



Universitat Autònoma de Barcelona

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  http://cat.creativecommons.org/?page_id=184

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



Universitat Autònoma de Barcelona

TESI DOCTORAL

*Canvis musculars detectats per bioimpedància localitzada i
ressonància magnètica, després d'una lesió muscular i fins a la
tornada al joc, en equips professionals de l'esport*

Autor: Joaquim Terricabras i Genís

Directors: Dr. Eng. Lexa Nescolarde Selva
MD. Javier Yanguas Leyes

Tutor: MD. Joan Carles Monllau Garcia

Programa de Doctorat: CIRURGIA I CIÈNCIES MORFOLÒGIQUES

Departament de Cirurgia

Facultat de Medicina

Universitat Autònoma de Barcelona

Octubre 2020

*Als meus fills **Francesc, Oriol i Martí**, que no se si us he dit mai, us estimo molt!!!*

Proverbi africà.

Si vols anar ràpid, vés sol, si vols arribar lluny, vés acompanyat.

Gràcies amics de la meua vida per ajudar-me en aquest projecte, i per ajudar-me a arribar tant lluny.

També us estimo molt!!!

TAULA DE CONTINGUTS

Agraïments	I
Resum	II
Abstract	III
Resumen	IV
Llista de figures i taules	V
Abreviacions	VI
Justificació	VII

1. Introducció

1.1. La lesió muscular en el futbol

- 1.1.1. Lesions musculars mes freqüents al futbol
- 1.1.2. Mecanismes de producció de la lesió muscular
- 1.1.3. Musculatura isquiotibial
- 1.1.4. Musculatura quadricipital

1.2. Factors de risc a la lesió muscular

1.3. Classificació de la lesió muscular

- 1.3.1. Mecanisme directe
- 1.3.2. Mecanisme indirecte

1.4. Diagnòstic i seguiment de la lesió muscular

- 1.4.1. Ecografia múscul-esquelètica
- 1.4.2. Ressonància magnètica nuclear
- 1.4.3. Altres exploracions complementaries

1.5. Bioimpedància localitzada (BIA)

- 1.5.1. Conceptes bàsics
- 1.5.2. Bioimpedància localitzada (L-BIA)

2. Hipòtesis

3. Objectius

- 3.1. Objectiu general
- 3.2. Objectius específics

4. Materials i mètodes

4.1. Mostra analitzada

4.2. Diagnòstic per Imatge

- 4.2.1. Ressonància magnètica (RMN)
- 4.2.2. Ecografia

4.3. Classificació de la lesió muscular segons BAMIC

4.4. Detecció del "gap" muscular per RMN

4.5. Bioimpedància localitzada

4.6. Anàlisi estadístic

- 4.6.1. Obtenció dels valors de referència dels paràmetres de L-BIA

- 4.6.2 Primer treball: Detecció del “gap” muscular per L-BIA (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243)
- 4.6.3 Segon treball: Valoració de la lesió muscular segons la localització anatòmica (doi: 10.3389/fphys.2020.574124)
- 5. Resultats
 - 5.1. Detecció del “gap” muscular per L-BIA
 - 5.2. Valoració de la lesió muscular segons la localització anatòmica
 - 5.2.1. Diferenciació per RNM de lesions musculars segons localització anatòmica
 - 5.2.2. Mesures de L-BIA de lesions tendinoses, MTJ i MFJ.
 - 5.2.3. Mesures per L-BIA de lesions de la unió miotendinosa (MTJ)
 - 5.2.4. Tornada a la competició (RTP) en lesions MTJ i MFJ
- 6. Discussió
 - 6.1. Primer article
 - 6.2. Segon article
- 7. Conclusions
- 8. Treballs publicats
 - 8.1. Articles publicats
 - 8.2. Comunicacions congressos internacionals
- 9. Limitació de la tesi
- 10. Treballs de futur
- 11. Referències bibliogràfiques
- 12. ANEXE_1: Lexa Nescolarde, Joaquim Terricabras, Sandra Mechó, Gil Rodas, Javier Yanguas (2020): Differentiation Between Tendinous, Myotendinous and Myofascial Injuries by L-BIA in Professional Football Players. *Frontiers in Physiology*. doi: 10.3389/fphys.2020.574124. Impact Factor: 3.367/quartile: Q1/area: Physiology.
- 13. ANEXE_2: Nescolarde L, Yanguas J, Terricabras J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J and Rodas G (2017): Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: Clinical prognosis. *Physiol Meas*, 38(7): L1-L9. doi: 10.1088/1361-6579/aa7243. Impact Factor: 2.006/quartile: Q2-T1/area: Engineering, Biomedical.

AGRAÏMENTS

Al meu pare **Francesc Terricabras Feliu**, per mi el verdader doctor Terricabras, el patriarca de la família, la persona que em va inculcar des de ben petit la passió per la medicina i que, a part d'ensenyar-me a ser una bona persona, també em va ensenyar a ser un bon metge. Amb ell, tal com va dir Maimònides (Metge de prínceps i Príncep dels metges (1138-1204)) vaig aprendre a tractar a les persones, no a la malaltia. Penúltima figura d'una nissaga de 6 generacions de metges Terricabras, que creiem, va començar amb el pare del meu tataravi, el doctor **Francisco Terricabras Juando**, llicenciat en medicina i cirurgia l'any 1834.

A la meva mare, **M^aAngels Genis Canal**, per donar-me la vida i ser peça fonamental de la gran família; als meus tres fills **Francesc, Oriol i Marti**, per ser la prolongació de la meva vida; als meus germans, cunyats, nebots i resta de família; a la **Mariona** per ser-hi tants anys i tenir 3 fills meravellosos amb mi; i a la **Irikko** per la companyia i cuidar-me tant bé aquests últims anys.

A la doctora **Lexa Nescolarde**, directora principal d'aquest treball, treballadora incansable i culpable de que hagi arribat tant lluny. Un agraïment i una amistat que perdurarà per sempre. Un agraïment també per la seva filla **Ana** i el seu marit **Paco** per la seva ajuda i paciència durant aquests anys.

Al doctor **Gil Rodas**, codirector durant la gran part del treball d'aquesta tesi, ideòleg i gran culpable de que es fés realitat aquesta tesi doctoral.

Al doctor **Xavier Yanguas**, codirector final d'aquest treball, amic i company de feina al Futbol Club Barcelona, que gràcies al treball realitzat prèviament per la seva tesi doctoral m'ha servit de gran base per la meva tesi.

Al doctor **Joan Carles Monllau**, tutor final d'aquesta tesis, que juntament amb el primer tutor que vaig tenir el doctor **Joan Nardi**, el segon tutor el doctor **Enric Caceres** i la **Universitat Autònoma de Barcelona**, han considerat que aquest treball és mereixedor de ser una tesi doctoral.

Al doctor **Ramon Canal**, cap dels serveis mèdics del **Futbol Club Barcelona**, per la confiança dipositada en mi per treballar en aquest gran club i en la realització d'aquesta tesi doctoral.

Als companys de feina del **Futbol Club Barcelona**, tots engrescats en projectes similars, agraït per la vostra col·laboració i ser tant bon companys.

A l'enginyer **Alex Caldentey** i la doctora **Emma Roca**, per compartir i treballar amb la Lexa tots aquests anys.

Als meus companys de feina de la **Unitat d'Esport i Salut del Consell Català de l'Esport** i del centre mèdic **Bayés Esport** de Vic, per la vostra amistat i col·laboració; i fer-me la feina mes fàcil.

Als meus companys del servei de **Cirurgia Ortopèdica i Traumatologia** del **Hospital General de Vic**, els meus orígens com a metge, on vaig treballar durant 21 anys i van ensenyar-me les bases per ser un bon metge.

Als jugadors del **Futbol Club Barcelona**, i en especial als jugadors del primer equip de **Futbol Sala**, per la bona predisposició a col·laborar en el meu treball tot i el mal moment que passaven després de patir una lesió muscular.

RESUM

Les lesions musculars representen 1/3 del total de lesions sofertes en els jugadors de futbol professional, i aproximadament el 90% d'aquestes lesions es localitzen a les extremitats inferiors.

Aquestes lesions musculars poden ocasionar segons la localització i severitat, un llarg període de temps de baixa esportiva per al jugador; per això és important començar amb un bon diagnòstic (que ajudarà amb el pronòstic de tornada a l'esport (RTP, *return to play*), i un òptim tractament i procés de readaptació esportiva per garantir un RTP satisfactori amb el mínim risc de recaiguda de la lesió (Jarvinen et al., 2007, Orchard et al., 2005, Ueblacker et al., 2015).

