínica de la serie

51 pacientes de los 271 analizados cumplieron los criterios de inclusión del estudio. De la muestra, el sexo predominante fue el masculino, siendo el rango de edad dominante el de los 20-29 años con un 60.8%. Casi el 60% de los pacientes presentaron un peso normal, mientras que el resto cumplió criterios de sobrepeso (n = 19) u obesidad (n = 2). El mecanismo traumático fue el accidente de motocicleta en todos los casos excepto 4 (tabla 3). Tres cuartas partes de los pacientes presentaron una lesión completa del plexo braquial (C5-T1), el resto una lesión casi completa (C5-C8). Todos los pacientes presentaron una avulsión de las raíces afectas.

Tabla 3. Características clínicas y demográficas de la serie

	N	%
Tamaño muestral	51	
Hombres	47	92.2%
Edad en el momento de la cirugía		
< 20	7	13.7%
20-29	31	60.8%
30-39	8	15.7%
≥ 40	5	9.8%
Peso por IMC		
Normal	30	58.8%
Sobrepeso	19	37.3%
Obesidad	2	3.9%
Extensión de la lesión		
C5-D1	39	76.5%
C5-C8	12	23.5%
Causa del traumatismo		
Accidente de motocicleta	47	92.2%
Accidente de coche	3	5.9%
Otro	1	2.0%

4.2 Descripción quirúrgica

El tiempo medio entra el traumatismo y la cirugía fue de 5.7 meses (desviación típica de 3.5), con un rango de 1 a 24 meses; 40 pacientes (78%) se sometieron a cirugía reconstructiva dentro de los 6 primeros meses, 9 (18%) entre el mes 6 y el 12, y 2 (4%) a partir del mes 12. El nervio neurotizado de forma más frecuente con el nervio frénico

fue el nervio musculocutáneo (n = 21, 41%), seguido de la DATPS (n = 11, 22%). La mayoría (68.6%) de los injertos se coaptaron a un nervio periférico, mientras que el resto se coaptó a alguna de las estructuras que conforman el plexo braquial, concretamente el 25.5% a las divisiones y el 5.9% a los cordones (tabla4).

Tabla 4. Descripción quirúrgica de la serie

	N	%
Demora entre trauma y cirugía		
< 6	40	78%
6-12	9	18%
> 12	2	4%
Estructura nerviosa neurotizada		
Musculocutáneo	21	41.2%
DATPS	11	21.6%
Otro	19	37.3%
Nivel de coaptación del injerto		
División	13	25.5%
Cordón	3	5.9%
Nervio periférico	35	68.6%

4.3 Descripción de los resultados y seguimiento de la serie

El seguimiento postquirúrgico medio fue de 32.5 meses, con un rango de 18 a 57 meses. La recuperación motora del musculo neurotizado comenzó con movimientos leves asociados a la inspiración profunda, posteriormente, durante los siguientes 4 a 9 meses, el movimiento se hizo más evidente, pero aún relacionado con la respiración (“brazo que respira”). Finalmente, tras este periodo el movimiento se hizo independiente de la respiración.

Respecto el balance motor observado en los pacientes, 32 de los 51 (62.7%) desarrollaron un grado MRC de 4, 11 (21.6%) un grado MRC de 3, 2 (3.9%) un grado MRC de 2 y 6 un grado MRC de 1 (11.8%). Un grado MRC de 3 o mejor se consideró como un buen resultado, logrado en 43 de los 51 pacientes (84.3%). En la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador 10 pacientes alcanzaron el grado 4 (19.6%), 20 pacientes el grado 3 (39.2%), 16 pacientes el grado 1 o 2 (31.4%).

Sólo 2 pacientes desarrollaron síntomas respiratorios, ambos con lesiones del plexo braquial derecho, el primero un paciente de 31 años obeso que refería disnea cuando corría o subía escaleras, el segundo una paciente de 48 años con sobrepeso y los mismos síntomas. Ambos mostraron una capacidad vital disminuida en torno al 20% los primeros meses, sin embargo a los 2 años la reducción era en torno al 10% y los síntomas desaparecieron (tabla 5).

Tabla 5. Seguimiento y resultados de la serie

	N	%
Seguimiento		
Media 32.5 meses		
Rango 18-57 meses		
Escala de fuerza del MRC		
M1	6	11.8%
M2	2	3.9%
M3	11	21.6%
M4	32	62.7%
Resultado general		
Bueno	43	84.3%
Malo	8	15.7%
Puntuación en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador		
1	4	7.8%
2	16	31.4%
3	20	39.2%
4	10	19.6%
Síntomas respiratorios	2	3.9%

4.4 Análisis inferencial entre el grupo con buen resultado y mal resultado

No existieron diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos en las variables de edad media, porcentaje de sexo femenino, altura media en cm, peso medio en kg, IMC, porcentaje de sobrepeso, demora entre traumatismo y cirugía en meses, porcentaje de accidente de motocicleta, porcentaje de lesiones completas y tiempo de seguimiento medio en meses.

Sí existieron diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos en las variables de longitud media del injerto (9.8 cm vs 15.1 cm, grupo de buen resultado y mal resultado respectivamente, $p = 0.01$), y en la puntuación en la escala de adherencia al tratamiento rehabilitador (2.86 vs 2, grupo de buen resultado y mal resultado respectivamente, $p = 0.01$) (tabla 6).

Tabla 6. Comparación entre grupo de buen resultado y mal resultado

	Buen resultado	Mal resultado	Test	Significancia
N	43	8		
Edad media (años)	27.2	22.8	t = 1.37	p = 0.18
% mujeres	9.3%	0.0%	$\chi^2 = 0.81$	p = 0.37
Altura media (cm)	168.7	170.4	t = 0.46	p = 0.65
Peso medio (kg)	69.4	72.3	t = 0.68	p = 0.50
IMC medio	24.4	24.7	t = 0.28	p = 0.78
% sobrepeso	50.0%	39.5%	$\chi^2 = 0.31$	p = 0.58
Media demora cirugía (meses)	5.4	7.3	t = 1.43	p = 0.16
% accidentes de motocicleta	90.7%	100.0%	$\chi^2 = 0.81$	p = 0.67
% C5-D1	74.4%	87.5%	$\chi^2 = 0.64$	p = 0.42
Longitud media injerto (cm)	9.8	15.1	t = 2.90	p = 0.01
Seguimiento medio (meses)	32.7	31.0	t = 0.31	p = 0.76
Media adhesión rehabilitación	2.86	2.00	t = 2.67	p = 0.01

4.5 Comparación de resultado y complicaciones con series históricas

15 series históricas fueron seleccionadas^{15,19,23,33,60,63,83,108,113,122,133,141,143,147,149}, en total 263 pacientes con patología traumática de plexo braquial sometidos a una transferencia del nervio frénico. En 197 pacientes (75%) se obtuvo un buen resultado, con un rango del 29 al 100%. En 11 trabajos se especificaron las consecuencias respiratorias de la técnica, la mayoría de los pacientes presentaron alguna alteración en las pruebas de función respiratoria, sin embargo sólo manifestaron síntomas cuando además del nervio frénico se transferían los nervios intercostales (la mayoría de forma transitoria y ante grandes esfuerzos). Si se excluyen los trabajos donde la transferencia del nervio frénico se realizó junto la de nervios intercostales^{33,147,149} y los trabajos donde no se especificaron las complicaciones^{19,23,83,133}, el número de pacientes es de 108 y la cifra de complicaciones respiratorias es de cero.

Si bien no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la tasa de buenos resultados entre la serie histórica y la actual (p = 0.15) (tabla 7). Sí observamos diferencias estadísticamente significativas en la tasa de complicaciones entre la serie histórica y la actual (p = 0.038) (Tabla 8).

Analizando los datos conjuntos de la serie histórica y la actual, se cifra la tasa de éxito de la técnica en un 76.43% y la tasa de complicaciones en un 1.2% (tablas 7 y 8).

Tabla 7. Buenos resultados, comparación entre serie histórica y actual.

Tabla de Frecuencias de Resultado (filas) por Muestra (columnas)				
Número de Casos: 314				
Muestra	H	A	Total	
Resultado			Fila	
E	197 62.74	43 13.69	240 76.43	
F	66 21.02	8 2.55	74 23.57	
Total	263	51	314	
Columna	83.76	16.24	100.00	
Chi-Cuadrado de Resultado (filas) por Muestra (columnas)				
Tamaño Muestral:	314			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	2.0993			
G.L.:	1			
p-valor:	0.1474			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	0 de 4, un 0.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	0 de 4, un 0.0000%			

H: serie histórica, A: serie actual, E: éxitos, F: fracasos.

Tabla 8. Complicaciones, comparación entre serie histórica y actual.

Tabla de Frecuencias de Complicaciones (filas) por Muestra (columnas)				
Número de Casos: 159				
Muestra	H	A	Total	
Complicaciones			Fila	
N	108 67.92	49 30.82	157 98.74	
S	0 0.00	2 1.26	2 1.26	
Total	108	51	159	
Columna	67.92	32.08	100.00	
Chi-Cuadrado de Complicaciones (filas) por Muestra (columnas)				
Tamaño Muestral:	159			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	4.2892			
G.L.:	1			
p-valor:	0.0384			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	2 de 4, un 50.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	1 de 4, un 25.0000%			

H: serie histórica, A: serie actual, N: no complicaciones, S: sí complicaciones.

DISCUSIÓN

5 DISCUSIÓN

5.1 Éxito de la técnica

El nervio frénico posee un origen embriológico común al plexo braquial, es un nervio motor puro y posee más del triple de axones motores que un nervio intercostal (800-1750 frente 200)^{83,108}. Además, su localización permite que se exponga fácilmente en un abordaje supraclavicular al plexo braquial, permitiendo la transferencia sin injerto a estructuras nerviosas proximales⁶³. En caso de que el nervio a neurotizarse sea distal se ha descrito la transferencia sin injerto tras su disección intratorácica con toracoscopia^{142,143}, aunque esto podría comprometer la contribución del nervio frénico accesorio. Estas características hacen al nervio frénico una opción ideal de transferencia nerviosa extraplexual.

Los resultados obtenidos en la tasa de éxito (84%) y complicaciones (3.9%) de la serie analizada de 51 pacientes, reflejan de forma sólida la eficacia y seguridad de la transferencia del nervio frénico en los pacientes adultos con parálisis braquial traumática, siendo cifras de éxito similares a las reportadas previamente en la literatura^{15,19,23,33,60,63,83,108,113,122,133,141,143,147,149} (tabla 9).

Sólo dos de las variables analizadas resultaron estadísticamente significativas como predictoras de éxito de la transferencia nerviosa. La primera, la longitud del injerto, con una media de 9.8 cm en el grupo de buen resultado, frente los 15.1 cm del grupo con peor evolución. Estos resultados contrastan con lo publicado previamente en otros trabajos¹¹¹, donde se postula que los injertos largos teóricamente evitan la dispersión de los axones en crecimiento, favoreciendo que se dirijan de forma más precisa a la estructura neuro-muscular a neurotizarse, en beneficio del resultado clínico. La segunda variable predictora del éxito del procedimiento fue el grado de adhesión al tratamiento rehabilitador, resultado ya observado en otra publicación¹¹¹.

Aunque la edad y la demora entre el traumatismo y la cirugía no mostraron diferencias estadísticamente significativas, se observó una tendencia al éxito de la técnica en los pacientes con mayor edad y menor demora. El tiempo entre el traumatismo y la cirugía ya fue descrito como factor pronóstico por Gu en su trabajo de 1989³⁴. Liu⁶⁰ no encontró diferencias entre el uso o no de injertos, y sí relacionó una demora quirúrgica por encima de los 4 meses como factor predictor en contra del éxito de la técnica.

Tabla 9. Series históricas

Autor año publicación	Número pacientes	Estructura neurotizada	Resultado MRC 3 o mejor	Complicaciones respiratorias
Songcharoen, 1995	12	Suprascapular Axilar Musculocutáneo	75%	Asintomáticos CV reducida un 9.4%
Chuang, 1995	37	Supraescapular Axilar	59.4%	No especificado
Gu, 1996	65	Musculocutáneo	77%	Un paciente de 5 años con problemas respiratorios transitorios* CPT y CV disminuidos al año respecto valores normales
Sungpet, 2000	10	Supraescapular	100%	Asintomáticos
Luedemann, 2002	12	Musculocutáneo	92%	Asintomáticos CV disminuida 14.3% lado derecho, 3.6% lado izquierdo
El-Gammal, 2002	4	Musculocutáneo	100%	No especificado
Xu, 2002	11	Musculocutáneo	73%	Asintomáticos Pruebas funcionales respiratorias al año similares a prequirúrgicas
Chalidapong, 2004	17	Musculocutáneo	29%	Asintomáticos Pruebas funcionales respiratorias disminuidas al año respecto prequirúrgicas
Vekris, 2006	17	Musculocutáneo	100%	No especificado
Monreal, 2007	20	Musculocutáneo	70%	No especificado
Siqueira, 2009	10	Musculocutáneo	70%	Asintomáticos CV disminuida al año, a los dos años sólo disminuidos CVF y CPT
Xu, 2008	3	Mediano	100%	Asintomáticos Función respiratoria disminuida a los 6 meses y restablecida al año
Zheng, 2010 y 2012	12	DATPS	75%	Síntomas con grandes esfuerzos* CVF, VEF y CPT disminuidas pero no por debajo del rango normal
Liu, 2013	33	DATPS	85%	Asintomáticos

*Síntomas en pacientes que también se transfirieron intercostales.

Un factor de confusión que podría haber influido en los resultados de la serie es la existencia de un plexo prefijado, donde una contribución de la raíz C4 podría haber aportado axones en los músculos neurotizados por el nervio frénico. Sin embargo hechos como el que la primera manifestación clínica de reinervación fuese el “brazo que respira”, o que para llevar a cabo la neurotización de la DATPS se seccione antes impidiendo el crecimiento de axones de una hipotética contribución de C4 están a favor de una reinervación exclusiva a expensas del nervio frénico. Además, si se revisa la literatura, el porcentaje de plexos prefijados es de en torno al 25% de la población general, siendo la contribución inferior al 5% del total de axones que conforman los nervios supraescapular, axilar y musculocutáneo^{43,89}.

5.2 Seguridad de la técnica

El principal problema a la hora de considerar el nervio frénico como donante en la cirugía reconstructiva del plexo braquial es el riesgo transitorio o permanente de deterioro de la función respiratoria.

Al analizar la literatura encontramos que Luedemann⁶³ en su serie de 12 pacientes identificó una reducción estadísticamente significativa en la capacidad vital (CV) sólo cuando se utilizaba el nervio frénico derecho, sin que existiese repercusión clínica en los pacientes. El autor concluye que el uso del nervio frénico sólo está contraindicado en caso de que la presión inspiratoria máxima (PIM) preoperatoria esté disminuida. Los dos pacientes con problemas respiratorios de la serie de nuestro estudio tenían lesiones de plexo braquial derecho; sin embargo, el tamaño de la muestra es demasiado pequeño para llevar a cabo un análisis estadístico. Songcharoen¹¹³ siguió clínicamente a 12 pacientes durante 2 años, no encontrando signos o síntomas respiratorios. Además, el 25% presentó una movilidad diafragmática normal en el lado afecto y todos los test de función respiratoria fueron normales, con excepción de una reducción de la CV del 9.4% (que finalmente volvió a la normalidad antes de los 24 meses). Gu³³ en su serie de 65 pacientes describió el descenso de la CV y de la capacidad pulmonar total (CPT) al año de la cirugía, registrando una mejoría significativa de los mismos parámetros a los dos años. Cabe destacar que el único paciente de la serie que presentó síntomas respiratorios transitorios también se sometió a una transferencia de nervios intercostales. En la series de Siqueira¹⁰⁸, Sungpet¹²², Chalidapong¹⁵, Liu⁶⁰ y Xu^{141,143} sometidos a transferencia del nervio frénico, no se registraron en ningún paciente signos o síntomas respiratorios.