Tot i que actualment disposem de tècniques de diagnòstic per imatge molt avançades (RMN 3T i US) en el diagnòstic de la lesió muscular, no hi ha consens sobre un sistema de classificació de lesió muscular (localització anatòmica, edema, defecte intramuscular "gap") idoni per garantir el menor temps de RTP. La bioimpedància localitzada (L-BIA) s'ha convertit recentment, en un mètode per ajudar a les tècniques de diagnòstic clàssiques com ultrasons (US) i la ressonància magnètica (RMN). L-BIA a 50 kHz és un mètode no invasiu i de baix cost que quantifica l'edema muscular (resistència, R) i la desestructuració cel·lular muscular (reactància, Xc) per quantificar el teixit tou danyat.

Aquest projecte va analitzar des de la temporada 2015-2016 fins a la temporada 2018-2019 les mesures de L-BIA a 50 kHz 24 hores després de la lesió muscular, comparada amb la imatge de RMN, amb l'objectiu de millorar el diagnòstic clínic i pronòstic, fins al RTP. Per a això, es van realitzar tres estudis independents: 1) Estudi dels valors de L-BIA dels jugadors professionals no lesionats de futbol i futbol sala del Futbol Club Barcelona per a avaluar la simetria entre els 4 grans grups musculars (quàdriceps, isquiotibials, adductors i tríceps sural) de l'extremitat inferior dreta i esquerra, i en diversos moments d'una mateixa temporada. 2) Anàlisi de la concordança entre la L-BIA i la RMN a 22 lesions musculars classificades segons el "gap" muscular i el RTP, independentment de la seva localització anatòmica. 3) Anàlisi de la concordança entre la L-BIA i la RMN de 37 lesions musculars classificades segons la seva localització anatòmica en intratendinoses, miotendinoses (MTJ) i miofascials (MFJ) i el corresponent temps de RTP.

Els resultats mostren que 1) no hi ha diferències estadísticament significatives en els valors de R i Xc en comparar els 4 grans grups musculars (quàdriceps, isquiotibials, adductors i tríceps sural) de l'extremitat inferior dreta i esquerra, i en diversos moments d'una mateixa temporada, 2) hi ha una significativa reducció ($P < 0.01$) de R i Xc directament relacionat amb la severitat de la lesió muscular segons el "gap" i el RTP, independentment de la seva localització anatòmica, 3) la L-BIA diferencia de manera significativa ($P < 0.01$) les lesions MTJ de les lesions MFJ, així com els diferents graus de severitat de les MTJ i el seu RTP.

ABSTRACT

Muscle injuries account for 1/3 of all injuries suffered by professional football players, and approximately 90% of these injuries are located in the lower extremities. These muscle injuries can cause, depending on the location and severity, a long period of time off from playing; this is why it is important to start with a good diagnosis (which will help with the prognosis of return to play (RTP)), and an optimal treatment and process of sports rehabilitation to ensure rapid return to play (RTP) with minimal risk of reinjury (Jarvinen et al., 2007, Orchard et al., 2005, Ueblacker et al., 2015).

Although very advanced imaging techniques (RMN 3T and US) are currently available for the diagnosis of muscle injury, there is no consensus on a system of classification of muscle injury (anatomical location, edema, intramuscular hole "gap"). Localized bioimpedance (L-BIA) has recently become a method to aid in classical diagnostic techniques such as ultrasound (US) and magnetic resonance imaging (RMN). L-BIA at 50 kHz is a non-invasive, low-cost method that quantifies muscle edema (resistance, R) and muscle cell disorganization (reactance, Xc) to quantify damaged soft tissue.

This project analyzed from the 2015-2016 season to the 2018-2019 season the measurements of L-BIA at 50 kHz 24 hours after muscle injury, compared with the NMR image, with the aim of improving the clinical diagnosis and prognosis, up to RTP. To do this, three independent studies were performed: 1) The L-BIA values of the uninjured professional football and futsal players of Futbol Club Barcelona were studied to study the symmetry between the 4 major muscle groups (quadriceps, hamstrings, adductors, and sural triceps) of the lower right and left extremity, and between several moments of the same season. 2) The similarity between L-BIA and RMN results are analyzed in 22 muscle lesions classified according to the muscle gap and the RTP, regardless of their anatomical location. 3) The concordance between L-BIA and RMN of 37 muscle lesions classified according to their anatomical, intratendinous, myotendinous (MTJ) and myofascial (MFJ) location and the corresponding RTP time is analyzed.

The results show 1) that there are no statistically significant differences in R and Xc values when comparing the 4 major muscle groups (quadriceps, hamstrings, adductors, and sural triceps) of the right and left lower extremities, or between various moments of same season, 2) there is a significant reduction ($P < 0.01$) in R and Xc directly related to the severity of muscle injury according to the "gap" and RTP, regardless of their anatomical location, 3) that L-BIA significantly differentiates ($P < 0.01$) MTJ lesions from MFJ lesions, as well as the different degrees of severity of MTJs and their RTP

RESUMEN

Las lesiones musculares representan 1/3 del total de lesiones sufridas en los jugadores de fútbol profesional, y aproximadamente el 90% de estas lesiones se localizan en las extremidades inferiores.

Estas lesiones musculares pueden ocasionar, según la localización y severidad, un largo período de tiempo de baja deportiva para el jugador; por eso es importante empezar con un buen diagnóstico (que ayudará con el pronóstico de regreso al deporte (RTP, *return to play*), y un óptimo tratamiento y proceso de readaptación deportiva para garantizar un RTP satisfactorio lo antes posible y con el mínimo riesgo de recaída de la lesión (Järvinen et al., 2007, Orchard et al., 2005, Ueblacker et al., 2015).

Aunque actualmente disponemos de técnicas de diagnóstico por imagen muy avanzadas (RMN 3T y US) en el diagnóstico de la lesión muscular, no hay consenso sobre un sistema de clasificación de lesión muscular (localización anatómica, edema, defecto intramuscular "gap" idóneo para garantizar el menor RTP. La bioimpedancia localizada (L-BIA) se ha convertido recientemente en un método para ayudar a las técnicas de diagnóstico clásicas como ultrasonidos (US) y la resonancia magnética (RMN). L-BIA a 50 kHz es un método no invasivo y de bajo coste que cuantifica el edema muscular (resistencia, R) y la desestructuración celular muscular (reactancia, Xc) para cuantificar el tejido blando dañado.

Este proyecto analizó desde la temporada 2015-2016 en la temporada 2018-2019 las medidas de L-BIA a 50 kHz 24 horas después de la lesión muscular, comparada con la imagen de RMN, con el objetivo de mejorar el diagnóstico clínico y pronóstico, hasta el RTP. Para ello, se realizaron tres estudios independientes: 1) Estudio de los valores de L-BIA los jugadores profesionales no lesionados de fútbol y fútbol sala del FC Barcelona para evaluar la simetría entre los 4 grandes grupos musculares (cuádriceps, isquiotibiales, aductores y tríceps sural) de la extremidad inferior derecha e izquierda, y en varios momentos de una misma temporada. 2) Análisis de la concordancia entre la L-BIA y la RMN de 22 lesiones musculares clasificadas según el "gap" muscular y el RTP, independientemente de su localización anatómica. 3) Análisis de la concordancia entre la L-BIA y la RMN de 37 lesiones musculares clasificadas según su localización anatómica en intratendinosas, miotendinosas (MTJ) y miofasciales (MFJ) y el correspondiente tiempo de RTP.

Los resultados muestran que 1) no hay diferencias estadísticamente significativas en los valores de R y Xc en comparar los 4 grandes grupos musculares (cuádriceps, isquiotibiales, aductores y tríceps sural) de la extremidad inferior derecha e izquierda, y en varios momentos de una misma temporada, 2) hay una significativa reducción ($P < 0.01$) de R y Xc directamente relacionado con la severidad de la lesión muscular según el "gap" y el RTP, independientemente de su localización anatómica, 3) la L-BIA diferencia de manera significativa ($P < 0.01$) las lesiones MTJ de las lesiones MFJ, así como los diferentes grados de severidad de las MTJ y su RTP.

LLISTA DE FIGURES

Figura 1. Representació de l'activitat muscular dels diferents músculs de les extremitats inferiors en relació amb el cicle de la marxa, durant les etapes d'inici de contacte a terra (IC) i fi de contacte (TO). Font: Novacheck (1995). Pag 28

Figura 2. Exemples de codificacions de lesions directes i indirectes de la porció llarga del bíceps femoral. A nivell proximal, mig i distal del ventre muscular, a més del grau d'afectació i nombre corresponents de re-lesions. Font: Valle et al., 2016. Pag 33

Figura 3. Tall coronal d'una RMN amb una seqüència de supressió grassa tipus T2 fat.sat d'una lesió a la porció llarga d'un bíceps femoral. Pag 35

Figura 4. Localització estàndard dels elèctrodes injectors (I) i dels elèctrodes mesuradors de voltatge (V) per la mesura global de bioimpedància (whole-body). Adaptat de Nescolarde 2006, tesi doctoral (<https://www.tdx.cat/handle/10803/6340;jsessionid=4DBDAF0596FFEA4235D7A179F1034945#page=1>.) Pag 37

Figura 5. Exemple de disposició dels elèctrodes en la L-BIA en configuració longitudinal curta (A) llarga (B) i transversal (C). Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27). Pag 38

Figura 6. Penetració de la corrent segons configuració curta o llarga de la col·locació dels elèctrodes. Font: S. Grimnes and Ø.G. Martinsen/ "Bioimpedance & Bioelectricity. BASICS" 1st edition. 2000/ pp 134, capítol 5/Academic Press. Pag 51

Figura 7. Grup muscular corresponent als isquiotibials. Font: Balius et al., "Lesiones musculares en el deporte", 2013. Pag 52

Figura 8. Musculatura quadricipital Font: Balius et al., "Lesiones musculares en el deporte", 2013. Pag 52

Figura 9. Muscle fiber. Font: <https://www.earthslab.com/physiology/actions-skeletal-muscles/>. Pag 53

Figura 10. COVIDIEN elèctrodes. Ref. 31050522 (<https://www.4mdmedical.com/kendall-200-series-foam-electrodes.html>). Pag 53

Figura 11. Configuració longitudinal curta (5 cm) i configuració longitudinal llarga (10 cm). Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27). Pag 54

Figura 12. Configuració transversal (5cm) a la musculatura adductora. Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27). Pag 54

Figura 13. Analitzador BIA-101 Anniversary, AKERN-Florence, Italy (<https://www.akern.com/en/86-prodotti-eng/analizzatori-bia-eng/198-bia101-anniversary-en.html>). Pag 55

Figura 14. Diagrama de caixes descriptiu del numero de dies des del dia de la lesió fins al dia del retorn a la competició (RTP) agrupant lesions segons la gravetat de l'afectació muscular ("gap"). (Doi: 10.1088/1361-6579/aa7243). Pag 60

Figura 15. Grau 1. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat amb mínima àrea d'edema (fletxes) de la unió del miotendinosa sense presència radiològica de "gap". (Doi: 10.1088/1361-6579/aa7243). Pag 61

Figura 16. Grau 2f. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat sat amb un edema moderat en ploma (fletxes) que afecta la unió miotendinosa sense presència radiològica de “gap”. (Doi: 10.1088/1361-6579/aa7243). Pag 61

Figura 17. Grau 2g. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat amb un edema en ploma moderat o important de la unió miotendinosa, amb una imatge de “gap” clar (fletxes negres gruixudes) que mostra una pèrdua de la continuïtat i tensió tendinosa. (Doi: 10.1088/1361-6579/aa7243). Pag 62

Figura 18. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió tendinosa del septe intramuscular del recte anterior femoral (ruptura longitudinal del tendó amb lleu edema peritendinós). (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 62

Figura 19. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió de la unió miotendinosa MTJ proximal del recte anterior femoral (ruptura de teixit connectiu (fletxa) i fibres musculars desestructurades amb pèrdua de l’angle de penació de les fibres). (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 63

Figura 20. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió miofascial de la unió miotendinosa distal del recte anterior femoral (fletxa). (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 63

Figura 21. Mitjana i SD de la diferència del % en R, Xc i PA de 26 lesions MTJ (vermell) i 7 lesions MFJ (blau). També es presenten els resultats del One-Way ANOVA entre el % de diferència de les lesions MTJ respecte a les lesions MFJ. (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 66

Figura 22. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió de la MTJ distal grau 1 del recte anterior femoral. Mínima lesió miofascial (fletxa). (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 67

Figura 23. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió MTJ proximal grau 2 del septe central del múscul recte anterior femoral. Desdibuixament de les fibres musculars a la MTJ lateral del septe central, amb un petit hematoma (fletxa). Podem veure que es tracta d’un múscul sobrecarregat. (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 67

Figura 24. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió MTJ proximal grau 3 del septe central del múscul recte anterior femoral. La pèrdua de continuïtat del septe central (transversal i longitudinal), produeix una pèrdua de tensió tendinosa i un extens edema en ploma. (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124). Pag 68

Figura 25. Mitjana i SD de diferència de % en R, Xc i PA de lesions MTJ graus 1-3. També es presenten resultats de SE i resultats de la prova post-hoc. (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124) Pag 70

Figura 26. Funcions discriminants canòniques per a un % diferencia en R, Xc i PA, segons el grau de lesió MTJ, de grau 1 (n = 11), grau 2 (n = 8) i grau 3 (n = 7). (Doi: 10.3389/fphys.2020.574124) Pag 70

LLISTA DE TAULES

Taula 1. Classificació de lesions musculars segons criteris clínics, d'ecografia i ressonància magnètica. Font: Mueller-Wohlfahrt et al., 2013 . Pag 30

Taula 2. "British Athletics Muscle Injury Classification" [BAMIC,. Font: Pollock et al., 2014]. Pag 31

Taula 3. Classificació segons "The MLG-R muscle injury classification". Font: Valle et al., 2019. Pag 32

Taula 4. Mesures d'impedància bioelèctrica localitzades per al control (costat contra lateral no lesionat), costat lesionat i disminució percentual de la resistència (R), la reactància (Xc) i l'angle de fase (PA) corresponents a les lesions de grau 1, grau 2f i grau 2g. Pag 59

Taula 5. Comparació del percentatge de disminució de les mesures de L-BIA corresponents a les lesions musculars de grau 1, grau 2f i grau 2g. Pag 59

Taula 6. Resultats dels anàlisis post-hoc del nombre de dies de RTP per les lesions agrupades per presència de disrupció muscular ("gap"). Pag 60

Taula 7. Valors individuals de mesures de L-BIA 24 h després de la lesió [costat contralateral sa (1), costat lesionat (2) a R, Xc i PA], inclosos els tendinosos (n = 4), MTJ (n = 26) i MFJ (n = 7) lesions. Pag 64

Taula 8. Valors de les mesures de L-BIA 24 h després de lesions [costat contralateral sa (1), costat lesionat (2) i % de diferència en R, Xc i PA], i el resultat de mesures repetides del test ANOVA corresponent a lesió tendinosa , MTJ i MFJ. Pag 65

Taula 9. Valors de les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió [costat contra lateral sa (1), costat lesionat (2) i % de diferència en R, Xc i PA] corresponent al grau de lesions MTJ i el resultat de mesures repetides del test ANOVA per R, Xc i PA. Pag 68

Taula 10. RTP de les lesions de la unió mioconnectiva. Pag 71

ABREVIATURES

BAMIC - British Athletics Muscle Injury Classification

BIA - bioimpedància

CK - Creatina quinasa

CSA - Àrea secció transversal

EIAI - Espina ilíaca antero inferior

EIM - Miografia d'impedància elèctrica

FCB - Futbol Club Barcelona

L-BIA - Bioimpedància localitzada

LDH - Lactat deshidrogenasa

MB - Mioglobina

MTF - Unió miofascial

MTJ - Unió miotendinosa

PA - Angle de fase

R - Resistència

RMN - Ressonància magnètica nuclear

RTP - Tornada al joc / competició

Rx - Radiologia

SD – Desviació estàndard

SE - Error estàndard

T - Tendinosa

TAC - Tomografia axial computeritzada

TI - Tuberositat isquiàtica

US – Ultrasons / ecografia

Xc - Reactància

Z - Impedància

JUSTIFICACIÓ

Aquest estudi neix com a continuïtat de la 1era tesi doctoral (desenvolupada per el Dr. Xavier Yanguas del Servei Mèdic del Futbol Club Barcelona i defensada l'any 2015) per continuar validant la bioimpedància localitzada (L-BIA) com a un nou mètode de diagnòstic, de baix cost i no invasiu, per ajudar a les tècniques de diagnòstic clàssiques com els ultrasons (US) i la ressonància magnètica (RMN) en l'estudi de la lesió del teixit muscular.