Las complicaciones respiratorias de nuestra serie, 3.9%, contrastan con lo descrito en los trabajos anteriores, donde el porcentaje de complicaciones respiratorias (excluida la serie de Gu³³) es de cero. Esto puede atribuirse al formulario puesto en práctica por nuestro grupo de trabajo, a través del cual es difícil que un paciente sintomático quede inadvertido. A esto se une el sesgo de haber retirado del análisis

estadístico series en las que no se especificaba si existían síntomas respiratorios o no en sus pacientes^{19,23,83,133}.

Si analizamos los principales trabajos donde se combina la transferencia del nervio frénico con la de los nervios intercostales, comprobamos que Zheng (en su publicación de 2012¹⁴⁷) observó en sus 42 pacientes un descenso de la capacidad vital forzada (CVF), del volumen espiratorio forzado (VEF) y de la CPT del 26.3, 28 y 25.2% respectivamente, todo ello asociado a un ascenso del hemidiafragma afecto de 1 a 1.5 espacios intercostales en el 90.5% de los casos. Sólo un 2% de los pacientes mostraron síntomas antes esfuerzos. Los resultados fueron similares a largo plazo para el grupo de pacientes sometidos a transferencia del nervio frénico y para el grupo de pacientes sometido a transferencia combinada de nervio frénico e intercostales^{147,148}. Chuang²⁰, en su serie de 19 pacientes, describió un 42% de pacientes con disnea sólo durante los primeros seis meses después de la cirugía; sin embargo, la CPT y la CVF disminuyeron un 8% de forma permanente. Tanto el trabajo de Zheng como el de Chuang, han sido excluidos de la serie histórica previamente analizada ya que se han incluido trabajos anteriores de ambos autores y existía el riesgo de repetir pacientes. A la cuestión acerca de si es seguro utilizar la transferencia combinada de nervio frénico y de nervios intercostales se puede llegar a la conclusión de que existe poca evidencia en la literatura al respecto, siendo recomendable, en caso de llevar a cabo el procedimiento, efectuarlo en dos tiempos.

En otras series donde el nervio frénico fue lesionado como complicación de un procedimiento ajeno a la reconstrucción del plexo braquial como la cardioablación, el porcentaje de pacientes sintomáticos fue considerablemente mayor, describiéndose un 88% de disnea, tos e hipo, y un tiempo de recuperación de 4-5 meses, persistiendo los síntomas a los tres años en el 16%^{3,16,99}. Esta diferencia en la tasa de complicaciones responde a la edad y patología previa del paciente, siendo generalmente jóvenes y sanos en el caso de cirugía reconstructiva del plexo braquial, y con alguna patología cardiopulmonar de base en los otros. En consecuencia, si un paciente presenta alteración en las pruebas de función respiratoria, el nervio frénico no debe usarse como donante. Tampoco en caso de trauma torácico, fracturas costales múltiples y/o contusiones pulmonares, al menos hasta la recuperación de estas patologías. La obesidad también podría ser un factor a tener en cuenta en contra de la indicación.

La utilización del nervio frénico como donante también está contraindicada en menores de tres años de edad, dadas las graves complicaciones que acarrea la pérdida de función diafragmática en estos pacientes^{20,145}: mayor porcentaje de problemas respiratorios, deformidades torácicas y alteraciones intestinales. El motivo parece ser el desarrollo tardío de la musculatura respiratoria accesoria, el movimiento paradójico que conlleva una parálisis del hemidiafragma, la hipermovilidad mediastínica y el mayor volumen de secreciones respiratorias, entre otros^{36,105}.

Como se ha descrito anteriormente, sacrificar el nervio frénico en un paciente sin patología cardiopulmonar de base tiene efectos mínimos en la función respiratoria^{15,33,60,63,108,113,122,141,143}. Existen diferentes factores que pueden explicarlo:

- La presencia de un nervio frénico accesorio, que puede llegar a identificarse en más del 50% de las disecciones cadavéricas, puede contribuir a la función del nervio frénico tras su anastomosis cervical o torácica, lo que minimizaría el efecto de sacrificarlo. Este nervio accesorio puede originarse de diferentes estructuras nerviosas, como el nervio subclavio, esternohioideo, hipogloso y asa cervical⁶². Por desgracia, actualmente no es posible determinar la contribución del nervio frénico accesorio, ni de anticipar el efecto en la función respiratoria de sacrificar el nervio frénico.
- La existencia de mecanismos compensatorios relacionados con el aumento de actividad de la musculatura respiratoria accesoria. Además, en modelo animal, se ha demostrado el incremento en la frecuencia respiratoria durante la primera semana tras seccionar el nervio frénico, seguido de una hipertrofia de la musculatura accesoria; también se ha comprobado una disminución de la frecuencia respiratoria frente a la hipoxia en ratas sedentarias sometidas a sección del nervio frénico durante el primer mes^{4,96}. Asimismo se ha demostrado en la rata la participación de los nervios intercostales en la inervación del diafragma²⁸.
- El “fenómeno frénico cruzado”, que consiste en la activación de ambos núcleos frénicos mediada por motoneuronas bulboespinales en respuesta a la hipercapnia entre el primer y cuarto mes tras una hemisección medular seguida de una sección del nervio frénico controlateral. Si bien este no es el escenario de una sección frénica unilateral, se puede especular que exista algún mecanismo compensatorio similar tras una frenicotomía. Obviamente son necesarios más estudios para clarificar esta hipótesis^{29,30,59,85,134}.

5.3 Transferencia del nervio frénico versus transferencia de nervios intercostales

Es habitual que en la cirugía reconstructiva de las lesiones de plexo braquial con avulsión de todas las raíces el nervio espinal accesorio se utilice como donante del nervio supraescapular con la finalidad de recuperar función en el hombro, y la transferencia de nervio frénico o de nervios intercostales se destine a recuperar la flexión en el codo.

Si seleccionamos las series en las que el nervio frénico se destinó a recuperar la flexión del codo^{15,23,33,60,63,83,108,113,133,141,149} (incluyendo la del presente estudio) quedan 264 pacientes con una tasa de éxito del 77.6%. Si se analizan los trabajos de transferencia de nervios intercostales al nervio musculocutáneo¹¹², obtenemos 823 pacientes con una tasa de éxito del 72.6%. Si bien los resultados parecen mejores en la serie de transferencias del nervio frénico, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas ($p = 0.11$) (tabla 10). Liu⁶¹, en su análisis retrospectivo de 33 pacientes, obtiene una tasa de éxito del 83% para el nervio frénico y del 70% para los nervios intercostales, sin que tampoco existan diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.646$).

Tabla 10. Resultados frénico versus intercostales

Tabla de Frecuencias de Resultado (filas) por FRENICO VS IC (columnas)				
Número de Casos: 1087				
FRENICO VS IC Resultado	F	I	Total Fila	
E	205 18.86	598 55.01	803 73.87	
F	59 5.43	225 20.70	284 26.13	
Total Columna	264 24.29	823 75.71	1087 100.00	
Chi-Cuadrado de Resultado (filas) por FRENICO VS IC (columnas)				
Tamaño Muestral:	1087			
Estadístico de contraste Chi-Cuadrado:	2.5792			
G.L.:	1			
p-valor:	0.1083			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 5:	0 de 4, un 0.0000%			
N° de celdas con frecuencias absolutas esperadas < 1:	0 de 4, un 0.0000%			

F: frénico, I: intercostales, E: éxito, F: fracaso.

Ante una tasa de éxito similar, factores a favor de indicar la transferencia del frénico por delante de los intercostales, se encuentran la menor repercusión estética de la cirugía, además de que es más sencilla técnicamente lo que acortaría el tiempo quirúrgico, o que el paciente tenga un trauma torácico con fracturas costales múltiples. Los nervios intercostales estarían por delante del frénico en caso de pacientes con disfunción diafragmática demostrada, alteración en las pruebas funcionales respiratorias o menores de 3 años de edad.

5.4 Limitaciones del estudio

Consideramos como limitaciones de este estudio:

- Que se trata de un análisis retrospectivo en una serie de casos recogidos en un único centro, lo que puede suponer una posible pérdida/ausencia de recogida de datos de las historias clínicas de los pacientes, una población pequeña de pacientes y que no se ha podido contemplar en el análisis el impacto de la curva de aprendizaje/optimización de la técnica quirúrgica en los resultados de eficacia y seguridad
- Que dada la ausencia de grupo control hemos debido comparar nuestros datos con series históricas de la literatura.

CONCLUSIONS/CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONS

Analysis in detail of the results obtained, we have drawn up the following conclusions:

- 1. Complete stretch lesions of the brachial plexus with avulsion of all roots require an early reconstructive treatment via extraplexal nerve transfers.**
- 2. The transfer of the phrenic nerve for reconstructive surgery of the brachial plexus is an effective technique, with a success rate of 84% in the present series, and a success rate of 75% in previous series.**
- 3. The rate of respiratory symptoms related to this technique is low, with a 3.9% in the present series. In historical series, functional respiratory tests almost always show disorders after the phrenicotomy, which diverges from the incidence of respiratory symptoms (0%).**
- 4. A higher adhesion to the rehabilitation treatment and the use of a short graft in order to conduct the nerve transfer are statistically significant predictive factors in favour of the success of the technique.**

6. CONCLUSIONES

Del análisis por menorizado de los resultado obtenidos hemos elaborado las siguientes conclusiones:

1. Las lesiones completas por estiramiento de plexo braquial con avulsión de todas las raíces requieren de un tratamiento reconstructivo precoz mediante transferencias nerviosas extraplexuales.
2. La transferencia del nervio frénico en la cirugía reconstructiva del plexo braquial es una técnica eficaz, con un porcentaje de éxito en nuestro estudio del 84%, mayor que en las series históricas, el 75%.
3. El porcentaje de síntomas respiratorios derivado de la técnica es bajo, con un porcentaje del 3.9% en la serie actual, en comparación con el 0% de las series históricas.
4. La mayor adhesión al tratamiento rehabilitador y el uso de un injerto corto para llevar a cabo la transferencia nerviosa, son factores predictivos del éxito de la técnica.

ABREVIATURAS

7. ABREVIATURAS

Siglas	Significado
CV	Capacidad vital.
CPT.	Capacidad pulmonar total.
CVF	Capacidad vital forzada.
DATPS	División anterior del tronco primario superior.
EMG	Electromiografía.
ENG	Electroneurografía.
IMC	Índice de masa corporal.
MRC	Medical Research Council.
PA	Potencial de acción.
PAE	Potencial de acción evocado.
PAM	Potencial de acción motora.
PAN	Potencial de acción nervioso.
PEM	Potencial evocado motor.
PESS	Potencial evocado somatosensitivo.
PIM	Presión inspiratoria máxima.
RM	Resonancia magnética.
TC	Tomografía computerizada.
VEF	Volumen espiratorio forzado.

BIBLIOGRAFIA

8. BIBLIOGRAFIA

1. Ali Z, Meyer RA, Belzberg AJ. Neuropathic pain after C7 spinal nerve transection in man. *Pain* 2002;96:41-7.
2. Allieu Y. Exploration et traitement direct des lésions nerveuses dans les paralyses traumatiques par élongation du plexus brachial chez l'adulte. *Rev Chir Orthop* 1977;63:107-22.
3. Andrié R, Schrickel JW, Nickenig G, Lickfett L. Left phrenic nerve injury during cryoballoon ablation of the left superior pulmonary vein. *Pacin Clin Electrophysiol* 2012;35:334-6.
4. Bach KB, Mitchell GS. Effects of phrenicotomy and exercise on hypoxia-induced changes in phrenic motor output. *J Appl Physiol* 1985;89:1884-91.
5. Balakrishnan G, Bharath K, Kadadi K. Clinical examination versus routine and paraspinial electromiographic studies in predicting the site of lesion in brachial plexus injury. *J Hand Surg* 2004;29:140-3.
6. Beaulieu JY, Blustajn J, Teboul F, Baud P, De Schonen S, Thiebaud JB, et al. Cerebral plasticity in crossed C7 grafts on the brachial plexus: an fMRI study. *Microsurgery* 2006;26:303-10.
7. Bertelli JA. Platysma motor branch transfer in brachial plexus repair: report of the first case. *J Brachial Plex Peripher Nerve Inj* 2007;2:2-12.
8. Birch R. Brachial plexus injury: the London experience with supraclavicular traction lesions. *Neurosurg Clin N Am* 2009;20:15-23.
9. Birch R. *Surgical disorders of the peripheral nerves*. 2ed London:Springer;2011.
10. Brunelli G. Neurotization of avulsed roots of the brachial plexus by means of anterior nerves of the cervical plexus (preliminary report). *Int J Microsurg* 1980;2:55-58.
11. Campero A, Ajler P, Socolovsky M, Martins C, Rhoton A. Facial nerve reanimation by partial section of the hypoglossal nerve and mini mastoidectomy. *Surg Neurol Int* 2012;3:400-4.
12. Carlstedt T, Hallin RG, Hedström KG, Nilsson-Remahl I. Functional recovery in primates with brachial plexus injury after spinal cord implantation of avulsed ventral roots. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1993;56:649-54.
13. Carlstedt T, Grane P, Hallin RG, Norén G. Return of function after spinal cord implantation of avulsed spinal nerve roots. *Lancet* 1995;346:1323-5.
14. Celli L, Balli A, de Luise G, Rovesta C. La neurotizzazione degli ultimi nerve intercostali mediante trapianto nervoso peduncolato, nelle avulsioni radicolari del plesso brachiale. *Chir Organi Mov* 1978;64:461-4.
15. Chalidapong P, Sananpanich K, Kraissarin J, Bumroongkit C. Pulmonary and biceps function after intercostal and phrenic nerve transfer for brachial plexus injuries. *J Hand Surg (Br)* 2004;29:8-11.
16. Chang FY, Lu CL. Hiccup: mystery, nature and treatment. *J Neurogastroenterol Motil* 2012;18:123-30.

17. Choi PD, Novak CB, Mackinnon SE, Kline DG. Quality of life and functional outcome following brachial plexus injury. *J Hand Surg [Am]* 1997;22:605-12.
18. Chuang DC, Cheng SL, Wei FC. Clinical evaluation of C7 spinal nerve transection: 21 patients with at least 2 years' follow-up. *Br J Plast Surg* 1998;51:285-90.
19. Chuang DC, Lee GW, Hashem F, Wei FC. Restoration of shoulder abduction by nerve transfer in avulsed brachial plexus injury: evaluation of 99 patients with various nerve transfers. *Plast Reconstr Surg* 1995;96:122-8.
20. Chuang ML, Chuang DC, Lin IF, Vintch JR, Ker JJ, Tsao TC. Ventilation and exercise performance after phrenic nerve and multiple intercostal nerve transfers for avulsed brachial plexus injury. *Chest* 2005;128:3434-9.
21. Coran AG, Simon A, Heimberg F, Beberman N. Avulsion injury of the brachial plexus. *Am J Surg* 1968;1150:840-2.
22. Doi K, Otsuka K, Okamoto Y, Fujii H, Hattori Y, Baliarsing AS. Cervical nerve root avulsion in brachial plexus injuries: magnetic resonance imaging classification and comparison with myelography and computerized tomography myelography. *J Neurosurg* 2002;96(3 Suppl):277-84.
23. El-Gammal TA, Fathi NA. Outcomes of surgical treatment of brachial plexus injuries using using nerve grafting and nerve transfers. *J Reconstr Microsurg* 2002;18:7-15.
24. Ferraresi S, Garozzo D, Ravenni R, Dainese R, De Grandis D, Buffatti P. Hemihypoglossal nerve transfer in brachial plexus repair: technique and results. *Neurosurgery* 2002;50:332-5.
25. Foerster O. Die therapie der schussverletzungen der peripheren nerven. En: Lewandowski: *Handbuch der neurologie*. Berlin:Ergaenzungsband;1929.pp1677-91.
26. García-López A, López-Durán S. Cronología en la cirugía de las lesiones de plexo braquial. *Rev Ortop Traumatol* 2003;47:73-82.
27. Gasparotti R, Ferraresi S, Pinelli L. Three-dimensional MR myelography of traumatic injuries of the brachial plexus. *Am J Neuroradiol* 1997;18:1733-42.
28. Giddins GE, Kakkar N, Alltree J, Birch R. The effect of unilateral intercostals nerve transfer upon lung function. *J Hand Surg* 1995;20:675-6.
29. Golder FJ, Fuller DD, Davenport DW, Johnson RD, Reier PJ, Bolser DC. Respiratory motor recovery after unilateral spinal cord injury: eliminating crossed phrenic nerve activity decreases tidal volumen and increases contralateral respiratory motor output. *J Neurosci* 2003;23:2494-501.
30. Golder FJ, Reier PJ, Bolser DC. Altered respiratory motor drive after spinal cord injury: supraspinal and bilateral effects of a unilateral lesion. *J Neurosci* 2001;21:8680-9.
31. Grundfest H, Oester YT, Beebe GW. Electrical evidence of regeneration. En: *Peripheral nerve regeneration*. Veteran administration monograph. Washington DC:US Government Printing Office;1957.p.203-40.
32. Gu YD, Chen DS, Zhang GM, Cheng XM, Xu JG, Zhang LY, et al. Long-term functional results of controlateral C7 transfer. *J Reconstr Microsurg* 1998;14:57-9.

33. Gu YD, Ma MK. Use of the phrenic nerve for brachial plexus reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 1996;323:119-21.
34. Gu YD, Wu MM, Zhen YL, Zhao JA, Zhang GM, Chen DS, et al. Phrenic nerve transfer for brachial plexus motor neurotization. *Microsurgery* 1989;10:287-9.
35. Gu YD, Zhang GM, Chen DS, Yan JG, Cheng XM, Chen L. Seventh cervical root transfer from the contralateral healthy side for treatment of brachial plexus root avulsions. *J Hand Surg* 1992;17:518-21.
36. Haller JA Jr, Pickard LR, Tepas JJ, Rogers MC, Robotham JL, Shorter N, et al. Management of diaphragmatic paralysis in infants with special emphasis on selection of patients for operative plication. *J Pediatr Surg* 1979;14:779-785.
37. Hara T, Tsuyama N. Pectoral nerve transplantation in traumatic paralysis of the brachial plexus. *Shujutsu* 1969;23:1087-96.
38. Harris W, Low W. On the importance of accurate muscular analysis in lesions of the brachial plexus and the treatment of Erb's palsy by cross-union of nerve roots. *Br Med Journal* 1903;2:1035-8.
39. Hayashi N, Yamamoto S, Okubo T. Avulsion injury of cervical nerve roots: enhanced intradural nerve roots at MR imaging. *Radiology* 1998;206:817-22.
40. Hems TEJ, Birch R, Carlstedt T. The role of magnetic resonance imaging in the management of traction injuries of the adult brachial plexus. *J Hand Surg* 1999;24B:550-5.
41. Hsu ES. Practical management of complex regional pain syndrome. *Am J Ther* 2009;16:147-54.
42. Htut M, Misra VP, Anand P, Birch R, Carlstedt T. Motor recovery and the breathing arm after brachial plexus surgical repair including re-implantation of avulsed spinal nerves into the spinal cord. *J Hand Surg* 2007;32E:170-8.
43. Hur MS, Woo JS, Park SY, Kang BS, Shin C, Kim HJ, et al. Destination of the C4 component of the prefixed brachial plexus. *Clin Anat* 2011;24:717-20.
44. Jones SJ. Diagnostic use of peripheral and spinal somatosensory evoked potentials in traction lesions of the brachial plexus. *Clin Plast Surg* 1984;11:167-72.
45. Kawai H, Kawabata H, Masada K, Ono K, Yamamoto K, Tsuyuguchi T. Nerve repairs for traumatic brachial plexus palsy with root avulsion. *Clin Orthop* 1988;237:75-86.
46. Khu K, Midha R, Rochkind S. Management of adult brachial plexus injuries. En: Alfredo Quiñones-Hinojosa. *Schmidek & Sweet. Operative neurosurgical techniques. Indications, methods and results.* 6 ed. Philadelphia:Elsevier Saunders;2012.p2247-60.
47. Kim DH, Murovic JA, Tiel RL, Kline DG. Mechanisms of injury in operative brachial plexus lesions. *Neurosurg Focus* 2004;16(5):E2.
48. Kimura J. *Electrodiagnosis in diseases of nerve and muscles: principles and practice.* 2ed Philadelphia:FA Davis;1989.

49. Kline DG, Lusk M. Management of athletic brachial plexus injuries. En: Schneider R, Kennedy J, Plant M. Sports injuries – mechanisms, prevention and treatment. Philadelphia:Williams& Wilkins;1985.
50. Kline DG, Hudson AR, Kim DH. Atlas of peripheral nerve surgery. Philadelphia:WB Saunders 2001;p:173-8.
51. Kline DG. Timing for brachial plexus injury: a personal experience. *Neurosurg Clin N Am* 2009;20:24-6.
52. Kline DG. Valoración clínica y eléctrica. En: Kim DH, Midha R, Murovic JA, Spinner RJ. Kline y Hudson. Lesiones nerviosas. Resultados del tratamiento quirúrgico de los traumatismos, los atrapamientos y los tumores de los nervios principales. 2 ed. Barcelona: Elsevier;2010.p.43-64.
53. Kline DG. Registros del potencial de acción del nervio. En: Kim DH, Midha R, Murovic JA, Spinner RJ. Kline y Hudson. Lesiones nerviosas. Resultados del tratamiento quirúrgico de los traumatismos, los atrapamientos y los tumores de los nervios principales. 2 ed. Barcelona: Elsevier;2010.p.75-86.
54. Kobayashi J, Mackinnon SE, Watanabe O, Ball DJ, Wu XM, Hunter DA, et al. The effect of duration of muscle denervation on functional recovery in the rat model. *Muscle Nerve* 1997;20:858-66.
55. Kotani P, Matsuo H, Suzuki T. Trial surgical procedure of nerve transfers to avulsion injuries of plexus brachialis. *Excerpta Med Int 12th Congress Series*;1972;Tel Aviv.
56. Leffert RD. Clinical diagnosis, testing, and electromiographic study un brachial plexus traction injuries. *Clin Orthop* 1988;237:24-31.
57. León C. Análisis de las lesiones sufridas por motociclistas (Tesis Doctoral). Madrid: Universidad Complutense de Madrid; 1990.
58. Limthongthang R, Bachoura A, Songcharoen P, Osterman L. Adult brachial plexus injury. Evaluation and management. *Orthop Clin N Am* 2013;44:591-603.
59. Liou WW, Goshgarian HG. Quantitative assessment of the effect of chronic phrenicotomy on the induction of the crossed phrenic phenomenon. *Exp Neurol* 1994;127:145-53.
60. Liu Y, Lao J, Gao K, Gu Y, Zhao X. Comparative study of phrenic nerve transfers with and without nerve graft for elbow flexion after global brachial plexus injury. *Injury* 2013;45:227-31.
61. Liu Y, Lao J, Zhao X. Comparative study of phrenic and intercostal nerve transfer for elbow flexion after global brachial plexus injury. *Injury* 2015;46:671-5.
62. Loukas M, Kinsella CR Jr, Louis RG Jr, Gandhi S, Curry B. Surgical anatomy of the accessory phrenic nerve. *Ann Thorac Surg* 2006;82:1870-5.
63. Luedemann W, Hamm M, Blömer U, Samii M, Tatagiba M. Brachial plexus neurotization with donor phrenic nerves and its effect on pulmonary function. *J Neurosurg* 2002;96:523-6.
64. Lurje A. Concerning surgical treatment of traumatic injury of the upper division of the brachial plexus (Erb's Type). *Ann Surg* 1948;127:317-26.

65. Mackinnon SE. New directions in peripheral nerve surgery. *Ann Plast Surg* 1989;22:257-73.
66. Malessy M, Bakker D, Dekker J, Gert van Dijk J, Thomeer R. Functional magnetic resonance imaging and control over the biceps muscle after intercostal-musculocutaneous nerve transfer. *J Neurosurg* 2003;98:261-8.
67. Malessy M, Hoffman C, Thomeer R. Initial report on the limited value of hypoglossal nerve transfer to treat brachial plexus root avulsions. *J Neurosurg* 1999;91:601-4.
68. Malone JM, Leal JM, Underwood J, Childers SJ. Brachial plexus injury management through upper extremity amputation with immediate postoperative prostheses. *Arch Phys Med Rehabil* 1982;63:89-91.
69. Marshall RW, De Silva RDD. Computerised axial tomography in traction injuries of the brachial plexus. *J Bone Joint Surg* 1986;68B:734-8.
70. Martínez-Benia F, Pinazzo S. Anatomía del sistema nervioso periférico. En: Socolovsky M, Siqueira M, Malessy M. *Introducción a la cirugía de los nervios periféricos*. 1 ed. Buenos Aires: Journal;2013.p1-17.
71. Martins RS, Pondaag W. Técnica quirúrgica: neurolisis y neurorrafia. En: Socolovsky M, Siqueira M, Malessy M. *Introducción a la cirugía de los nervios periféricos*. Buenos Aires:Journal 2013;p:95-100.
72. Martins RS, Socolovsky M, Siqueira M, Campero A. Hemihypoglossal-facial neurorraphy after mastoid dissection of the facial nerve: results in 24 patients and comparison with the classic technique. *Neurosurgery* 2008;63:310-6.
73. McGuiness CN, Kay SP. The pre-spinal route in contralateral C7 nerve root transfer for brachial plexus avulsion injuries. *J Hand Surg Br* 2002;27:159-60.
74. Merle d'Aubigné R, Deburge A. Etiologie, evolution et pronostic des paralysies traumatiques du plexus brachial. *Rev Chir Orthop* 1966;53:23-42.
75. Merle M. La chirurgie directe du plexus brachial traumatique. *Rev Readapt Fonct Prof Soc* 1980;6:45-52.
76. Merrell GA, Barrie K, 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* 2001;26:303-14.
77. Midha R. Epidemiology of brachial plexus injuries in a multitrauma population. *Neurosurg* 1997;40:1182-89.
78. Midha R. Lesiones por estiramiento del plexo braquial. En: Kim DH, Midha R, Murovic JA, Spinner RJ. Kline y Hudson. *Lesiones nerviosas. Resultados del tratamiento quirúrgico de los traumatismos, los atrapamientos y los tumores de los nervios principales*. 2 ed. Barcelona: Elsevier;2010.p.325-62.
79. Midha R. Anatomía y fisiología preoperatoria del plexo braquial. En: Kim DH, Midha R, Murovic JA, Spinner RJ. Kline y Hudson. *Lesiones nerviosas. Resultados del tratamiento quirúrgico de los traumatismos, los atrapamientos y los tumores de los nervios principales*. 2 ed. Barcelona: Elsevier;2010.p.279-97.

80. Millesi H. Bridging defects: autologous nerve grafts. *Acta Neurochir Suppl* 2007;100:37-8.
81. Millesi H. Healing of nerves. *Clin Plast Surg* 1977;4:459-73.
82. Millesi H. Surgical management of brachial plexus injuries. *J Hand Surg* 1977;2:367-379.
83. Monreal R. Restoration of elbow flexion by transfer of the phrenic nerve to the musculocutaneous nerve after brachial plexus injuries. *Hand (NY)* 2007;2:206-11.
84. Murase T, Kawai H, Masatomi T, Kawabata H, Ono K. Evoked spinal cord potentials for diagnosis during brachial plexus surgery. *J Bone Joint Surg Br* 1993;75:775-81.
85. Nantwi KD, Goshgarian HG. Actions of specific adenosine receptor A1 and A2 agonists and antagonists in recovery of phrenic motor output following upper cervical spinal cord injury in adult rats. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 2002;29:915-23.
86. Narakas AO. The treatment of brachial plexus injuries. *Int Orthop* 1985;9(1):29-36.
87. Narakas AO. Thoughts on neurotization or nerve transfers in irreparable nerve lesions. *Clin Plast Surg* 1984;11:153-9.
88. Narakas AO. Lésions anatomo-pathologiques dans les paralysies traumatiques du plexus brachial. En: Alnot J, Narakas AO. *Les paralysies du plexus brachial*. 2 ed. Paris:Expansion Scientifique Française;1989.
89. Norkus T, Norkus M, Ramanauskas T. Donor, recipient and nerve grafts in brachial plexus reconstruction: anatomical and technical features for facilitating the exposure. *Surg Radiol Anat* 2005;27:524-30.
90. Oberlin C, Durand S, Belheyyar Z, Shafi M, David E, Asfazadourian H. Nerve transfers in brachial plexus palsy. *Chir Main* 2009;29:1-9.
91. Okinaga S, Nagano A. Can vascularization improve the surgical outcome of the intercostal nerve transfer for traumatic brachial plexus palsy? A clinical comparison of vascularized and non-vascularized methods. *Microsurgery* 1999;19:176-80.
92. Palazzi-Coll S, Cáceres-Lucero JP, Palazzi-Coll JL. Actualización y estrategia de tratamiento de las lesiones supraclaviculares del plexo braquial del adulto. En: Antonio García López. *Patología del plexo braquial*. 1ed. Madrid:Momento Médico.p73-90.
93. Ring D. Symptoms and disability after major peripheral nerve injury. *Hand Clin* 2013;29:421-5.
94. Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 1: transferencias nerviosas extraplexuales. *Neurocirugía (Astur)* 2011;22:507-20.
95. Robla-Costales J, Socolovsky M, Di Masi G, Robla-Costales D, Domitrovic L, Campero A, et al. Técnicas de reconstrucción nerviosa en cirugía de plexo braquial traumatizado. Parte 2: transferencias nerviosas intraplexuales. *Neurocirugía (Astur)* 2011;22:521-34.

96. Rocco PR, Faffe DS, Feijóo M, Menzes SL, Vasconcellos FP, Zin WA. Effects of uni and bilateral phrenicotomy on active and passive respiratory mechanics in rats. *Respir Physiol* 1997;110:9-18.
97. Rosson JW. Closed traction lesions of the brachial plexus – an epidemic among Young motor cyclists. *Injury* 1988;19:4-6.
98. Russell SM. Examination of peripheral nerve injuries. An anatomical approach. 1 ed. New York:Thieme;2006.p1-107.
99. Sacher F, Monahan KH, Thomas SP, Davidson N, Adragao P, Sanders P, Hocini M, et al. Phrenic nerve injury after atrial fibrillation catéter ablation: characterization and outcome in a multicenter study. *J Am Coll Cardiol* 2006;47:2498-503.
100. Samii A, Carvalho G, Samii M. Brachial plexus injury: factors affecting functional outcome in spinal accessory nerve transfer for the restoration of elbow flexion. *J Neurosurg* 2003;98:307-12.
101. Schaller E, Lassner F, Becker M, Walter GF, Berger A. Regeneration of autologous and allogenic nerve grafts in a rat genetic model: preliminary report. *J Reconstr Microsurg* 1991;7:9-12.
102. Seddon HJ. Three types of nerve injury. *Brain* 1943;66:237-88.
103. Seddon HJ. Nerve grafting. *J Bone and Joint Surg* 1963;45:447-61.
104. Sedel L. The results of surgical repair of brachial plexus injuries. *J Bone Joint Surg* 1982;64:54-66.
105. Shoemaker R, Palmer G, Brown JW, King H. Aggressive treatment of acquired phrenic nerve paralysis in infants and small children. *Ann Thorac Surg* 1982;32:250-9.
106. Shurr DG, Blair WF. Treatment of the complete brachial plexus palsy. *Iowa Orthop J* 1984;4:65-8.
107. Siqueira MG, Malessy M. Lesiones traumáticas del plexo braquial: aspectos clínicos y quirúrgicos. En: Socolovsky M, Siqueira M, Malessy M. Introducción a la cirugía de los nervios periféricos. 1 ed. Buenos Aires: Journal;2013.p122-36.
108. Siqueira MG, Martins RS. Phrenic nerve transfer in the restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injuries: how effective and safe is it? *Neurosurgery* 2009;65:125-31.
109. Socolovsky M, Bertelli JA, Masi GD, Campero A, Garategui L, Conesa H, et al. Surgical anatomy of the platysma motor branch as a donor for transfer in brachial plexus repair. *Surg Radiol Anat* 2008;30:669-74.
110. Socolovsky M. Factores pronósticos de importancia en la cirugía de los nervios periféricos. En: X curso teórico-práctico de cirugía de los nervios periféricos y del plexo braquial. 2014 Nov 5-7;León,España.
111. Socolovsky M, Masi GD, Battaglia D. Use of long autologous nerve grafts in brachial plexus reconstruction: factors that affect the outcome. *Acta Neurochir (Wien)* 2011;153:2231-40.
112. Socolovsky M, Páez MD. A literatura review of intercostal-to-musculocutaneous-nerve transfers in brachial plexus injury patients: does body mass