Hem ampliat el treball realitzat sobre la lesió muscular, quantificant i discriminant el seu grau de severitat segons el "gap" muscular i la localització anatòmica; i trobant una relació entre el temps de tornada al joc (RTP) i els canvis 24 hores després de la lesió en els paràmetres de L-BIA.

INTRODUCCIÓ

1. INTRODUCCIÓ

1.1. La lesió muscular en el futbol

El futbol és un dels esports més populars del món, jugat per més de 300 milions de persones, tant a nivell professional com amateur.

Però el futbol, com d'altres molts esports, és un esport de contacte amb un elevat risc de lesions.

Les lesions musculars constitueixen gairebé un terç de les lesions patides en el futbol professional masculí, i al voltant del 90% d'aquestes lesions afecten als tres grans grups musculars de les extremitats inferiors: quàdriceps, isquiotibials i tríceps sural. (Garrett 1996, Ekstrand et al., 2011).

L'enorme quantitat de lesions que pateixen els jugadors han promogut durant les últimes dècades la creació de múltiples estudis amb l'objectiu de proporcionar una metodologia i tècniques actualitzades de recerca, diagnòstic i rehabilitació per reduir tant com sigui possible els casos de lesions i re-lesions.

Nescolarde et al., 2015, mitjançant BIA localitzada, van trobar que un canvi de reactància (X_c) anava directament relacionada amb la gravetat de lesions musculars.

El canvi més significatiu a les 24 hores després de la lesió, és la disminució important de X_c , que indica una interrupció del patró d'estructura normal dels teixits tous, que és directament proporcional a la gravetat de la lesió.

L'objectiu d'aquesta tesi doctoral és trobar un nou mètode per a l'avaluació i el seguiment de les lesions musculars fins a la curació i a la tornada al terreny de joc (RTP), en jugadors de futbol professional, mitjançant L-BIA.

Les mesures de L-BIA Tetra-polar localitzades a 50 kHz, en quàdriceps, isquiotibials, i adductors s'obtiniran abans i després de l'entrenament esportiu en jugadors de futbol professional masculins (mida total de la mostra) per obtenir els valors de referència, 24 hores després de la lesió i fins a la tornada al terreny de joc (RTP).

1.1.1. Lesions musculars mes freqüents al futbol

Tal com he comentat abans, aproximadament el 90% de les lesions musculars que passen en el futbol afecten als tres grans grups musculars de les extremitats inferiors: quàdriceps, isquiotibials i tríceps sural. (Garrett 1996, Ekstrand et al., 2011).

Les estadístiques actuals indiquen que un equip de futbol d'uns 25 jugadors a la plantilla, preveu aproximadament unes 50 lesions musculars per temporada, de les quals un 12% d'aquestes lesions es poden reproduir als pocs dies (re-injury), comportant aquestes un major temps de curació i retorn al joc que les no re-lesions (no re-injury) (Ekstrand et al., 2011a).

Aquestes lesions són causades per una disrupció traumàtica de les fibres musculars o per un sobreús de les mateixes, fet que provoca la baixa esportiva del jugador i que aquest no pugui participar plenament en els entrenaments o en els partits (Ekstrand et al., 2011a, Balius et al., 2009).

Inclouen lesions musculars per distracció de les miofibres properes a les unions miotendinoses o lesions musculars post contusions (un cop directe al múscul provoca lesions per compressió) (Saartok 1998, Järvinen et al., 2005).

I per tal de poder diagnosticar, entendre i curar bé aquestes lesions, i sobretot evitar que tornin a passar, és molt important conèixer com es produeixen.

1.1.2. Mecanismes de producció de la lesió muscular

Dos mecanismes són bàsicament els responsables de les lesions musculars en el futbol (i pràcticament en l'esport en general).

El **mecanisme directe** o per contusió directe sobre el múscul, que són freqüents en els esports de contacte (Crisco et al., 1994) per col·lisió contra un rival, company o objecte del joc. En general tenen millor pronòstic.

El **mecanisme indirecte**, o per estirament o sobretensió de les fibres musculars, amb forces que sobrepassen la capacitat tensional del múscul (fase excèntrica), que són les que passen més sovint en esports on intervé la velocitat i fatiga (Garret 1995). Aquestes són de pitjor pronòstic que les anteriors i per tant són les més estudiades en el nostre camp al tenir un temps de curació més elevat i més risc de recaiguda.

La localització més freqüent d'aquestes lesions per mecanisme indirecte és, en primer lloc, la musculatura isquiotibial, i després la musculatura quadricipital on bàsicament el múscul recte anterior és el més afectat.

Aquestes lesions són més freqüents que un altre grup muscular per ser d'estructura biarticulats (van de la pelvis a la tibia afectant 2 articulacions), per tenir un gran percentatge de fibres de contracció ràpida (Ashling et al., 2010, Heiderscheit et al., 2010, Noonan and garret 1999), i per ser molt demanades en esports on hi ha velocitat i fatiga com el futbol.

Per això parlem d'aquests 2 grups musculars més detalladament.

1.1.3. Musculatura isquiotibial

Els isquiotibials són els músculs que presenten una prevalença lesional més alta. Al voltant de 1/3 de les lesions de la musculatura isquiotibial té una recaiguda al primer any de l'alta mèdica, tot i els esforços en la recuperació i prevenció realitzada.

Tot i els programes preventius desenvolupats els darrers 30 anys, no s'ha objectivat una reducció de la incidència lesional ni en la taxa de reincidència. (Mendiguchia and Brughelli 2011, Mendiguchia et al., 2011).

En el futbol, atletisme de velocitat, rugbi o futbol australià, és una lesió habitual a causa de les contínues demandes de velocitat que es requereixen en aquests esports (Heiderscheit et al., 2010, Mendiguchia and Brughelli 2011).

En la dansa i el ballet també és una lesió freqüent, però la causa és el mecanisme de híper estirament a que s'otmet la musculatura amb violentes flexions del maluc (Askling et al., 2006; 2002).

Tal com hem dit, la lesió de la musculatura isquiotibial és una de les lesions musculars mes freqüents en la pràctica de l'esport, especialment en el món del futbol. Els darrers anys hi ha hagut un esforç combinat per part dels clubs esportius, personal mèdic i els equips de recerca amb l'objectiu de prevenir, curar i rehabilitar les lesions de la musculatura isquiotibial, però amb un resultat poc satisfactori.

La manca de resultats positius genera un debat constant per aconseguir una metodologia òptima de tornada a joc, ja que un terç dels jugadors lesionats a la musculatura isquiotibial pateixen una recaiguda durant el primer any després de l'alta (Tol et al., 2014).

Dos mecanismes lesionals han sigut identificats en les lesions de la musculatura isquiotibial en accions d'alta velocitat:

- El primer mecanisme té lloc durant la "swing phase" de la carrera. La musculatura isquiotibial es manté activa el 80% del temps durant la "stance phase" en la carrera, mentre que només es manté activa un 10% en caminar (Novacheck 1995; Hamner, Seth i Delp 2010). Durant la fase tardana de la "swing phase" al córrer i esprintar, la musculatura isquiotibial intenta desaccelerar les extremitats inferiors i preparar-se per recolzar-se a terra mitjançant mitjans de contracció excèntrica (Lin, Cardenas i Soslowsky 2003). Aquesta contracció excèntrica produeix un allargament de la musculatura isquiotibial, especialment el múscul del bíceps femoral, que és el que més es lesiona en comparació amb la resta de músculs isquiotibials (semitendinós i semimembranós).
- Durant la primera part de la "stance phase", la musculatura isquiotibial du a terme una contracció concèntrica per retardar el descens del cos i, mentrestant, aquesta contracció arriba al maluc per alçar el tronc i iniciar la fase de propulsió. Durant aquesta etapa, el bíceps femoral és el múscul que realitza la contracció més potent ja que inicia el moviment des d'una posició inicial amb un allargament més gran que la resta de la musculatura isquiotibial (Orchard et al., 2012).

Com es mostra a la Figura 1, la musculatura isquiotibial presenta dos pics d'activitat que coincideixen amb les dues etapes descrites anteriorment, abans, durant i després de la fase de contacte al terra (IC). Hi ha una falta d'activació muscular en el moment d'aixecar el peu del terra (TO).