- index influence results in Eastern versus Western countries?. *Surg Neurol Int* 2013;4:152.doi:10.4103/2152-7806.122233.
113. Songcharoen P. Brachial plexus injury in Thailand: a report of 520 cases. *Microsurgery* 1995;16:35-9.
 114. Songcharoen P, Mahaisavariya B, Chotigavanich C. Spinal accessory neurotization for restoration of elbow flexion in avulsion injuries of the brachial plexus. *J Hand Surg Am* 1996;21:387-90.
 115. Songcharoen P. Management of brachial plexus injury in adults. *Scand J Surg* 2008;97:317-23.
 116. Songcharoen P, Wongtragul S, Mahaisavariya B. Hemi-controlateral C7 transfer to median nerve in the treatment of root avulsion brachial plexus injury. *J Hand Surg* 2001;26:1058-64.
 117. Spinner RJ, Kline DG. Surgery for peripheral nerve and brachial plexus injuries or other nerve lesions. *Muscle Nerve* 2000;23:680-95.
 118. Spinner RJ. Técnicas y cuidados quirúrgicos. En: Kline y Hudson. Lesiones nerviosas. Resultados del tratamiento quirúrgico de los traumatismos, los atrapamientos y los tumores de los nervios principales. Barcelona:Elsevier 2010;p:87-106.
 119. Sun G, Wu Z, Wang X, Tan X, Gu Y. Nerve transfer helps repair brachial plexus injury by increasing cerebral cortical plasticity. *Neural Regen Res* 2014;9:2111-4.
 120. Sunderland S. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain* 1951;74:491.
 121. Sunderland S. Meningeal-neural relations in the intervertebral foramen. *J Neurosurg* 1974;40:756-65.
 122. Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowith V. Restoration of shoulder abduction in brachial plexus injury with phrenic nerve transfer. *Aust N Z J Surg* 2000;70:783-5.
 123. Tavakkolizadeh A, Saifuddin A, Birch R. Imaging of adult brachial plexus traction injuries. *J Hand Surg* 2001;26:183-91.
 124. Terzis JK, Papakonstantinou KC. The surgical treatment of brachial plexus injuries in adults. *Plast Reconstr Surg* 2000;106:1097-124.
 125. Terzis JK, Vekris MD, Soucacos PN. Brachial plexus root avulsions. *World J Surg* 2001;25:1048-61.
 126. Terzis JK, Vekris MD, Soucacos PN. Outcomes of brachial plexus reconstruction in 204 patients with devastating paralysis. *Plast Rec Surg* 1999;104:1221-40.
 127. Tsuyama N, Hara T, Maehiro S, Imoto T. Intercostal nerve transfer for traumatic brachial nerve palsy. *Seikei Geka* 1969;20:1527-9.
 128. Tung TH. Nerve transfers. *Clin Plastic Surg* 2014;41:551-9.
 129. Turkof E, Millesi H, Turkof R, Pfundner P y Mayr N. Intraoperative electroneurodiagnostics (transcranial electrical motor evoked potentials) to evaluate

- the functional status of anterior spinal roots and spinal nerves during brachial plexus surgery. *Plastic Reconstr Surg* 1997;99:1632-41.
130. Tuttle HK. Exposure of the brachial plexus with nerve transplantation. *JAMA* 1913;61:15-7.
 131. Uetani M, Hayashi K, Hashmi R, Nakahara N, Aso N, Ito N. Traction injuries of the brachial plexus: signal intensity changes of the posterior cervical paraspinal muscles on MRI. *J Comput Assist Tomogr* 1997;21:790-5.
 132. Van Beek A, Hubble B, Kinkead L. Clinical use of nerve stimulation and recording. *Plast Reconstr Surg* 1983;71:225-32.
 133. Vekris MD, Beris AE, Johnson EO, Korobiliadis AV, Pafilas D, Vekris AD, Soucacos PN. Musculocutaneous neurotization to restore elbow flexion in brachial plexus paralysis. *Microsurgery* 2006;26:325-9.
 134. Vinit S, Stamegna JC, Boulenguez P, Gauthier P, Kastner A. Restorative respiratory pathways after partial cervical spinal cord injury: role of ipsilateral phrenic afferents. *Eur J Neurosci* 2007;25:3551-60.
 135. Vulpius O, Stoffel A. *Orthopädische operationslehre*. 2ed. Stuttgart:Enke;1920.
 136. Waikakul S, Orapin S, Vanadurongwan V. Clinical results of contralateral C7 root neurotization to the median nerve in brachial plexus injuries with total root avulsions. *J Hand Surg Br* 1999;24:556-60.
 137. Waikakul S, Wongtragul S, Vanadurongwan V. Restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injury: comparing spinal accessory nerve with intercostals nerve transfer. *J Hand Surg* 1999;24:571-7.
 138. Walker AT, Chaloupka JC, De Lotbiniere ACJ. Detection of nerve rootlet avulsion on CT myelography in patients with birth palsy and brachial plexus injury after trauma. *AJR Am J Roentgenology* 1996;167:1283-7.
 139. Wang SF, Li PC, Xue YH, Li YC, Wang HH. Contralateral C7 nerve transfer with direct coaptation to restore lower trunk function after traumatic brachial plexus avulsion. *J Bone Joint Surg Am* 2013;95:821-7.
 140. Wojtkiewick DM, Saunders J, Domeshek L, Novak CB, Kaskutas V, Mackinnon SE. Social impact of peripheral nerve injuries. *Hand* 2015;10:161-7.
 141. Xu WD, Gu YD, Lu JB, Yu C, Zhang CG, Xu JG. Pulmonary function after complete unilateral phrenic nerve transection. *J Neurosurg* 2005;103:464-7.
 142. Xu WD, Gu YG, Xu JG, Tan LJ. Full-length phrenic nerve transfer by means of video-assisted thoracic surgery in treating brachial plexus avulsion injury. *Plast Reconstr Surg* 2002;110:104-11.
 143. Xu WD, Lu JZ, Qiu YQ, Jiang S, Xu L, Xu JG, Gu YD. Hand prehension recovery after brachial plexus avulsion injury by performing a full-length phrenic nerve transfer via endoscopic thoracic surgery. *J Neurosurg* 2008;108:1215-9.
 144. Yamada S, Peterson GW, Soloniuk DS, Will AD. Coaptation of the anterior rami of C-3 and C-4 to the upper trunk of the brachial plexus for cervical root avulsion. *J Neurosurg* 1991;74:171-7.

145. Yang Y, Chen L, Gu YD, Hu SN, Zhang H. Long-term impact of transfer of phrenic nerve on respiratory system of children: a clinical study of 34 cases. *Zhonghua Yi Xue Zhi* 2006;86:1179-82.
146. Yoshimura M, Amaya S, Tyujo M. Experimental studies on the traction injury of peripheral nerves. *Neuro Orthop* 1989;7:1-7.
147. Zheng MX, Qiu YQ, Xu WD, Xu JG. Long-term observation of respiratory function after unilateral phrenic nerve and multiple intercostal nerve transfer for avulsed brachial plexus injury. *Neurosurgery* 2012;70:796-801.
148. Zheng MX, Xu WD, Qiu YQ, Xu JG, Gu YD. Phrenic nerve transfer for elbow flexion and intercostal nerve transfer for elbow extensión. *J Hand Surg Am* 2010;35:1304-9.
149. Zheng MX, Xu WD, Shen YD, Xu JG, Gu YD. Reconstruction of elbow flexion by end-to-side neurorraphy in phrenic nerve transfer. *Plast Reconstr Surg* 2012;129:573-5.

PUBLICACIONES

9. PAPER/PUBLICACIONES

Publications that support the thesis/ Publicaciones que avalan la tesis:

Socolovsky M, di Masi G, Bonilla G, **Páez MD**, Robla J, Cabrera CC. The phrenic nerve as donor for brachial plexus injuries: is it safe and effective? Case series and literatura review. *Acta Neurochir* 2015; 157:1077-86.

Socolovsky M, **Páez MD**. A literatura review of intercostal-to-musculocutaneous-nerve transfers in brachial plexus injury patients: does body mass index influence results in Eastern versus Western countries?. *Surg Neurol Int* 2013; 4:152.doi:10.4103/2152-7806.122233.

Robla-Costales J, **Domínguez-Páez M**, Socolovsky M. Técnicas modernas en microcirugía de los nervios periféricos. 1ed. Buenos Aires: Journal; 2015.

The phrenic nerve as a donor for brachial plexus injuries: is it safe and effective? Case series and literature analysis

Mariano Socolovsky¹ · Gilda di Masi¹ · Gonzalo Bonilla¹ · Miguel Domínguez Paez² · Javier Robla³ · Camilo Calvache Cabrera⁴

Received: 15 January 2015 / Accepted: 26 February 2015
© Springer-Verlag Wien 2015

Abstract

Background Controversy exists surrounding the use of the phrenic nerve for transfer in severe brachial plexus injuries. The objectives of this study are: (1) to present the experience of the authors using the phrenic nerve in a single institution; and (2) to thoroughly review the existing literature to date.

Methods Adult patients with C5-D1 and C5-C8 lesions and a phrenic nerve transfer were retrospectively included. Patients with follow-up shorter than 18 months were excluded. The MRC muscle strength grading system was used to rate the outcome. Clinical repercussions relating to sectioning of the phrenic nerve were studied. An intense rehabilitation program was started after surgery, and compliance to this program was monitored using a previously described scale. Statistical analysis was performed with the obtained data.

Results Fifty-one patients were included. The mean time between trauma and surgery was 5.7 months. Three-quarters of the patients had C5-D1, with the remainder C5-C8. Mean post-operative follow-up was 32.5 months. A MRC of M4 was achieved in 62.7 % patients, M3

21.6 %, M2 in 3.9 %, and M1 in 11.8 %. The only significant differences between the two groups were in graft length (9.8 vs. 15.1 cm, $p=0.01$); and in the rehabilitation compliance score (2.86 vs. 2.00, $p=0.01$).

Conclusions Results of phrenic nerve transfer are predictable and good, especially if the grafts are short and the rehabilitation is adequate. It may adversely affect respiratory function tests, but this rarely correlates clinically. Contraindications to the use of the phrenic nerve exist and should be respected.

Keywords Brachial plexus injury · Phrenic nerve · Extraplexual transfer · Nerve transfer

Introduction

Brachial plexus lesions are devastating, and occur predominantly in young and economically active male individuals. Most of these injuries are related to motorcycle trauma and have become a serious societal problem, especially in big cities [1]. Controversy exists surrounding the use of the phrenic nerve as a source of transferable axons for this type of injury. While some high-volume brachial plexus centers use this strategy frequently, other equally experienced departments never use the phrenic nerve for neurotization. The most commonly cited argument against using the phrenic nerve relates to the unknown deleterious respiratory effects that could develop from diaphragmatic paralysis, both short- and long-term. As one of the most important principles in medicine is “first do not harm”, we believe that this argument against using the phrenic nerve as a donor should not be denied superficially. On the other hand, many surgeons, even among those who deny

✉ Mariano Socolovsky
socolovsky@fibertel.com.ar

¹ Nerve & Plexus Surgery Program, Division of Neurosurgery, University of Buenos Aires School of Medicine, Buenos Aires, Argentina

² Neurosurgical Department, Hospital Regional Universitario Carlos Haya, Málaga, Spain

³ Neurosurgical Department, Hospital de León, León, Spain

⁴ Neurosurgical Department, Hospital de la Sabana, Bogotá, Colombia

using it, accept that the phrenic nerve is a powerful motor nerve that yields predictably good results when transferred to certain nerve targets. Moreover, the literature describes several compensatory mechanisms that appear to limit the negative effects of hemidiaphragmatic paralysis.

The general objectives of the present paper are: (1) to present our experiences over 10 years of clinical practice using the phrenic nerve as an axon donor in surgeries performed at the Peripheral Nerve & Brachial Plexus Program in Buenos Aires, Argentina; and (2) to thoroughly review the existing literature to date to identify all empirical evidence for and against the use of phrenic nerve transfers for brachial plexus injuries. Specific objectives related to the current series were (1) to identify the percentage of patients who experience a good result, as per the British MRC scale, using the phrenic nerve as an axon donor; and (2) to compare those achieving a good result versus those not achieving a good result with respect to baseline demographic and clinical, as well as surgical variables.

Methods

From January 1, 2004 to December 13, 2013, a total of 276 traumatic brachial plexus injuries were treated with surgery at the Peripheral Nerve & Brachial Plexus Surgery Program within the Department of Neurosurgery at the University of Buenos Aires. Only those adult patients with severe brachial plexus palsy (C5-D1 and C5-C8) and an extraplexual phrenic nerve transfer were retrospectively included in the present series. Patients under 14 years old, those with follow-up shorter than 18 months, and those with superior limb amputations were excluded from analysis. Written informed consent was obtained from each patient. Variables like patient age, sex, weight, time from trauma to surgery, and extent of the lesion were recorded.

The preoperative patient evaluation included neurophysiological studies (nerve conduction studies and electromyography), pre-operative respiratory function tests, and myelo-MRI. Nerve transfers were considered when preoperative evaluation and intraoperative findings ruled out the presence of an available root for reconstruction. Cases with a partial root avulsion according to MRI were excluded for phrenic nerve transfer, and the same occurred in partial (upper/middle) trunk palsies, where other options for nerve transfer were available.

The surgical technique included a supraclavicular incision one standard finger-breadth over the clavicular line, which allowed for complete exposure of the proximal brachial plexus and its branches (including the upper and middle trunks with

their anterior and posterior divisions, and the suprascapular nerve), the phrenic nerve, and the spinal accessory nerve. Once available roots and other potential extraplexual axon donors were identified, distal targets were selected by (1) using the just-mentioned proximal targets (e.g., the anterior division of the upper trunk to re-establish elbow flexion) or (2) creating a new incision starting at the axilla and following the proximal medial brachial fossa. In the procedure described in (1), a short nerve graft would generally be required, while in (2), a nerve graft longer than 10 cm is needed. Pertinent distal targets (musculocutaneous nerve or its branches to the biceps, the radial nerve, or its branches to the triceps, or the pectoral and axillary nerves) were identified. Once donor and corresponding target nerves, according to availability, were decided upon, direct neurotomy or autologous nerve grafts were employed to bridge the gap. It is important to mention that in all cases of this series, when the phrenic nerve was transferred in an attempt to restore a certain upper limb function, this was the only attempt to recover that function (i.e., if the phrenic was transferred to the anterior division of the upper trunk, no intercostal to musculocutaneous nerve transfer was performed simultaneously). Otherwise, it would be impossible to determine the real result of the phrenic nerve transfer.

Postoperative evaluations were performed on a regular basis every three months for a minimum of 18 months. An intense rehabilitation program was started 3 weeks after surgery, and compliance to this program was monitored using a previously described scale, which rates rehab compliance between 1 (little compliance) and 4 (full compliance), presented in Table 1. [2]. The Medical Research Council (MRC) muscle strength grading system (ranging from 0=no contraction to 5=normal strength) was used to rate the final primary outcome. An overall good result was considered MRC grade 3 strength or better, and a bad result grades 0, 1, or 2. Clinical repercussions relating to sectioning of the phrenic nerve were investigated at every postoperative evaluation, with specific tests indicated if any answer to screening questions was affirmative or if any respiratory symptom had developed. In each postoperative interview, several questions were performed in

Table 1 The rehabilitation quality scale used to quantify adherence to and the quality of a patient's postoperative rehabilitation program

Score	Description
1	No rehabilitation therapy at all or less than once a week
2	Rehabilitation therapy more than once per week, but not at a specialized neuro-rehabilitation center
3	Good adherence with the entire rehabilitation program, but not at a specialized neuro-rehabilitation center; periodically assessed at a specialized neuro-rehabilitation center
4	Patient adheres perfectly to the entire rehabilitation program at a specialized neuro-rehabilitation center

Table 2 Questionnaire for patients in postoperative control after phrenic nerve section

- .1-Do you feel shortness of breath when you are lying in bed?
- .2-Can you wake up from bed, dress yourself, and bathe without dyspnea?
- .3-Can you run 300 meters without stopping for dyspnea?
- .4-Can you climb 3 flights of stairs without stopping for dyspnea?

order to address this issue (Table 2). If any sign of ventilator compromise was present, respiratory studies were performed sequentially to determine the exact grade of affection and its evolution.

Statistical analysis

Means and standard deviations were calculated for all continuous variables and percentages for all categorical variables. Prior to selecting the appropriate statistical test for inferential testing, for each variable the Kolmogorov–Smirnov test was used to test for normality and Levene’s test for equality of variances. To compare patients with good versus poor MRC outcomes, Student’s *t* tests were used for comparisons of normally distributed continuous variables—like age, body mass index, and length of time between injury and surgery—and Pearson χ^2 analysis to compare categorical variables like gender, mechanism of injury, and lesion level, with $p < 0.05$ set as the threshold for statistical significance and all tests two-tailed. A Pearson correlation coefficient was calculated for the MRC versus the score of each patient for the rehabilitation scale, with an a priori *r* level of 0.40 set as the threshold for moderate correlation, and $r = 0.70$ set as the threshold for a strong correlation.

Results

Demographic and baseline characteristics of the sample are presented in Table 3. The sample of 51 patients was overwhelmingly male, and 61 % were between the ages of 20 and 29, though ages ranged from 14 to 56. Roughly 60 % were of normal weight, with the remainder either overweight ($n = 19$) or obese ($n = 2$). The mechanism of injury was a motorcycle accident in all but four cases. The mean time between trauma and surgery was 5.7 months (standard deviation, 3.5), ranging from 1 to 24 months; 40 of the patients (78 %) underwent their reconstruction within 6 months, nine (18 %) between 6 and 12 months after their injury, and two (4 %) after more than 12 months. Three-quarters of the patients had involvement of the C5 through D1 levels, with the remainder from C5 through C8. As stated previously as an inclusion criteria, all patients suffered from complete avulsion of each of the affected roots.

The most commonly performed phrenic nerve graft was to the musculocutaneous nerve ($n = 21$, 41 %) followed by

grafting phrenic nerve to the anterior division of the upper trunk ($n = 11$, 22 %) (Table 4). The majority (69 %) of phrenic nerve grafts were targeted to peripheral nerves, with 25.5 % attached at the division level and only 6 % at the cord level.

Mean post-operative follow-up was 32.5 months, ranging from 18 to 57 months. The process of strength recovery started with subtle muscle movements related to full inspiration. The physiotherapist took advantage of this fact, and after a variable period of 4 to 9 months, a strongest recovery was observed, still related to respiration (breathing arm). Finally, the movement becomes independent from the respiration. A British MRC level strength rating of M4 was achieved in 32 of the 51 patients (62.7 %) by the time of final follow-up, with M3 achieved in 11 (21.6 %), M2 in two (3.9 %), and M1 in six (11.8 %). Using the MRC threshold of $\geq M3$ as a good result, a good outcome was thereby achieved in 43 of the 51 patients (84.3 %). A rehabilitation compliance rating of 4 was achieved in ten patients (19.6 %), of three in 20 patients (39.2 %), and of two and one in 16 (31.4 %) and four (7.8 %) patients, respectively. A moderately strong correlation was noted between the final MRC and the rehabilitation score ($r = 0.40$, $p = 0.004$). Only two of 51 patients experienced any respiratory symptoms, both were mild and transitory.

Table 3 Demographics and baseline clinical characteristics of the sample

	N	%
Total sample	51	
Males	47	92.2 %
Age at time of surgery		
<20	7	13.7 %
20–29	31	60.8 %
30–39	8	15.7 %
≥ 40	5	9.8 %
Weight by BMI		
Normal weight	30	58.8 %
Overweight	19	37.3 %
Obese	2	3.9 %
Level of lesion		
C5–D1	39	76.5 %
C5–C8	12	23.5 %
Mechanism of injury		
Motorcycle accident	47	92.2 %
Car accident	3	5.9 %
Other cause	1	2.0 %



Table 4 Surgical procedure and results

	N	%
Total sample	51	
Procedure		
Phrenic nerve to musculocutaneous nerve	21	41.2 %
Phrenic to anterior division, upper trunk	11	21.6 %
Other	19	37.3 %
Target level of graft		
Division	13	25.5 %
Cord	3	5.9 %
Branch	35	68.6 %
Outcomes		
British MRC strength rating		
M1	6	11.8 %
M2	2	3.9 %
M3	11	21.6 %
M4	32	62.7 %
Overall outcome		
Good	43	84.3 %
Poor	8	15.7 %
Rehabilitation scale score		
1	4	7.8 %
2	16	31.4 %
3	20	39.2 %
4	10	19.6 %
Respiratory symptoms	2	3.9 %

Comparing those patients achieving a good versus poor outcome, those in the former group were almost 4½ years older, but this difference failed to achieve statistical significance ($p=0.18$; Table 5). They also underwent surgery an average of roughly 2 months earlier than their less responsive counterparts; but this difference also failed to achieve

statistical significance ($p=0.16$). The only significant differences between the two groups was in graft length, the length of graft in responders being more than 5 cm shorter (9.8 vs. 15.1 cm, $p=0.01$); and in the mean rehabilitation compliance score (2.86 vs. 2.00, $p=0.01$).

Two patients answered positively to the questions #3 & 4 of Table 2. The first patient was a 31-year-old man with obesity and a right brachial plexus complete avulsion who developed postoperatively a dyspnea after efforts like running shortly or climbing stairs. A vital capacity reduction of 21 % was observed at 3 months, gradually diminishing to 9 % at 2 years. Positive clinical signs—only after questioning, but not spontaneously—remained present for 1 year. The other patient was a 48-year-old overweight (but not obese) woman who had a right-sided complete brachial plexus palsy: the postoperative respiratory evolution was similar as the former patient. Vital capacity reduced 19 % at 4 months and 10 % at 2 years, and symptoms disappeared 18 months after the surgery.

Discussion

The current series of 51 patients with complete palsy resulting from either a C5-D1 or C5-C8 injury makes a strong case for both the effectiveness and safety of phrenic nerve grafts in reconstruction, given the functional results (M3 or M4) that we observed in 84 % of our patients, and the very low rate of respiratory symptoms (4 %), all of which were not life-threatening. Even both two patients had a right palsy, due this small number, no statistical analysis was possible regarding the differences between right and left sided diaphragmatic consequences of phrenic nerve section. There were just two predictors of a successful outcome. One was graft length, with graft lengths appreciably shorter in those who responded versus

Table 5 Comparing patients with poor versus good MRC outcomes

	Good outcome	Poor outcome	Test statistic	Significance
N	43	8		
Mean age	27.2	22.8	$t=1.37$	$p=0.18$
Females (%)	9.3 %	0.0 %	$\chi^2=0.81$	$p=0.37$
Mean height (cm)	168.7	170.4	$t=0.46$	$p=0.65$
Mean weight (kg)	69.4	72.3	$t=0.68$	$p=0.50$
Mean BMI	24.4	24.7	$t=0.28$	$p=0.78$
Overweight (%)	50.0 %	39.5 %	$\chi^2=0.31$	$p=0.58$
Mean time since injury (months)	5.4	7.3	$t=1.43$	$p=0.16$
Motocycle accident (%)	90.7 %	100.0 %	$\chi^2=0.81$	$p=0.67$
C5-D1 (%)	74.4 %	87.5 %	$\chi^2=0.64$	$p=0.42$
Mean graft length (cm)	9.8	15.1	$t=2.90$	$p=0.01$
Mean follow-up (months)	32.7	31.0	$t=0.31$	$p=0.76$
Rehabilitation compliance score	2.86	2.00	$t=2.67$	$p=0.01$

those with a less satisfactory result. Even though it was previously reported by our group [3] that long grafts would theoretically avoid dispersion of the growing axons and direct them towards a more precisely elected target, this comparative study demonstrates that the shorter the graft, the better the result. The other predictor was in the degree of compliance with post-operative rehabilitation, as measured with the previously reported rehabilitation compliance score; moreover, the British MRC strength rating and the compliance scale rating were moderately correlated, suggesting that compliance with post-operative rehabilitation and, therefore, rehabilitation itself are important components of overall treatment. Though our sample lacked the power to confirm this statistically, there also seemed to be better results in older patients and patients who waited less time to undergo reconstruction following their injury.

One confounder factor regarding the results of our series could be the existence of a prefixed brachial plexus receiving a large contribution from the C4 spinal nerve. These spared nerve fibers might have contributed to some of the observed recovery. The fact that our patients developed "breathing arm" (without any concomitant intercostal nerve transfer performed in the same patient) favors the phrenic nerve as axon source. Also, many nerve transfers were done proximally (i.e., to the anterior division of the upper trunk, which was sectioned completely to receive the donor axons, eliminating the possibility of an eventual reception of a C4 contribution to the biceps), and finally, if we analyze the literature regarding the destination of C4 fibers, the percentage of so-called "pre-fixed plexus" (this means, a large contribution of C4 going to the brachial plexus) is around 20 to 25 % in the normal population [4]. Eighty percent of these prefixed brachial plexuses receive contributions to the musculocutaneous nerve, while 50 % of the axillary receive fibers from C4 in those pre-fixed plexus. Nevertheless, the number of fibers directed to these targets is 5 % of the total number of fibers of that nerve. For example, for the axillary nerve, a mean of 245 fibers come from C4 (for a total of 6700 fibers in that nerve), and for the musculocutaneous, a mean of 298 fibers arise from C4, for a total of 6500 approximately [5]. In conclusion, considering all these numbers, even in the statistically uncommon scenario that some unrecognized and spared nerve fibers might proceed from C4, the number of these fibers are approximately the same as one intercostal nerve [1]. The power of this number of fibers for contributing to some of the observed recovery is undoubtedly low.

Scientific arguments against using the phrenic nerve as a donor for brachial plexus reconstruction

The main concern related to using the phrenic nerve as a donor for brachial plexus reconstruction is the potential for either transient or permanent loss of pulmonary function.

However, in their series, Luedemann et al. [6] identified a statistically significant reduction in vital ventilatory capacity only when the right phrenic nerve was used, and this was not clinically evident. The authors concluded that phrenic nerve use for brachial plexus reinnervation is contraindicated only when preoperative maximum inspiratory pressure is decreased. Accessory phrenic nerve function has been related to the absence of clinical effects after phrenic nerve section [6], which relates to Luedemann et al. study if we consider that most reported origins of the phrenic nerve have been on the right side [7]. Our two patients who had respiratory symptoms after phrenic nerve section had a right-sided palsy, but this number was too small to make any statistical analysis on this topic. Meanwhile, Songcharoen et al. followed 12 patients over 2 years, and none presented with either signs or symptoms of respiratory failure or post-operative respiratory complications. In addition, 25 % had normal diaphragmatic movement on the affected side, all respiratory function tests were normal, and vital capacity was reduced only in 9.4 %, returning to normal after 6–24 months [8].

In a series published by Chuang et al. in which the phrenic nerve was used as a donor in 19 patients with brachial plexus injuries, 42 % reported some post-operative dyspnea, but it disappeared within 6 months of the procedure, though a persistent 8 % decrease in total pulmonary respiratory function was noted [9]. This finding was corroborated by Siqueira et al., in 80 % of their patients with 2 years of follow-up, but no clinical symptoms appeared affecting quality of life [10]. This latter group considers the phrenic nerve as a primary good donor for brachial plexus reconstructive surgery.

Other investigators have documented a greater extent of respiratory compromise, like Zheng et al. [11], who observed a decrease in forced vital capacity, forced respiratory volume, and total pulmonary volume in 26.3, 28.0, and 25.2 % of their patients, respectively, associated with a mean hemidiaphragmatic elevation of 1.0 to 1.5 intercostal spaces in 90.5 % of patients. These data contrast with clinical symptoms in the same series, however; when asked, only 2 % reported mild dyspnea during exercise. Moreover, sacrificing one or two intercostal nerves 2 months after the first procedure was similarly well tolerated [11]. It is also worthy to note that the long-term effects of phrenic nerve versus phrenic plus intercostal nerve transfers were similar in a series with a median follow-up of 10 years [11, 12].

In other series of patients wherein a phrenic nerve lesion was observed as a complication of another procedure (e.g., cardioablation), the percentage with symptomatology profile has been completely different, with 88 % presenting with dyspnea, cough and hiccups, a standard recovery time of 4–5 months, and 16 % still without complete recovery after 3 years [2, 13, 14]. Of course, those series included patients with previous illnesses, who are unlike the generally young and otherwise healthy patient with a brachial plexus injury.

Considering all the aforementioned information, before performing a phrenic nerve transfer, diaphragmatic and pulmonary function should be evaluated; and if it is altered, the phrenic nerve should not be used. In cases of thoracic trauma, multiple costal fractures and/or pulmonary contusions, the nerve transfer should be delayed until final healing of those injuries [3, 15]. For the same reason, simultaneous phrenic and intercostal nerve transfers should be avoided, though no published evidence exists documenting any important respiratory effects if they are used in a two-stage procedure [9, 16]. Some authors believe that there are fewer respiratory effects when intercostal nerves are used instead of the phrenic nerve as a donor [17].

That phrenic nerve transfers are contraindicated in children below 3 years of age has been demonstrated convincingly. Infants born with diaphragmatic paralysis usually have severe respiratory complications [8]; and children under 3 years of age have a higher incidence of respiratory problems, chest deformities, and gut abnormalities when the phrenic nerve is sectioned. Moreover, the younger the child, the more severe the expected complications are. Children older than 3 years of age generally tolerate phrenic nerve use much better [18]. Reasons for the poor tolerability in those younger than three include the later development of accessory respiratory muscles, the paradoxical movements of a paralyzed hemi-diaphragm, mediastinal hyper-motility, their greater volume of respiratory secretions, and the prolongation of REM sleep in infants, among others [19, 20].

The main disadvantage of phrenic nerve transfers, which is shared by all other extraplexal transfers, is that cerebral cortical plasticity plays an important role in the final results [21]. When the recovery of strength is in its initial stages, patients tend to move their arm by taking a deep breath, as mentioned in the results. Even though the vast majority of patients tend to perform this movement independent of the diaphragm, it can take 2–3 years to achieve this, and it needs specific rehabilitation that can be frustrating in patients who lack diaphragmatic power [8, 22].

Physiological arguments that favor using the phrenic nerve as an axon donor for brachial plexus reconstruction

Lurje [23] is known to have been the first to propose using the phrenic nerve as an axon donor for brachial plexus injuries; but it was Gu, in China, who initially started using it, in 1970, publishing his first series in 1989 [24]. The phrenic nerve primarily originates from C4, with variable contributions from C3 and C5, and an accessory phrenic nerve present in 25–38 % of patients [8]. That the phrenic nerve shares a common embryonic origin with the brachial plexus, though posteriorly their trajectories diverge [25], makes it an ideal extraplexal donor. This is further supported by its location in the neck, which facilitates its approach during supraclavicular plexus

dissection, and in some cases, allows for coaptation with the target without the need for interposed grafts [6]. Moreover, the nerve generally has 800 to 1750 pure motor myelin-coated fibers [10], much more than an intercostal nerve, which has approximately 200 [1]. Nevertheless, the cervical portion is not long enough for direct coaptation when an infraclavicular or more distal target must be reached, necessitating a graft, and in many cases a long one. Some authors have proposed an intra-thoracic nerve dissection as a way to obtain a longer phrenic nerve and perform direct neurotaphy to targets as distal as the medial contribution for the median nerve, without grafts [26].