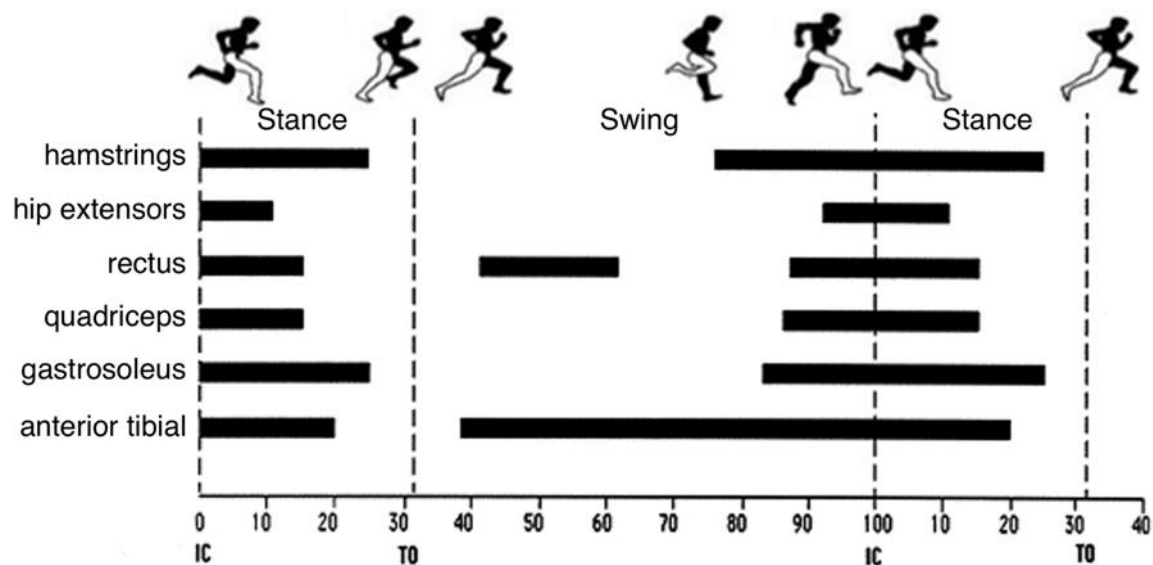


Figura 1. Representació de l'activitat muscular dels diferents músculs de les extremitats inferiors en relació amb el cicle de la marxa, durant les etapes d'inici de contacte al terra (IC) i fi de contacte (TO). Font: Novacheck (1995).

1.1.4. Musculatura quadricipital

Dins de la musculatura quadricipital, el recte anterior és el múscul que més es lesiona després dels músculs de la regió isquiotibial. Sobretot en esports com el futbol o el rugbi on el xut és la principal acció de joc (Bordalo-Rodrigues and Rosenberg 2005).

En l'acció del xut, inicialment el quàdriceps es troba en una posició de màxim allargament, ja que el maluc està en extensió complerta i el genoll en flexió. La lesió es produeix quan el múscul produeix una contracció concèntrica per executar el xut, en el moment en que està en màxim estirament. La majoria de lesions són causades per aquesta acció i es produeix a la unió miotendinosa del tendó indirecte del recte anterior (Hasselmann et al., 1995). La lesió en el tendó indirecte provoca un trencament (desguantament o degloving) intramuscular, fent que el múscul pateixi un tipus de lesió en la qual la part intramuscular bipennada interna del complex miotendinos és separada de la porció unipennada externa del múscul. Això pot provocar una retracció del ventre muscular intern (Ara Kassarian, Rodrigo i Santisteban 2014).

Però també, encara que amb menys freqüència, el múscul recte anterior del quàdriceps es pot veure afectat per, lesió miotendinosa de tendó directe, lesió tendinosa distal i lesió miofascial (A. Kassarian, Rodrigo i Santisteban 2012).

1.2. Factors de risc a la lesió muscular

A la literatura científica s'han descrit en els darrers anys molts factors de risc per a la lesió muscular, però dintre de tots aquests factors de risc, s'ha demostrat que el més significatiu és haver patit recentment una lesió prèvia dins del mateix grup muscular (Ochard et al., 2001), i especialment per les lesions de la musculatura isquiotibial (Engebretsen et al., 2010).

En general, els estudis parlen de factors intrínsecs i extrínsecs (Arnason et al., 2004; Liu et al., 2012).

Els factors intrínsecs són els relacionats amb el propi esportista: la seva edat, estat físic i psicològic, lesions musculars prèvies, falta de força, dèficit de flexibilitat, fatiga muscular, alteració del rati de força entre la musculatura isquiotibial i quadricipital (flexors i extensors), factors biomecànics, etc...

Els factors extrínsecs estan relacionats amb el esport en si. El tipus d'entrenament, manca d'escalfament, l'estat del terreny de joc, la sobrecarrega de partits, la manca de descans, la mala alimentació o hidratació, etc..

1.3. Classificació de la lesió muscular

Hi ha moltes classificacions descrites de les lesions musculars, depenent de la gravetat, criteris clínics o radiològics.

Nosaltres les separem segons el mecanisme de lesió.

1.3.1. Mecanisme directe

Les lesions produïdes per mecanisme directe (per contusió directe sobre el múscul) es classifiquen d'una manera més senzilla segons el grau d'impotència funcional que comporten.

Per exemple, en les lesions per mecanisme directe a la musculatura quadricipital (molt freqüents) les classifiquem en 3 graus de gravetat segons el grau d'impotència funcional que generen al genoll. Les de grau 1 o lleus provoquen una limitació de la flexió del genoll a partir de 90º, les de grau 2 o moderades limiten la flexió del genoll entre 45 i 90º i les de grau 3 o greus limiten la flexió del genoll a partir de 45º (Balius 2005).

1.3.2. Mecanisme indirecte

Les lesions per mecanisme lesional indirecte (per estirament o sobretensió de les fibres musculars) són les més estudiades i les que tenen més classificacions en la literatura.

Històricament s'han classificat segons criteri de severitat (graus de menys a més afectació); i segons criteris radiològics per ecografia (US) (Peetrons 2002, Takebayashi et al., 1995) i per ressonància magnètica (Stoller 2007).

Recentment s'estan proposant nous models de classificació, que ajunten els criteris de gravetat, amb la localització de la lesió i el teixit afectat.

La cronografia d'aquestes classificacions són les següents:

- O-Donoghue (1962) va descriure un sistema de classificació basat en signes clínics en funció de la gravetat, relacionant la quantitat de teixit danyat i el grau de la seva pèrdua funcional. Classifica les lesions musculars en tres graus.
 - Grau I: Sense lesió de teixit apreciable ni pèrdua de funció ni de força. Resposta inflamatòria baixa.
 - Grau II: Afectació del teixit amb més o menys grau, amb afectació de la força i funció múscul-tendinosa.
 - Grau III: Lesió completa de la unitat múscul-tendinosa amb pèrdua completa de la seva funció.

- Ryan (1969) va publicar una classificació de les lesions del quàdriceps que després va estendre als altres músculs. Seguint els criteris de O'Donoghue, va afegir la implicació de les fàscies en la lesió com a factor determinant.
 - Grau 1: Sense lesió de teixit apreciable ni pèrdua de funció ni de força amb la fàscia intacta.
 - Grau 2: Afectació del teixit de menys grau, amb afectació de la força i funció però amb la fàscia encara intacta.
 - Grau 3: Afectació del teixit de més grau amb una afectació parcial de la fàscia.
 - Grau 4: Afectació completa de la unitat múscul-tendinosa i de la fàscia.
- Takebayashi (1995) va introduir un mètode basat en ultrasons, complementat per Peetrans el 2002.
- Stoller (2007) va publicar una classificació basada en RMN, que va ser àmpliament acceptada i utilitzada durant 7 anys. Va definir quatre graus de lesió:
 - Grau 0: Sense cap evidència radiològica de lesió.
 - Grau 1: Edema muscular però sense danys tissular.
 - Grau 2: Lesió múscul-tendinosa parcial.
 - Grau 3: Lesió múscul-tendinosa completa.

Taula 1. Classificació de lesions musculars segons criteris clínics, d'ecografia i ressonància magnètica. Font: Mueller-Wohlfahrt et al., 2013.