As mentioned previously, accessory phrenic nerves are present in 20–84 % of patients, originating from a surprisingly diverse constellation of nerves, like the subclavian, sternohyoideus, accessory, and hypoglossal [15]. That it might join the main phrenic nerve at the cervical or, more importantly, thorax level may be one of the explanations for the minimal effect that sectioning of the cervical portion has on vital capacity and other respiratory function tests [5, 15]. Unfortunately, there is currently no way to determine the exact contribution of each phrenic nerve to pulmonary function, or to predict the effects of its sectioning on function tests [6, 27–29]. It has been demonstrated that unilateral diaphragmatic palsy has minimum effects on the respiratory function clinically [30], while bilateral palsy can be catastrophic [31].

What actually explains the minimal respiratory effect observed after phrenic nerve section? Many compensatory mechanisms exist. In order to understand these mechanisms, we must briefly review diaphragmatic innervation. Sensory afferents are the phrenic nerve, the vagus, and the sympathetic chain, while motor afferents are the phrenic and intercostal nerves [13]. Cervical afferents, in a rat model under normal conditions, comprise less than 30 % of the available respiratory motoneurons [5]; to increase diaphragm strength, they must fire those motor neurons more frequently, and recruit other motor units in the diaphragm [25]. Di Rocco also showed in rats that 1 week after phrenic nerve sectioning, a 32 % increase in respiratory frequency maintains normal ventilator volumes; nevertheless, 1 week later, accessory muscle hypertrophy is evident [32]. Bach also reported no differences in the rat model after a unilateral phrenic nerve section, both at rest and during exercise, the only acute change being prolongation of the response to hypoxia, which normalized 1 month later. This was presumed to be due to an increase in α_2 receptors, together with a bigger contribution by the hypoglossal nerve [33].

Another compensatory mechanism that plays an important role after a section of the phrenic nerve is the so-called “crossed phrenic phenomenon”. This happens because premotor bulbospinal motor neurons (in the ventral respiratory group) have bilateral projections to both phrenic nuclei that remain in latency [34]; due to neuroplasticity, this bilateral

activation appears within 1–4 months (25–73 % within the first 2 months) due to hypercapnia [34–38]. All these mechanisms are mediated both biochemically [39] and genetically [37]. Even though the “crossed nerve phenomenon” is observed after a spine hemisection followed by a contralateral phrenic nerve section—and not in a scenario of a single phrenic nerve section, as occurs when this nerve is used as donor in brachial plexus surgery—it is possible to speculate that a similar compensatory phenomenon could be present after a phrenicotomy. More studies in this field are needed to clarify this point.

In those compensatory mechanisms that take place after a phrenic nerve section, as described above, the accessory phrenic nerves play an important role. Therefore, it is correct to presume that a long intra-thoracic phrenic nerve dissection could directly affect this response by eliminating accessory phrenic nerve connections to the main nerve [40, 41]. This fact is only theoretical and still remains to be proven.

Previous series supporting the use of phrenic nerves as axon donors

In a group of 12 patients described by Songcharoen, phrenic nerve neurotization achieved an MRC score of 3 or more every time when the suprascapular nerve was employed as a target (at 8 months, 70° of abduction and 30° of external rotation), versus 66 % observed elsewhere with the axillary nerve (70° of abduction and anterior flexion) and 60 % with the musculocutaneous nerve (90° flexion), the latter two requiring an interposed graft [8, 30]. In Chuang's series of 37 patients in whom both the suprascapular and axillary nerve were used as targets for the phrenic nerve, 20–40° abduction was achieved with the former, versus less than 20° with the latter [42]. Meanwhile, for Sungpet, ten patients submitted to phrenic to suprascapular nerve transfer experienced 20–60° of abduction of [43], and Gu achieved MRC scores ≥ 3 in 77 % (45 % ≥ 4) of 65 patients who underwent a phrenic to musculocutaneous nerve transfer [24], a result comparable to those of Luedemann et al., with 92 % M3+M4 and 58 % M4 alone [6]; of Xu et al. : 73 and 36 % [44]; of Monreal (20 patients, 70 % M3+M4 and 30 % M4 [1]; and of Siqueira et al., with 70 % M3 and 20 % M4 [10]. Better and worse results have also been published, ranging from 100 % M4 achieved by El-Gammal [45, 46] in four patients and 100 % MRC ≥ 3 by Vekris [47] to just 29 % MRC ≥ 3 by Chalidapong [17].

Other targets have yielded similar results. For example, in 33 patients undergoing phrenic nerve transfer to the anterior division of the upper trunk, an MRC score ≥ 3 was achieved in 85 % and an MRC score ≥ 4 in 64 % [18]. Other studies have shown M3 scores in 75 % and M4 results in 42 % [11, 12]. Finally, performing a phrenic to median nerve transfer in three patients, Xu achieved

MRC scores ≥ 3 in all three [48]. For a summary of the above-mentioned studies, see Table 6.

Final remarks

In the literature, it is well appreciated that phrenic nerve sectioning is associated with clear compromise of respiratory function tests [2, 9–11, 13, 14, 16]. However, this effect does not appear to be clinically evident or to adversely affect the quality of life of patients in any way [6–8, 11]. It also is worth noting that, in the vast majority of the above-noted reports, no comparisons against baseline/pre-operative respiratory status were performed, postoperative parameters only being compared against population norms adjusted for age, sex, body mass index, etc. [11]. Other potentially clinically relevant respiratory problems associated with the primary trauma that caused the brachial plexus injury also have not been systematically analyzed [9].

It has been suspected that the lack of any clinically pertinent respiratory effects of phrenic nerve sections are related to the so-called “crossed phrenic phenomenon” [34–39], as well as to the existence of accessory respiratory musculature, accessory phrenic nerves, contralateral phrenic and diaphragmatic hyperactivity, and other factors [13, 25, 35, 36, 38–41]. These mechanisms have been studied only in animal models—especially in rats and dogs—most models related to spinal cord rather than phrenic nerve sections, the results of which do not allow for definitive conclusions regarding their role in the latter.

Having these data in mind, it is important to note certain contraindications against using the phrenic nerve as a donor during brachial plexus reconstruction; for example, severe pre-existing pulmonary pathology, severe thoracic trauma, multiple rib fractures, or pulmonary contusions secondary to trauma [6, 8]. The procedure also is contraindicated in patients younger than 3 years old [8, 18–20].

On the other hand, it has been demonstrated that the phrenic nerve is a reliable and predictable nerve for transfer [1, 6, 8, 10, 12, 16, 17, 24, 42–45, 47, 48, 50, 51] and that, having the above-mentioned precautions and contra-indications in mind, the technique is safe. The main complaint patients have is the time delay for the muscle to be re-innervated, which is related to the growth rate of the regeneration axon and the distance to the muscle target, not to the type of donor nerve [8, 22].

The reluctance of many very experienced brachial plexus surgeons to use the phrenic nerve as axon source contrast with the data presented in the papers cited above and with our personal experience presented in this study. It is presumable that other reasons not analyzed here, i.e., the presence of a predominantly obese population of patients, the consideration of eventual legal problems,

Table 6 Published series on the use of the phrenic nerve for neurotization in brachial plexus injuries

Results of phrenic nerve transfer described in the literature				
Authors	No. of patients	Receptor	Result	Respiratory complications
Songcharoen et al. [10]	12	Suprascapular Axillary Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 75 % MRC ≥ 3 : 66 % MRC ≥ 3 : 60 %	Asymptomatic VC reduction 9.4 %
Chuang et al. [42]	37	Suprascapular Axillary	Abduction 20–40° Abduction <20°	NR
Sungpet et al. [49]	10	Suprascapular	Abduction 20–60°	Asymptomatic
Gu et al. [24]	65	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 77 % MRC ≥ 4 : 45 %	Mild diminution in TV 1 year, recovered 2 years. Five YO child transitory respiratory problems
Luedemann et al. [15]	12	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 92 % MRC ≥ 4 : 58 %	Compromised TV 14.3 % right side, 3.6 % left side, asymptomatic
Xu et al. [38]	11	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 73 % MRC ≥ 4 : 36 %	Asymptomatic. Spirometry values similar to pre-op 1Y after surgery except for MIP
Monreal et al. [7]	20	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 70 % MRC ≥ 4 : 30 %	NR
Siqueim et al. [14]	10	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 70 % MRC ≥ 4 : 20 %	Asymptomatic. Mild forced vital capacity 2 years after surgery
El-Gammal et al. [46]	4	Musculocutaneous	MRC ≥ 4 : 100 %	NR
Vekris et al. [29]	17	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 100 %	NR
Chalidapong et al. [17]	17	Musculocutaneous	MRC ≥ 3 : 29 %	Asymptomatic Tidal respiratory volume compromise in spirometry
Liu et al. [36, 44]	33	ADUT	MRC ≥ 3 : 85 % MRC ≥ 4 : 64 %	Asymptomatic
Zheng et al. [41]	12	ADUT	MRC ≥ 3 : 75 % MRC ≥ 4 : 42 %	Symptoms only with heavy efforts. No significant spirometric alterations
Xu et al. [40]	3	Median	MRC ≥ 3 : 100 %	Normal function one year after surgery
Socolovsky et al. (present series)	51	Musculocutaneous, suprascapular, axillary, median, ADUT, PDUT, radial, Gracilis	MRC ≥ 3 : 83.5 % M4 60 %	Asymptomatic except two cases, with mild and transitory complains

the absence of long-term effects respiratory function tests results, or even the lack of experience in this nerve transfer, could explain this preference.

Conclusions

The phrenic nerve, due to its pure motor nature, the easy manipulation of its axons, and its convenient location in the surgical field, is a very good axon donor for severe brachial plexus injuries. Results are predictable and generally good, with roughly 80 % of patients achieving a BMRC scale grade of 3 or more. As far as we know, our series presents the largest number of patients undergoing this procedure outside of China.

Using the phrenic nerve may adversely affect respiratory function tests, but this rarely correlates clinically. Many potential explanations exist for this repeatedly observed

discrepancy between respiratory tests and symptoms, but research still is warranted to clarify this issue.

It is also clear that contraindications to the use of the phrenic nerve exist and should be respected, such as patients less than 3 years of age, patients with severe thoracic trauma or cardio-respiratory morbidity, and those who are obese, among others.

Both our study and our literature review have limitations. The greatest limitation with the former was that the sample was too small to statistically detect possibly important predictive effects of time from injury to surgery and patient age on outcomes. The greatest limitation with the latter is that negative studies tend not to be published, potentially biasing conclusions. Nonetheless, we feel that the evidence is clear—that with the correct balance of patient selection, appropriate surgical techniques, and well-administered post-operative rehabilitation, good results with phrenic nerve transfers for brachial plexus reconstruction are likely. Nevertheless, further, more-extensive studies on the long-term effects of phrenic

nerve transfers, and comparisons of this technique against others, still wait to be conducted.

Conflicts of interest The authors report no conflicts of interest concerning the materials or methods used in this study or the findings presented in this paper. No funding or financial support was received by the authors for preparation of the present paper. This original material has never been presented or published previously.

References

1. Montreal R (2007) Restoration of elbow flexion by transfer of the phrenic nerve to the musculocutaneous nerve after brachial plexus injuries. *Hand (N Y)* 2(4):206–211
2. Andrié R, Schrickel JW, Nickenig G, Lickfett L (2012) Left phrenic nerve injury during cryoballoon ablation of the left superior pulmonary vein. *Pacing Clin Electrophysiol* 35(11):e334–e336
3. Socolovsky M, Di Masi G, Battaglia D (2011) Use of long autologous nerve grafts in brachial plexus reconstruction: factors that affect the outcome. *Acta Neurochir (Wien)* 153(11):2231–2240
4. Hur MS, Woo JS, Park SY, Kang BS, Shin C, Kim HJ, Lee KS (2011) Destination of the C4 component of the prefixed brachial plexus. *Clin Anat* 24(6):717–720
5. Norkus T, Norkus M, Ramanauskas T (2005) Donor, recipient and nerve grafts in brachial plexus reconstruction: anatomical and technical features for facilitating the exposure. *Surg Radiol Anat* 27(6):524–530
6. Luedemann W, Hamm M, Blömer U, Samii M, Tatagiba M (2002) Brachial plexus neurotization with donor phrenic nerves and its effect on pulmonary function. *J Neurosurg* 96(3):523–526
7. Marie J, Lerosey Y, Dehesdin D, Tadié M, Andrieu-Guitrancourt J (1999) Cervical anatomy of phrenic nerve roots in the rabbit. *European Group for Research on the Larynx. Ann Otol Rhinol Laryngol* 108(5):516–521
8. Songcharoen P (2008) Management of brachial plexus injury in adults. *Scand J Surg* 97(4):317–323
9. Chuang ML, Chuang DC, Lin IF, Vintch JR, Ker JJ, Tsao TC (2005) Ventilation and exercise performance after phrenic nerve and multiple intercostal nerve transfers for avulsed brachial plexus injury. *Chest* 128(5):3434–3439
10. Siqueira M, Martins RS (2009) Phrenic nerve transfer in the restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injuries: how effective and safe is it? *Neurosurgery* 65(4 Suppl):A125–A131
11. Zheng MX, Qiu YQ, Xu WD, Xu JG (2012) Long-term observation of respiratory function after unilateral phrenic nerve and multiple intercostal nerve transfer for avulsed brachial plexus injury. *Neurosurgery* 70(4):796–801
12. Zheng MX, Xu WD, Qiu YQ, Xu JG, Gu YD (2010) Phrenic nerve transfer for elbow flexion and intercostal nerve transfer for elbow extension. *J Hand Surg [Am]* 35(8):1304–1309
13. Chang FY, Lu CL (2012) Hiccup: mystery, nature and treatment. *J Neurogastroenterol Motil* 18(2):123–130
14. Sacher F, Monahan KH, Thomas SP et al (2006) Phrenic nerve injury after atrial fibrillation catheter ablation: characterization and outcome in a multicenter study. *J Am Coll Cardiol* 47(12):2498–2503
15. Loukas M, Kinsella CR Jr, Louis RG Jr, Gandhi S, Curry B (2006) Surgical anatomy of the accessory phrenic nerve. *Ann Thorac Surg* 82(5):1870–1875
16. Zheng MX, Xu WD, Shen YD, Xu JG, Gu YD (2012) Reconstruction of elbow flexion by end-to-side neurotaphy in phrenic nerve transfer. *Plast Reconstr Surg* 129(3):573e–575e
17. Chalidapong P, Saranpanich K, Kraissarin J, Bumroongkit C (2004) Pulmonary and biceps function after intercostal and phrenic nerve transfer for brachial plexus injuries. *J Hand Surg (Br)* 29(1):8–11
18. Yang Y, Chen L, Gu YD, Hu SN, Zhang H (2006) Long-term impact of transfer of phrenic nerve on respiratory system of children: a clinical study of 34 cases. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi* 86(17):1179–1182
19. Haller JA Jr, Pickard LR, Tepas JJ, Rogers MC, Robotham JL, Shorter N, Shermeta DW (1979) Management of diaphragmatic paralysis in infants with special emphasis on selection of patients for operative plication. *J Pediatr Surg* 14(6):779–785
20. Shoemaker R, Palmer G, Brown JW, King H (1982) Aggressive treatment of acquired phrenic nerve paralysis in infants and small children. *Ann Thorac Surg* 32(3):250–259
21. Bertelli JA, Ghizoni MF (2011) Results and current approach for brachial plexus reconstruction. *J Brachial Plex Peripher Nerve Inj* 6(1):2
22. Addas BM, Midha R (2009) Nerve transfers for severe nerve injury. *Neurosurg Clin N Am* 20(1):27–38
23. Larje A (1948) Concerning surgical treatment of traumatic injury to the upper division of the brachial plexus (Erb's type). *Ann Surg* 127(2):317–326
24. Gu YD, Ma MK (1996) Use of the phrenic nerve for brachial plexus reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 323:119–121
25. Greer JJ, Allan DW, Martin-Carballo M, Lemke RP (1999) An overview of phrenic nerve and diaphragm muscle development in the perinatal rat. *J Appl Physiol* 86(3):779–786
26. Wood MB, Murray PM (2007) Heterotopic nerve transfers: recent trends with expanding indication. *J Hand Surg [Am]* 32(3):397–408
27. Berkmen YM, Davis SD, Kazam E, Auh YH, Yankelevitz D, Girgis FG (1989) Right phrenic nerve: anatomy, CT appearance, and differentiation from the pulmonary ligament. *Radiology* 173(1):43–46
28. Fackler CD, Perret GE, Bedell GN (1967) Effect of unilateral phrenic nerve section on lung function. *J Appl Physiol* 23(6):923–926
29. Strauss P, Turndorf H (1990) The contribution of the right phrenic nerve to ventilation. *J Cardiothorac Anesth* 4(1):97–101
30. Songcharoen P (1995) Brachial plexus injury in Thailand: a report of 520 cases. *Microsurgery* 16(1):35–39
31. De Troyer A, Kelly S (1982) Chest wall mechanics in dogs with acute diaphragmatic paralysis. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 53(2):373–379
32. Rocco PR, Faffle DS, Feijóo M, Menzes SL, Vasconcellos FP, Zin WA (1997) Effects of uni- and bilateral phrenicotomy on active and passive respiratory mechanics in rats. *Respir Physiol* 110(1):9–18
33. Bach KB, Mitchell GS (2000) Effects of phrenicotomy and exercise on hypoxia-induced changes in phrenic motor output. *J Appl Physiol* 89(5):1884–1891
34. Golder FJ, Fuller DD, Davenport PW, Johnson RD, Reier PJ, Bolser DC (2003) Respiratory motor recovery after unilateral spinal cord injury: eliminating crossed phrenic activity decreases tidal volume and increases contralateral respiratory motor output. *J Neurosci* 23(6):2494–2501
35. Golder FJ, Reier PJ, Bolser DC (2001) Altered respiratory motor drive after spinal cord injury: supraspinal and bilateral effects of a unilateral lesion. *J Neurosci* 21(21):8680–8689
36. Liou WW, Goshgarian HG (1994) Quantitative assessment of the effect of chronic phrenicotomy on the induction of the crossed phrenic phenomenon. *Exp Neurol* 127(1):145–153
37. Malakhova OE, Davenport PW (2001) c-Fos expression in the central nervous system elicited by phrenic nerve stimulation. *J Appl Physiol* 90(4):1291–1298
38. Vinit S, Starnegna JC, Boulenguez P, Gauthier P, Kästner A (2007) Restorative respiratory pathways after partial cervical spinal cord

- injury: role of ipsilateral phrenic afferents. *Eur J Neurosci* 25(12): 3551–3560
39. Nantwi KD, Goshgarian HG (2002) Actions of specific adenosine receptor A1 and A2 agonists and antagonists in recovery of phrenic motor output following upper cervical spinal cord injury in adult rats. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 29(10):915–923
 40. Xu W, Gu YD, Lu JB, Yu C, Zhang CG, Xu JG (2005) Pulmonary function after complete unilateral phrenic nerve transection. *J Neurosurg* 103(3):464–467
 41. Zhang CG, Ma JJ, Terenghi G, Mantovani C, Wiberg M (2004) Phrenic nerve transfer in the treatment of brachial plexus avulsion: an experimental study of nerve regeneration and muscle morphology in rats. *Microsurgery* 24(3):232–240
 42. Chuang DC, Lee GW, Hashem F, Wei FC (1995) Restoration of shoulder abduction by nerve transfer in avulsed brachial plexus injury: evaluation of 99 patients with various nerve transfers. *Plast Reconstr Surg* 96(1):122–128
 43. Sungpet A, Suphachitwong C, Kawinwonggowit V (2000) Restoration of shoulder abduction in brachial plexus injury with phrenic nerve transfer. *Aust N Z J Surg* 70(11):783–785
 44. Xu W, Gu YD, Xu JG, Tan LJ (2002) Full-length phrenic nerve transfer by means of video-assisted thoracic surgery in treating brachial plexus avulsion injury. *Plast Reconstr Surg* 110(1):104–111
 45. El-Gammal TA, El-Sayed A, Koth MM (2003) Surgical treatment of brachial plexus traction injuries in children, excluding obstetric palsy. *Microsurgery* 23(1):14–17
 46. El-Gammal TA, Fathi NA (2002) Outcomes of surgical treatment of brachial plexus injuries using nerve grafting and nerve transfers. *J Reconstr Microsurg* 18(1):7–15
 47. Vekris MD, Beris AE, Johnson EO, Korobilias AV, Pafilas D, Vekris AD, Soucacos PN (2006) Musculocutaneous neurotization to restore elbow flexion in brachial plexus paralysis. *Microsurgery* 26(4):325–329
 48. Xu WD, Lu JZ, Qiu YQ, Jiang S, Xu L, Xu JG, Gu YD (2008) Hand prehension recovery after brachial plexus avulsion injury by performing a full-length phrenic nerve transfer via endoscopic thoracic surgery. *J Neurosurg* 108(6):1215–1219
 49. Stradling JR, Kozar LF, Dark J, Kirby T, Andrey SM, Phillipson EA (1987) Effect of acute diaphragm paralysis on ventilation in awake and sleeping canines. *Am Rev Respir Dis* 136(3):633–637
 50. Liu Y, Lao J, Gao K, Gu Y, Zhao X (2013) Comparative study of phrenic nerve transfers with and without nerve graft for elbow flexion after global brachial plexus injury. *Injury* 45(1):227–231
 51. Liu Y, Lao J, Zhao X (2014) Comparative study of phrenic and intercostal nerve transfers for elbow flexion after global brachial plexus injury. *Injury*. doi:10.1016/j.injury.2014.11.034

Comments

One of the prime tenets of medicine is “primum non nocere” or “first do no harm.” The desire by the physician to help must always be balanced against the risks of doing harm. This consideration becomes important and most relevant to the peripheral nerve surgeon in the clinical setting of severe brachial plexus injuries where all, or almost all, of the spinal nerve roots supplying the upper extremity have been avulsed from the spinal cord, resulting in very limited repair options involving distal neurotization of a functionally important nerve supplying the biceps muscle with an intact proximal nerve such as the spinal accessory nerve, intercostal nerves, or even the phrenic nerve as discussed in this paper. The reluctance of many peripheral nerve surgeons to use the phrenic nerve as a donor nerve to restore elbow flexion function, as noted by the authors, stems from the belief and fear that doing so either compromises the patient’s pulmonary function significantly or at the very least puts the patient at risk of suffering such a fate in the future. The results of this paper go a long way in reassuring the surgeon that many appropriately selected patients with good preoperative lung function can tolerate sacrificing phrenic nerve innervation of the diaphragm, in an effort to restore biceps function, on one side for a variety of possible reasons mediated by several possible biological mechanisms. This paper is well written and reviews the results of a large experience with severe and extensively injured brachial plexus patients. I think this paper makes an important contribution to the field and phrenic nerve neurotization is a viable repair option to the peripheral nerve surgeon when confronted with a severe brachial plexus injury that leaves him or her with very limited repair options.

Michel Kliot
Illinois, USA

Literature Review

A literature review of intercostal-to-musculocutaneous-nerve transfers in brachial plexus injury patients: Does body mass index influence results in Eastern versus Western countries?Mariano Socolovsky, Miguel Domínguez Páez¹

Nerve and Plexus Surgery Program, Division of Neurosurgery, University of Buenos Aires School of Medicine, Buenos Aires, Argentina,

²Servicio de Neurocirugía, Hospital Regional Universitario Carlos Haya, Málaga, EspañaE-mail: *Mariano Socolovsky - socolovsky@fibertel.com.ar; Miguel Domínguez Páez - dr.m.dominguezpaez@gmail.com

*Corresponding author

Received: 12 September 13 Accepted: 15 October 13 Published: 27 November 13

This article may be cited as:Socolovsky M, Páez MD. A literature review of intercostal-to-musculocutaneous-nerve transfers in brachial plexus injury patients: Does body mass index influence results in Eastern versus Western countries? *Surg Neurol Int* 2013;4:152.Available FREE in open access from: <http://www.surgicalneurologyint.com/text.asp?2013/4/1/152/122233>

Copyright © 2013 Socolovsky M. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract**Background:** A wide range of results have appeared in the literature for intercostal nerve transfers in brachial plexus patients. Oriental countries generally have a lower body mass index (BMI) than their occidental counterparts. We analyzed published series of intercostal nerve transfers for elbow reinnervation to determine if a difference in outcomes exists between Eastern and Western series that could be inversely related to BMI.**Methods:** A PubMed search was conducted. Inclusion criteria were: (1) time from trauma to surgery <12 months, (2) minimum follow-up one year, (3) intercostal to musculocutaneous nerve transfer the only surgical procedure performed to reestablish elbow flexion, and (4) males comprising more than 75% of cases. Two groups were created: Series from western countries, including America, Europe, and Africa; and series from Asia. Pearson correlation analysis was performed to assess for the degree of correlation between percent responders and mean national BMI.**Results:** A total of 26 series were included, 14 from western countries and 12 from Eastern countries, encompassing a total of 274 and 432 surgical cases, respectively. The two groups were almost identical in mean age, but quite different in mean national BMI (26.3 vs. 22.5) and in the percentage of patients who achieved at least a Medical Research Council (MRC) level 3 (59.5% vs. 79.3%). Time from trauma to surgery was slightly shorter in Eastern (3.4 months) versus Western countries (5.0 months).**Conclusions:** The percentage of responders to intercostal to musculocutaneous nerve transfer was inversely correlated with the mean national BMI among male residents of the country where the series was performed.**Key Words:** Brachial plexus injury, body mass index elbow flexion, intercostal nerve transfer**Access this article online****Website:**
www.surgicalneurologyint.com**DOI:**
10.4103/2152-7806.122233**Quick Response Code:****INTRODUCTION**

Intercostal nerve transfers have been used actively as a tool for elbow flexion reinnervation in traumatic brachial

plexus patients. This technique is originally attributed to Yeomann, working with Seddon.^[1] Reports in the 60s and 70s by Asian surgeons contributed to its popularization, with several other targets introduced later for which

Surgical Neurology International 2013, 4:152

<http://www.surgicalneurologyint.com/content/4/1/152>

the intercostals were used as nerve donors, besides the musculocutaneous nerve and its branches.^[12,14,27,36] Despite its popularity in the literature, several reports appeared of either frank failure or no better than mediocre results while employing this technique, rendering intercostal to musculocutaneous nerve transfers a second or third choice among axon donor procedures at certain centers in the West.^[12,23,31] In contrast, many others, especially in Eastern countries, still consider this technique to be one of the best alternatives for nerve transfer.^[15,16,18,26,39]

Unfortunately, a major challenge arises when one attempts to statistically assess the effectiveness of any given operative technique in brachial plexus patients. In any single series, the number of patients typically is too small to allow for adequate statistical power. Moreover, other problems arise when you attempt to combine a number of surgical series for statistical analysis, which include heterogeneity of the primary injury, nuances in the surgical repair technique, and the adoption of different postoperative outcomes. In addition, different languages and geographical, social, linguistic, and economical factors might play a role in determining treatment outcomes, though how and to what extent such effects occur generally remain unclear.

Among others, the interval of time between the initial trauma and reparative surgery, and the number of avulsed roots are recognized factors that determine the results of brachial plexus surgery.^[11,17,18,20] Body mass index (BMI), which reflects a patient's weight relative to height, has only recently been reported as yet another prognostic factor, with its influence appearing not to be as strong as the timing of surgery.^[9,31,32]

The objective behind writing the present paper was to analyze all available series involving intercostal nerve transfers for elbow reanimation reported in the literature, in an attempt to determine if any difference in outcomes exists between Eastern and Western countries that could be inversely related to patient BMI, and thereby at least partially explain the dichotomy that exists in the acceptance of intercostal to musculocutaneous nerve transfers in different countries.

MATERIALS AND METHODS

A PubMed search was conducted to identify all series reported in the English-language literature describing the results of intercostal to musculocutaneous nerve transfers to restore elbow flexion. Inclusion criteria for studies were: (1) time from trauma to surgery less than 12 months; (2) a minimum follow-up period of one year after surgical reconstruction; (3) intercostal to musculocutaneous nerve transfer as the only surgical procedure performed to restore elbow flexion; and (4) males comprising more than 75% of reported cases.

Papers were excluded if they contained insufficient information to determine if all four inclusion criteria were met, or if the same group of investigators was suspected of duplicating results reported in another publication; in this latter case, only the most recently published report was included in analysis.

The results of each included series were summarized in a global table that also included the mean BMI among males residing in the participating country in the year of series publication, obtained via census or other national survey statistics stratified by gender and year.^[4]

For group comparisons, countries were allocated either as a Western country, which incorporated the Americas, Europe, and Africa, or as an Eastern country, which incorporated all of Asia. For statistical analysis, means were generated for each patient characteristic and clinical outcome, and then weighted to reflect the number of subjects in each series. Despite the absence of individual patient data, Pearson correlation analysis still could be conducted because it relies on proportions, not means, and thereby has no need of standard deviation or standard error values. Analyzed variables were mean age, time from trauma to surgery, percentage of subjects who achieved a postoperative strength of at least MRC 3, mean BMI for males of each country for the year of series publication, and the number of intercostal nerves used for nerve transfer. The obtained results are organized in tables.

RESULTS

A total of 26 published series were included in the analysis: 14 from countries we considered Western (USA = 6, France = 2, Germany = 1, Holland = 1, Yugoslavia = 1, Denmark = 1, Australia = 1, Egypt = 1), and 12 from Eastern countries (Japan = 7, India = 2, Thailand = 2, Taiwan = 1). The total number of surgical cases was 274 from the West and 432 from the East [Tables 1 and 2]. Weighted means for all the analyzed variables are presented in Table 3. The two geographical groups were almost identical in mean age, but quite different in the percentage who achieved at least an MRC-3 level (59.5% vs. 79.3%) and in mean national BMI (26.3 vs. 22.5). Also, the time from trauma to surgery was slightly shorter in Eastern (3.4 months) than Western countries (5.0 months).

Correlation analysis revealed the percentage of responders to be inversely correlated with the national mean BMI of the country in which the series of procedures was performed, as predicted, with studies conducted in countries with a lower mean BMI generating better results. However, an even stronger inverse correlation was evident between the time to surgery and percentage of responders; note again that the mean wait for surgery

[Downloaded free from <http://www.surgicalneurologyint.com> on Sunday, January 12, 2014, IP: 217.12.16.56] || Click here to download free Android application

Surgical Neurology International 2013, 4:152

<http://www.surgicalneurologyint.com/content/4/1/152>

Table 1: 274 cases of intercostal-to-musculocutaneous nerve transfer in Western countries

Source/year	No. of patients	Age (years)	Delay	No. of IC's used	Result: MRC 3/+ MRC 4/+	Country	Mean BMI ^P
Sedel ^{PM} (1982)	7	17-44 (22.4)	2-14 (7)	57.1% 2 IC	71.4% 0%	France	24.76
Simesen ^{PM} (1985)	4	4-70 (21)	4-6	2	0% 0%	Denmark	24.57
Berger ^{PI} (1985)	58	?	<6	1-4	53.4% 29.3%	Germany	25.66
Samardžić ^{PM} (1992)	7	11-57	2-12 (4)	2-3	43% ?	former Yugoslavia	25.99
Kline ^{PI} (1995)	37	13-43 (22)	<5	?	57% 46%	USA	27.18
Rush ^{PM} (1995)	16 [†]	10-42 (21.8)	3-12 (6)	81.2% 3 IC	50% 50%	USA	27.18
Krakauer ^{PM} (1995)	6	7-50 (22.4)	1-8 (5.25)	2	75% 50%	USA	27.18
Tonkin ^{PM} (1996)	17	17-35 (23.5)	1.5-11 (5.5)	2	64.7% 47%	Australia	26.37
Malessy ^{PM} (1998)	25	22.1	<5 (3.35)	84% 3 IC	64% 56%	Holland	25.08
Merrell ^{PM} (2001)	10	7-67 (26)	4-8 (5)	90% 3 IC	90% 70%	USA	27.61
El Gammal ^{PI} (2002)	20	(27)	(4.9)	3	85% 45%	Egypt	26.23
Sulaiman ^{PM} (2008)	9	?	?	?	22.22% ?	USA	28.46
Coulet ^{PI} (2010)	17	25 ± 8	5.7 ± 2.3	3	70.5% 41.2%	France	25.87
Terzio ^{PM} (2012)	39	26.02 ± 9.63	60.3% < 8	84.6% ≥ 3	56.25% ?	USA	28.46

^P: One amputation case was excluded. ^{PI}: Among males residing in the country where the study was performed, in the year of paper publication. BMI: Body mass index, MRC: Medical Research Council Scale

was 1½ months shorter in Eastern series. No correlation existed between the mean percentage of responders and the mean number of intercostal nerves used.