	O'Donoghue 1962	Ryan 1969 (initially for quàdriceps)	Takebayashi 1995, Peetrans 2002 (Ultrasound-based)	Stoller 2007 (RMN-based)
Grade I	No appreciable tissue tearing, no loss of function or strength, only a low-grade inflammatory response.	Tear of a few muscle fibers, fascia remaining intact.	No abnormalities or diffuse bleeding with/without focal fiber rupture less than 5% of the muscle involved.	RMN-negative=0% structural damage. Hyperintense edema with or without hemorrhage.
Grade II	Tissue damage, strength of the musculotendinous unit reduced, some residual function.	Tear of a moderate number of fibers, fascia remaining intact.	Partial rupture: focal fiber rupture more than 5% of the muscle involved with/without fascial injury.	RMN-positive with tearing up to 50% of the muscle fibers. Possible hyperintense focal defect and partial retraction of muscle fibers.
Grade III	Complete tear of musculotendinous unit, complete loss of function.	Tear of many fibers with partial tearing of the fascia.	Complete muscle rupture with retraction, fascial injury.	Muscle rupture=100% structural damage. Complete tearing with or without muscle retraction.
Grade IV	X	Complete tear of the muscle and fascia of the muscle-tendon unit.	X	X

- Chan et al., (2012) classifica les lesions musculars segons la localització anatòmica de la lesió. Les diferencia segons la localització (unió miotendinosa proximal, intramusculars, i unió miotendinosa distal) i segons el teixit afectat (muscular, miofascial i miotendinosa).

- Müller-Wohlfahrt et al ., (2013) subclassifica les lesions en 2 grups. Les funcionals on no es visualitza lesió tissular en les proves d'imatge (lesions per fatiga, DOMS, etc) i les estructurals, on per proves d'imatge es veu que hi ha alteració del teixit muscular, que divideix en funció del dany en, lleus, moderades o severes.
- Pollock et al ., (2014) les classifica utilitzant la localització i la gravetat de la lesió d'acord a la "British Athletics Muscle Injury Classification" (BAMIC, Taula 2). En aquest cas, valora 4 graus de lesió que va des de el grau 1 sense evidència radiològica de lesió fins al grau 4 que objectiva lesió complerta del teixit; però també utilitza la localització del teixit lesionat, anomenant "a" a les lesions localitzades al teixit miofascial del múscul, "b" a les lesions localitzades a nivell de la unió miotendinosa, i "c" a les lesions tendinoses pures.

Taula 2. "British Athletics Muscle Injury Classification" [BAMIC,. Font: Pollock et al., 2014].

Grade	Description	RMN (day 2)
0a	Focal area of muscle pain usually following exercise	RMN normal
0b	Generalized muscle pain following unaccustomed exercise	RMN normal or patchy high signal change throughout one or more muscles
Grade	Description	RMN
1a	Small myofascial tear	High signal change evident at the fascial border with less than 10% extension into muscle belly Craniocaudal distance of <5 cm
1b	Small muscle-tendon junction tear	High signal change of less than 10% cross-sectional area of muscle at the muscle-tendon junction High signal change of craniocaudal length <5 cm (may note fiber disruption of <1 cm)
Grade	Description	RMN
2a	Moderate myofascial tear	High signal change evident at fascial border with extension into the muscle High signal change cross-sectional area of between 10% and 50% at maximal site High signal change of craniocaudal length >5 and <15 cm Architectural fiber disruption usually noted over less than 5 cm
2b	Moderate muscle-tendon junction tear	High signal change evident at the muscle-tendon junction High signal change cross-sectional area of between 10% and 50% at maximal site High signal change of craniocaudal length >5 and <15 cm Architectural fiber disruption usually noted over less than 5 cm
2c	Moderate sized intratendinous tear	High signal change extends into the tendon with longitudinal length of tendon involvement <5 cm Cross-sectional area of tendon involvement <50% of maximal tendon cross-sectional area No loss of tension or discontinuity within the tendon
Grade	Description	RMN
3a	Extensive myofascial tear	High signal change evident at fascial border with extension into the muscle High signal change cross-sectional area of greater than 50% at maximal site

		High signal change of craniocaudal length of greater than 15 cm Architectural fiber disruption usually noted over more than 5 cm
3b	Extensive muscle-tendon junction tear	High signal change cross-sectional area of greater than 50% at maximal site High signal change of craniocaudal length of greater than 15 cm Architectural fiber disruption usually noted over more than 5 cm
3c	Extensive intratendinous tear	High signal change extends into the tendon Longitudinal length of tendon involvement >5 cm Cross-sectional area of tendon involvement >50% of maximal tendon cross-sectional area There may be loss of tendon tension although no discontinuity is evident
Grade	Description	RMN
4	Full thickness tear of muscle	Complete discontinuity of the muscle with retraction
4c	Full thickness tear of tendon	Complete discontinuity of the tendon with retraction

- Valle et al ., (2016) han descrit un nou sistema de classificació que pretén entendre millor el tipus i localització de la lesió, i millorar la comunicació entre professionals mèdics que la tracten. Taula 3. Figura 2.

El sistema de classificació es basa en un sistema de quatre lletres: MLG-R, referit al mecanisme de lesió (M) (T: directe, I: indirecte), ubicació de la lesió (L) (P: proximal, M: mitjà i D: distal), classificació de la gravetat (G) i nombre de recidives de lesions musculars (R), respectivament.

Aquest mètode ha estat validat per 3 grans institucions mèdic esportives com són el servei mèdic del Futbol Club Barcelona, Aspetar i el Duke Sports Science Institute.

Taula 3. Classificació segons “The MLG-R muscle injury classification”. Font: Valle et al., 2019.

Mechanism of injury (M)	Location of injury (L)	Grading of severity (G)	No. of muscle re-injuries (R)
Hamstring direct injuries (T)	P: Injury located in the proximal third of the muscle belly. M: Injury located in the middle third of the muscle belly. D: Injury located in the distal third of the muscle belly.	0-3	0: 1 st episode 1: 1 st re-injury 2: 2 nd re-injury
Hamstring indirect injuries (I) (Plus, sub-index s for stretching type, or sub-index p for sprinting type)	P: Injury located in the proximal third of the muscle belly. The second letter is a sub-index p or d to describe the injury relation with the proximal or distal MTJ, respectively. M: Injury located in the middle third of the muscle belly, plus the corresponding sub-index. D: Injury located in the distal third of the muscle belly, plus the corresponding sub-index.	0-3	0: 1 st episode 1: 1 st re-injury 2: 2 nd re-injury
Negative RMN injuries (location is pain related) N plus sub-index s for indirect injuries stretching type, or sub-index p for sprinting type	N p Proximal third injury N m Middle third injury N d Distal third injury	0-3	0: 1 st episode 1: 1 st re-injury 2: 2 nd re-injury

Grading of injury severity:	
0	When codifying indirect injuries with clinical suspicion but negative RMN, a grade 0 injury is codified. In these cases, the second letter describes the pain locations in the muscle belly.
1	Hyperintense muscle fiber edema without intramuscular hemorrhage or architectural distortion (fiber architecture and pennation angle preserved). Edema pattern: interstitial hyperintensity with feathery distribution on FSPD (fast saturated proton density) or T2 FSE (fast spin echo) + STIR (short tau inversion recovery) images.
2	Hyperintense muscle fiber and/or peritendon edema with minor muscle fiber architectural distortion (fiber blurring and/or pennation angle distortion) ± minor intermuscular hemorrhage, but no quantifiable gap between fibers. Edema pattern, same as for grade 1.
3	Any quantifiable gap between fibers in craniocaudal or axial planes. Hyperintense focal defect with partial retraction of muscle fibers ± intermuscular hemorrhage. The gap between fibers at the injury's maximal area in an axial plane of the affected muscle belly should be documented. The exact % cross sectional area should be documented as a sub-index to the grade.
r	When codifying an intra-tendon injury or an injury affecting the MTJ or intramuscular tendon showing disruption/retraction or loss of tension exist (gap), a superscript (r) should be added to the grade.

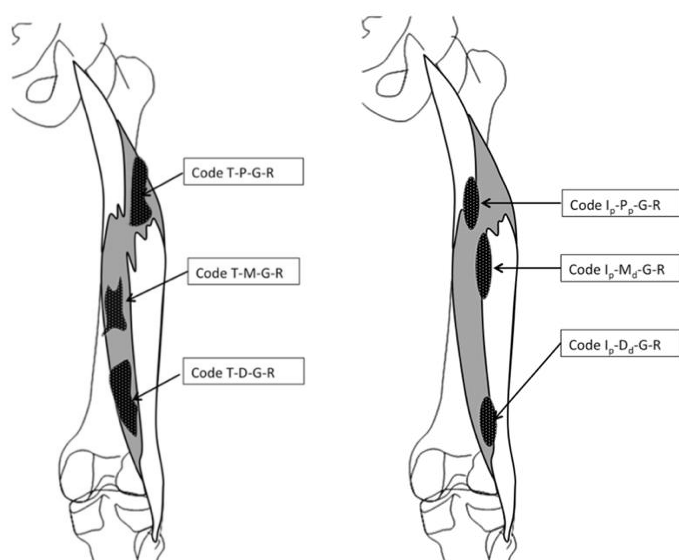


Figura 2. Exemples de codificacions de lesions directes i indirectes de la porció llarga del bíceps femoral. A nivell proximal, mig i distal del ventre muscular, a més del grau d'afectació i nombre corresponents de re-lesions. Font: Valle et al., 2019.

1.4. Diagnòstic i seguiment de la lesió muscular

Davant de qualsevol lesió muscular, tres actuacions són fonamentals per al correcte diagnòstic. L'anamnesi, l'exploració física i les exploracions complementaries en aquest ordre cronològic.

L'**anamnesi** exhaustiva del lesionat és fonamental davant de qualsevol lesió, però és especialment important en la lesió muscular, ja que ens donarà a conèixer el mecanisme lesional (com s'ha produït la lesió). Saber si el jugador ha rebut una contusió directa, ha patit un estirament forçat del múscul, una punxada per sobreesforç al fer un esprint o xut, si hi havia fatiga o una lesió prèvia, etc., tot això ajuda a orientar inicialment cap al tipus i localització de la lesió.

L'exploració física metòdica, amb palpació del lloc de la lesió per saber si hi ha una solució de continuïtat o un enduriment del múscul, les maniobres d'estirament i contracció del grup muscular afectat o una alteració de la força (que es pot comparar amb el costat contra lateral) ajudaran també a orientar el tipus de lesió i també ens orientaran sobre la gravetat de la lesió (Yanguas Leyes 2014).

Les **exploracions complementaries**, basades bàsicament en proves d'imatge com la ecografia (US) i la ressonància magnètica (RMN) ens ajudaran no només en el diagnòstic més acurat de la lesió, sinó que també ens ajudaran a confirmar la gravetat de la lesió, pronosticar el temps de baixa mèdica i monitoritzar el procés de curació (Corazza et al., 2013).

Hi ha estudis que determinen que el 87% de les lesions musculars en futbolistes europeus d'elit s'examinen mitjançant ressonància magnètica o ecografia múscul-esquelètica (Jan Ekstrand, Lee i Healy 2016).

Aquests estudis han correlacionat les mesures de la imatge de la lesió (afectació longitudinal i transversal) amb el període de baixa esportiva i el risc de recaiguda (Koulouris et al., 2007, Slavotinek et al., 2002, Verrall et al., 2006).

1.4.1. Ecografia múscul-esquelètica

L'ecografia múscul-esquelètica es una prova senzilla, no invasiva i de baix cost, però per contra és molt tècnic depenent i necessita una gran corba d'aprenentatge. És molt utilitzada en el diagnòstic inicial i seguiment de les lesions musculars.

Actualment s'utilitzen ecògrafs amb transductors lineals d'alta freqüència (8-18 MHz) fixes o portàtils, poden realitzar estudis d'imatge amb talls longitudinals o transversals, estudis dinàmics (Balius et al., 2009, De Marchi et al., 2005) i fusionar-se conjuntament amb imatge de RMN.

1.4.2. Ressonància magnètica nuclear

La ressonància magnètica (RMN) és una prova d'imatge no invasiva però de major cost que la ecografia múscul-esquelètica. Ofereix imatges tridimensionals de les estructures anatòmiques del cos humà amb una definició més òptima d'una possible lesió o anomalia estructural.

És una tècnica d'imatge que proporciona un contrast molt més gran entre els teixits tous del cos humà, essent especialment útil en l'estudi de l'aparell múscul-esquelètic.

A diferència de la Tomografia Computeritzada (TAC) i de la radiologia convencional (Rx), la RMN no utilitza radiació ionitzant. Utilitza un potent camp magnètic amb l'objectiu principal de l'excitació i detecció dels canvis de direcció de l'eix de rotació dels protons que es troben dins de l'aigua del teixit corporal. Després, un anàlisi de dades informàtiques donen una informació detallada de la composició dels diferents teixits corporals.

La RMN és per tant una eina molt útil per al diagnòstic i seguiment d'una lesió muscular, per monitoritzar el període de rehabilitació i pronosticar el dia de l'alta esportiva (RTP). (Koulouris et al., 2007, Verrall et al., 2006; Slavotinek, Verrall i Fon 2002).

Es realitzen imatges tridimensionals del teixit, amb talls axials, coronals i sagitals, i per l'estudi específic de la lesió muscular són útils seqüències de supressió grassa tipus T2 fat.sat i STIR (de Marchi et al., 2005) i el moment òptim per al diagnòstic de la lesió és a les 24-48 hores (Ekstrand et al., 2012).

Els darrers anys s'han desenvolupat noves tècniques de RMN com el Tensor de Difusió, que mitjançant la fracció anisotròpica i el coeficient aparent de difusió de les molècules d'aigua, reflexa alteracions dels teixits, fins i tot alteracions tant petites que no són detectades amb una RMN convencional (Cermak et al., 2012, Zaraiskaya et al., 2006).

A tall d'exemple, la Figura 3 mostra un tall coronal d'una RMN amb una seqüència de supressió grassa tipus T2 fat.sat de la porció llarga del bíceps femoral d'un atleta on es pot observar una ruptura (fletxa) a la unió múscul-tendinosa proximal.

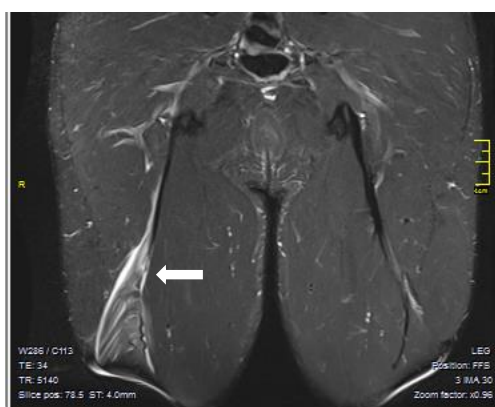


Figura 3. Tall coronal d'una RMN amb una seqüència de supressió grassa tipus T2 fat.sat d'una lesió a la porció llarga d'un bíceps femoral.

1.4.3. Altres exploracions complementaries

Hi ha altres exploracions complementaries utilitzades per al diagnòstic de lesions musculars, però nosóntant populars ni utilitzades com les proves d'imatge abans descrites.

Hi ha **test de laboratori** que poden ajudar a diagnosticar una lesió muscular. Un biomarcador específic detecta la presència de miosina (proteïna motora coneguda per el seu paper en la contracció muscular) a la sang, 48 hores després de la lesió. Altres biomarcadors també utilitzats són: la creatina quinasa (CK), lactat deshidrogenasa (LDH), mioglobina (MB), àcid úric, troponina I i alfa-actina en sèrum (Martínez-Amat et al., 2005; Guerrero et al., 2008; Šimunic et al., 2011).

Hi ha altres exploracions menys utilitzades que també poden ajudar a diagnosticar i monitoritzar al seguiment d'una lesió muscular. Aquestes són els test isocinètics, la miotonometria i la tensiomiografia.

Un **test isocinètic** quantifica la força muscular a diferents velocitats i angles de flexió, de tal manera que dona a conèixer diferències significatives de força entre una musculatura lesionada i la contra lateral, i també calcula el rati entre el grup muscular lesionat i el seu antagonista sa. Aquest rati també ens pot ajudar a predir una possible lesió muscular al trobar diferències significatives (superiors a un 10%) entre una musculatura agonista i antagonista. Per exemple, el rati entre la musculatura isquiotibial i la quadricipital (rati I/Q) es considera que ha de estar

entre el 60-80% (Croisier et al., 2008, Pincivero et al., 1997). Un augment d'aquest rati ens pot indicar risc de lesió muscular.

La **miotometria** valora el moviment del múscul a l'aplicar-hi un estímul elèctric en repòs. La freqüència d'esmoreïment de les oscil·lacions mecàniques, la seva reducció i la rigidesa del teixit muscular examinat són alguns paràmetres estudiats al fer la prova (Ditroilo et al., 2011; Bizzini i Mannion 2003; Gavronski et al., 2007).

La **tensiomiografia** és un mètode d'exploració molt poc invasiu, que mesura les propietats contràctils dels músculs esquelètics mes superficials. Es mesura, en condicions isomètriques, la deformitat radial del múscul quan és activat per un estímul elèctric controlat, i proporciona informació sobre les característiques mecàniques i la seva capacitat contràctil. Calcula la magnitud del desplaçament radial o deformació del ventre muscular, temps de resposta o latència, temps de contracció, i temps de relaxació. Tots aquests valors proporcionen informació sobre l'estat d'un múscul durant el seu procés de curació, o també donen informació de l'evolució del múscul durant l'entrenament (García-Manso 2010; Dias et al., 2010).