DISCUSSION

The data analyzed here demonstrate an inverse relationship between the national mean BMI of males and the results obtained in published series from that country of intercostal to musculocutaneous nerve transfers in brachial plexus patients.

Obviously, one major methodological weakness of our analysis is that the BMI data included for statistical purposes were mean values of the country of paper origin in its year of publication, and not BMI values extracted from the series themselves. The reason for this is a purely practical one: Series-specific data were rarely available. Moreover, we used mean national BMI values for males, while some females were included in the analyzed series. In most instances, however, very few, if any, females were included.

Our analysis also shows that another variable, time to surgery, a variable that has already been recognized as a strong predictor of outcome, exerted an effect. On one hand, this consistency with previously published results adds credence to our analysis. On the other hand, time to surgery might have been a confounder in the relationship we observed between BMI and outcome. Obviously, a prospective study in which BMI is measured preoperatively in all patients would be far preferable to our analysis. However, in the absence of such data, we believe that our analysis does offer potential insights, and is aided by its inclusion of a large number of patients, making it far preferable to simple conjecture or personal anecdotal experience.

These data could help to explain why intercostals are preferred in some Eastern countries as donors in elbow flexion reinnervation procedures, while in the West the technique tends to only be used when no other donor is available. Of course, exceptions exist to this. To date, all the data published regarding the influence of BMI on brachial plexus surgery outcomes, besides being scarce,

Table 2: 437 cases of intercostal-to-musculocutaneous nerve transfer in Eastern countries

Source/year	No. of patients	Age (years)	Delay	No. of IC's used	Result: MRC 3/+ MRC 4/+	Country	Mean BMI ¹
Minami ^[21] 1986	17	?	?	2	100% 71%	Japan	22.19
Nagano ^[22] 1989	149	16-50	88.5% <6	98% 2 IC	69.8% 25.5%	Japan	22.31
Chuang ^[6] 1992	66	17-60 (27)	2-12 (4)	56% 3 IC 44% 2 IC	66.7% 66.7%	Taiwan	22.01
Ochiai ^[24] 1993	21	16-36 (21.8)	1-5 (3.5)	2	76.2% 52.3%	Japan	22.54
Kawai ^[11] 1994	6	17-46 (28)	<3.5 (2)	2-4	100% 83%	Japan	22.62
Ogino ^[25] 1995	10	16-22 (18.6)	1-8 (2.7)	2	90% 70%	Japan	22.69
Okinaga ^[26] 1999	11	16-29 (22.8)	1-6.5 (2.4)	2	100% 63.6%	Japan	23.00
Waikaku ^[28] 1999	75	18-40 (25±6)	2-6 (3.8±2)	3	93.3% 66.5%	Thailand	22.44
Nagano ^[22] 2001	112 ²	4-47 (22)	0.13-9 (3)	2	87% 41%	Japan	23.13
Chalidapong ^[29] 2004	19	(25±8)	<6	2	58.8% 17.6%	Thailand	22.73
Bhandari ^[7] 2009	4	(22.5)	3-4 (3.5)	3	75% 25%	India	20.99
Bathia ^[8] 2011	59	4-51 ³	(3.2)	3	79.6% ?	India	20.99

1: Among males residing in the country where the study was performed, in the year of paper publication. 2: Data extracted from a larger series. 3: Patients from 1992 to 1986 were included in a previous series, published in 1989.

Table 3: Weighted means for Western and Eastern samples

	Western countries	Eastern countries
Age	24.0	23.9
Delay	5.0	3.4
No. of intercostals transferred	2.8	2.3
% MRC3	59.5	79.3
% MRC4	41.6	46.1
Mean BMI	26.3	22.5

BMI: Body mass index, MRC: Medical Council Research Scale

demonstrate that this is not as influential a factor as the time from trauma to surgery or the extent of the primary injury. Further data must be collected to make firm conclusions regarding this issue.

It is well known that residents of Asian countries generally have lower BMIs and much lower rates of obesity than their occidental counterparts. Though these differences are trending toward disappearing in the future, at present they still exist. We note, however, that the majority of series included in the present analysis were published in the 80s and 90s. In those decades, the difference in population mean BMI between Eastern and Western countries was greater than it is now.^[17,34] This greater

difference rendered the current statistical analysis more likely to detect significant correlations.

The mean age of the two study groups, East and West, were almost identical. However, Western surgeons tended to use more intercostal nerve donors per procedure: 2.8 versus 2.3 among their Asian counterparts. More intercostal nerves should translate into more axons for the target muscles (each nerve having approximately 200 motor fibers at the anterior axillary line). This difference should favor occidental studies, in terms of results, but clearly does not.^[10] Kawai *et al.* identified no difference using more than two intercostals, even though they demonstrated better results using two versus only a single nerve.^[11] Similarly, in their meta-analysis, Merrel *et al.* failed to demonstrate any influence of the number of transferred intercostals on results, while considering two, three, and four nerves as donors.^[20] In contrast, Chuang *et al.* improved their results using three nerves.^[6]

That the difference in the average delay from trauma to surgery was a bit more than 1½ months longer in Western countries could certainly have played a role in our analysis results. Nevertheless, the mean delay of 5.0 months in the West is still well within the 6-month time window generally recommended for brachial plexus repair surgery.



Surgical Neurology International 2013, 4:152

In fact, many recommend waiting as long as 6 months to allow for any spontaneous reinnervation to occur prior to surgical intervention and its associated risks. That Eastern series tended to involve earlier surgical intervention raises the possibility that some of their enhanced 'surgical results,' in fact, were due to natural healing.

In this study, study error was minimized by limiting our analysis to cases of nonobstetric brachial plexus palsy in adults, all operated upon within one year of trauma and having at least one year of follow-up. As such, we tried to eliminate as many other sources of statistical error and confounding as possible. Nevertheless, some differences between series – like the use of interposed grafts between donor and target nerves, the effect of physiotherapy, and various nuances in surgical technique – could have played a role in the results of each series.

Furthermore, problems like the assessment of results by nonblinded observers, often a member of the surgical team itself, are common in the brachial plexus literature. As such, a prospective study is clearly warranted to determine the true predictive role of BMI and many other variables on the results of brachial plexus surgery using intercostal grafts.

CONCLUSIONS

Data published in the literature seem to favor lower BMI as a predictor of enhanced outcome in intercostal to musculocutaneous nerve transfers. However, future research remains necessary, preferably with all data, including preoperative BMI, collected prospectively and all outcomes assessed by a blinded observer.

REFERENCES

- Berger A, Becker MH. Brachial plexus surgery: Our concept of the last twelve years. *Microsurgery* 1994;15:760-7.
- Bhandari PS, Sadhotra LP, Bhargava P, Bath AS, Mukherjee MK, Bhatti T, et al. Surgical outcomes following nerve transfers in upper brachial plexus injuries. *Indian J Plast Surg* 2009;42:150-60.
- Bhatti A, Shyam AK, Doshi P, Shah V. Nerve reconstruction: A cohort study of 93 cases of global brachial plexus palsy. *Indian J Orthop* 2011;45:153-60.
- Imperial College of London.org [homepage on the Internet]. London, British Medical Council Public Health 2012. Body Mass Index (BMI) by Country, Global Burden of Metabolic Risk Factors of Chronic Diseases Collaborating Group; Available from: <http://www5.imperial.ac.uk/medicine/metabolic%5Frisk/bmi/>. [Last updated on 2012 May; cited on 2013 Sept 6].
- Chalidapong P, Sananpanich K, Kraisan J, Bumroongkit C. Pulmonary and biceps function after intercostal and phrenic nerve transfer for brachial plexus injuries. *J Hand Surg Br* 2004;29:8-11.
- Chuang DC, Yeh MC, Wei FC. Intercostal nerve transfer of the musculocutaneous nerve in avulsed brachial plexus injuries: Evaluation of 66 patients. *J Hand Surg Am* 1992;17:822-8.
- Coulet B, Boretto JG, Lazerges C, Chammas M. A comparison of intercostal and partial ulnar nerve transfers in restoring elbow flexion following upper brachial plexus injury (C5-C6±C7). *J Hand Surg Am* 2010;35:1297-303.
- El-Gammal TA, Fathi NA. Outcomes of surgical treatment of brachial plexus injuries using nerve grafting and nerve transfers. *J Reconstr Microsurg* 2002;18:7-15.

<http://www.surgicalneurologyint.com/content/4/1/152>

- Efthassan B, Bishop AT, Hartzler RJ, Shin AY, Spinner RJ. Tendon transfer options about the shoulder in patients with brachial plexus injury. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:1391-8.
- Freilinger G, Holle J, Sultgruber SC. Distribution of motor and sensory fibers in the intercostal nerves. Significance in reconstructive surgery. *Plast Reconstr Surg* 1978;62:240-4.
- Jivan S, Kumar N, Wiberg M, Kay S. The influence of pre-surgical delay on functional outcome after reconstruction of brachial plexus injuries. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2009;62:472-9.
- Kawabata, Minami M, Ishii S. Satisfactory elbow flexion in complete (preganglionic) brachial plexus injuries: Produced by suture of third and fourth intercostal nerves to musculocutaneous nerve. *J Hand Surg Am* 1987;12:1114-8.
- Kawai H, Murase T, Kawabata H, Ohta I, Masatomi T, Ono KA, et al. Histochemical study of the biceps brachii muscle cross-innervated by intercostal nerves. *Acta Orthop Scand* 1994;65:204-6.
- Kawai H, Kawabata H, Masada K, Ono K, Yamamoto K, Tsuyuguchi T. Nerve repairs for traumatic brachial plexus palsy with root avulsion. *Clin Orthop* 1988;237:75-86.
- Kline DG, Hudson AR. Stretch injuries to the brachial plexus. In: Kline DG, Hudson AR, editors. *Nerve injuries: Operative results for major nerve injuries, entrapments, and tumors*. Philadelphia:WB Saunders; 1995. p. 415-6.
- Krakauer JD, Wood MB. Intercostal nerve transfer for brachial plexopathy. *J Hand Surg Am* 1994;19:829-35.
- Luedemann W, Hanm M, Bigner U, Samii M, Tatagiba M. Brachial plexus neurotization with donor phrenic nerves and its effect on pulmonary function. *J Neurosurg* 2002;96:523-6.
- Malessy MJ, van Duinen SG, Feirabend HK, Thomeer RT. Correlation between histopathological findings in C-5 and C-6 nerve stumps and motor recovery following nerve grafting for repair of brachial plexus injury. *J Neurosurg* 1999;91:636-44.
- Malessy MJ, Thomeer RT. Evaluation of intercostal to musculocutaneous nerve transfer in reconstructive brachial plexus surgery. *J Neurosurg* 1998;88:266-71.
- 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;26:303-14.
- Minami M, Ishii S. Satisfactory elbow flexion in complete (preganglionic) brachial plexus injuries: Produced by suture of third and fourth intercostal nerves to musculocutaneous nerve. *J Hand Surg Am* 1987;12:1114-8.
- Nagano A, Yamamoto S, Mikami Y. Intercostal nerve transfer to restore upper extremity functions after brachial plexus injury. *Ann Acad Med Singapore* 1995;24 (Suppl 4):42-5.
- Narakas AO. Thoughts on neurotization or nerve transfers for irreparable nerve lesions. *Clin Plastic Surg* 1984;11:153-9.
- Ochiai N, Mikami Y, Yamamoto S, Nakagawa T, Nagano A. A new technique for mismatched nerve suture in direct intercostal nerve transfers. *J Hand Surg* 1993;18:318-9.
- Ogino O, Naito T. Intercostal nerve crossing to restore elbow flexion and sensibility of the hand for a root avulsion type of brachial plexus injury. *Microsurgery* 1995;16:571-7.
- Okonogi S, Nagano A. Can vascularization improve the surgical outcome of the intercostal nerve transfer for traumatic brachial plexus palsy? A clinical comparison of vascularized and non-vascularized methods. *Microsurgery* 1999;19:176-80.
- Ruch DS, Friedman A, Nunley JA. The restoration of elbow flexion with intercostal nerve transfers. *Clin Orthop* 1995;314:95-103.
- Samardzic M, Grujicic D, Antunovic V. Nerve transfer in brachial plexus traction injuries. *J Neurosurg* 1992;76:191-7.
- Sedel L. The results of surgical repair of brachial plexus injuries. *J Bone Joint Surg* 1982;64:54-66.
- Simesen K, Haase J. Microsurgery in brachial plexus lesions. *Acta Orthop Scand* 1985;56:238-41.
- Socolovsky M, Di Masi G, Battaglia D. Use of long autologous nerve grafts in brachial plexus reconstruction: Factors that affect the outcome. *Acta Neurochir* 2011;153:2231-40.
- Socolovsky M, Di Masi G, Bonilla G, Malessy M. Spinal to accessory nerve transfer in traumatic brachial plexus palsy: Is body mass index a predictor

[Downloaded free from <http://www.surgicalneurologyint.com> on Sunday, January 12, 2014, IP: 217.12.16.56] || [Click here to download free Android application](#)

Surgical Neurology International 2013, 4:152

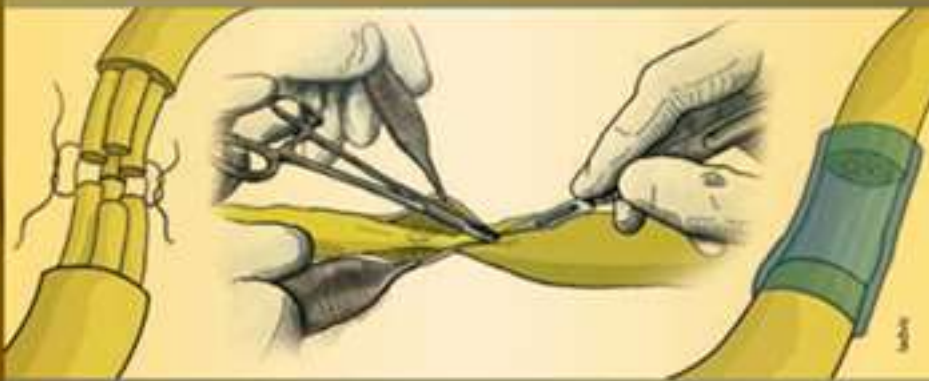
<http://www.surgicalneurologyint.com/content/4/1/152>

- of outcome? *Acta Neurochir* 2013. [Epub ahead of print].
33. Sulaiman OA, Kim DD, Burkett C, Kline DG. Nerve transfer surgery for adult brachial plexus injury: A 10-year experience at Louisiana State University. *Neurosurgery* 2008;65:A55-62.
 34. Terzis JK, Barbitsioti A. Primary restoration of elbow flexion in adult post-traumatic plexopathy patients. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2012;65:72-84.
 35. Tonkin MA, Eckersley JR, Gschwind CR. The surgical treatment of brachial plexus injuries. *Aust N Z J Surg* 1996;66:29-33.
 36. Tsuyama N, Hara T. Reconstructive surgery for traumatic brachial plexus injuries. *Clin Orthop Surg* 1968;3:675-87.
 37. United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. *World Population Prospects: The 2010 Revision*, New York: CD-ROM Edition, 2011.
 38. World Health Organization; WHO Global InfoBase Team. *The SuRF report 2. Surveillance of chronic disease risk factors: Country-level data and comparable estimates, 2005*. Geneva (Switzerland).
 39. Waiakul S, Wongtragul S, Vanadurongwan V. Restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injury: Comparing spinal accessory nerve transfer with intercostal nerve transfer. *J Hand Surg Am* 1999;24:571-7.



Javier Robla Costales • Miguel Domínguez Páez •
Jorge Bustamante • Mariano Socolovsky

Técnicas modernas en microcirugía de los nervios periféricos



EDICIONES
Journal

Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Journal, 2015.
ISBN: 978-987-1981-62-5
Copyright 2015 Ediciones Journal