1.5. Bioimpedància global i localitzada (L-BIA)

1.5.1. Conceptes bàsics

La bioimpedància (BIA) és la capacitat dels teixits a presentar una resistència al pas d'una corrent elèctrica alterna a través d'ells. Els teixits biològics es comporten com a conductors de la corrent elèctrica i com a condensadors depenent de la seva composició. El líquid intra i extracel·lular dels teixits tou són òptims conductors de la corrent elèctrica. El teixit ossi és molt mal conductor (es comporta com aïllant) i el teixit adipós és un conductor regular, ja que la corrent travessa correctament el líquid intersticial i adipòcits però no les gotes lipídiques que són hidrofòbiques i no condueixen la corrent (Lukaski 1996, Piccoli i Nescolarde 2002). Per tant la BIA és una bona tècnica per avaluar els teixits tous de la massa magra (múscul).

El tronc i extremitats del cos humà, es consideren com a conductors de forma cilíndrica, ja que la longitud és fàcilment mesurable però l'àrea transversal és més difícil de mesurar. La impedància (Z, en Ohm) en un conductor cilíndric és proporcional a la longitud i inversament proporcional a la secció transversal (Llei d'Ohm). El càlcul sobre els volums de fluids i els comportaments derivats de la BIA convencional es basen en la proporcionalitat entre Z i les dimensions d'un conductor cilíndric, L i A (Piccoli A i Nescolarde L 2002).

La bioimpedància elèctrica no invasiva monofreqüència s'associa amb la injecció de corrent sinusoïdal de baixa intensitat a 50 kHz en un conductor biològic que dona com a resultat valors de mesurament de resistència (R), associats amb l'estat d'hidratació dels teixits tous, i reactància (X_c) associat amb la integritat de les estructures de teixits tous (Lukaski 1996; Lukaski i Piccoli 2012, Lukaski 2013). La corrent es retarda per la corrent que flueix a través de les membranes cel·lulars (element capacitiu, C) i la $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ és una mesura indirecta de la quantitat de corrent aplicada que penetra en les membranes cel·lulars (Lukaski et al., 2019). En termes biofísics, la bioimpedància és un nombre complex $Z = R - jX_c$, on el mòdul, Z s'obté mitjançant l'expressió

$\sqrt{(R)^2 + (Xc)^2}$ i l'angle de fase (PA) és una expressió trigonomètica que relaciona la part imaginària (Xc) amb la part real (R) mitjançant l'expressió $\tan^{-1}(Xc/R)$.

Hi ha quatre alternatives de posició dels elèctrodes en el cos humà: BIA distal (tambè coneguda com "global", "right-side" o "whole-bpdy"), BIA localitzada (Figura 5), BIA segmentària i BIA proximal (Piccoli i Nescolarde 2002; Nescolarde et al., 2013). La BIA distal (Figura 4) mesura el costat dret, utilitza l'alçada del cos com a longitud, i es correlaciona amb la distància de la mà al peu (Lukaski, 1996).

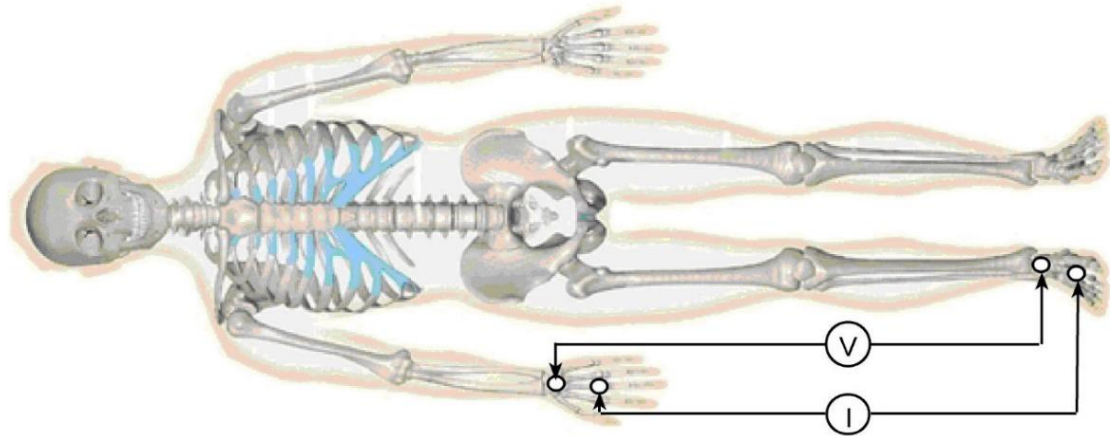


Figura 4. Localització dels elèctrodes injectors (I) i dels elèctrodes mesuradors de voltatge (V) per la mesura de bioimpedància global (whole-body). Adaptat de Nescolarde 2006, tesi doctoral (<https://www.tdx.cat/handle/10803/6340;jsessionid=4DBDAF0596FFEA4235D7A179F1034945#page=1.>)

1.5.2. Bioimpedància localitzada (L-BIA)

Parlem de L-BIA quan tant els elèctrodes d'injecció (I) com els de detecció (V) es col·loquen sobre una àrea específica del cos humà. Una de les primeres aplicacions clíniques d'L-BIA no invasiu a 50 kHz està relacionada amb la miografia d'impedància elèctrica (EIM) en malalties neuromusculars que va demostrar valors significativament reduïts de R, Xc i PA a causa de l'atròfia de fibres musculars, acumulació de teixit connectiu, infiltració grassa i edema (Rutkove et al., 2008; Rutkove 2009). Lukaski i Moore (2012), utilitzant L-BIA amb analitzador BIA sensible a la fase a 50 kHz, van identificar a les ferides de la part inferior de la cama, una disminució moderada de R, Xc i PA de forma aguda després d'eliminar el teixit danyat d'una ferida. En particular, la disminució es va produir durant la infecció i els valors de R, Xc i PA es van restaurar després de la curació. Per tant, L-BIA podria proporcionar un mètode segur i eficaç per detectar canvis a nivell cel·lular.

En futbolistes professionals (Nescolarde et al., 2013; 2015), les mesures de L-BIA utilitzant un analitzador BIA sensible a la fase de 50 kHz estan en concordança amb la gravetat de la lesió

muscular, diagnosticada per ressonància magnètica 24 h després de la lesió, segons el "gap" muscular i independentment de la ubicació anatòmica. Les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió van mostrar una reducció significativa de R, Xc i PA directament relacionada amb la gravetat de les lesions musculars, sent més notable en Xc que en R. A més, les lesions més greus van mostrar una major diferència percentual en Xc (% de diferència) (Nescolarde et al., 2013; 2015). La recuperació de la lesió en el moment del RTP es relaciona amb un reajustament del paràmetre Xc proper al valor del costat contra lateral no lesionat amb un % de diferència menor al 15% en aquelles lesions musculars d'alt grau de severitat segons el "gap" muscular (Nescolarde et al., 2013).

Els elèctrodes es col·loquen en uns punts anatòmics localitzats a una distància determinada (mesurada amb una cinta antropomètrica) proximal i distal al centre de la lesió, que es localitza prèviament per ecografia (Nescolarde et al., 2015).

A les lesions de músculs superficials, es van posar 2 elèctrodes mesuradors de voltatge (V) a 5 cm proximal i a 5 cm distal del centre de la lesió (localitzat per ecografia múscul-esquelètica) i 2 elèctrodes injectors de corrent (I) junts als anteriors, de tal manera que la distància entre els elèctrodes proximals i distals es manté sempre constant per cada mesura (10 cm) que anomenem configuració longitudinal curta (Figura 5A). En les mesures de músculs anatòmicament més profunds (per exemple en el cas del múscul vast intermig del quàdriceps) la distància entre el punt de la lesió i els elèctrodes proximals i distals es va augmentar a 10cm del centre de la lesió, amb una distància total entre injectors de 20 cm, que anomenem configuració longitudinal llarga (Figura 5B). En les mesures de lesions properes a una articulació, on no és possible efectuar una mesura longitudinal, es realitza una mesura transversal a la disposició longitudinal de l'extremitat, de medial a lateral, mantenint la distància de 5cm entre els elèctrodes i el punt de lesió muscular, configuració que anomenem configuració transversal (Figura 5C).

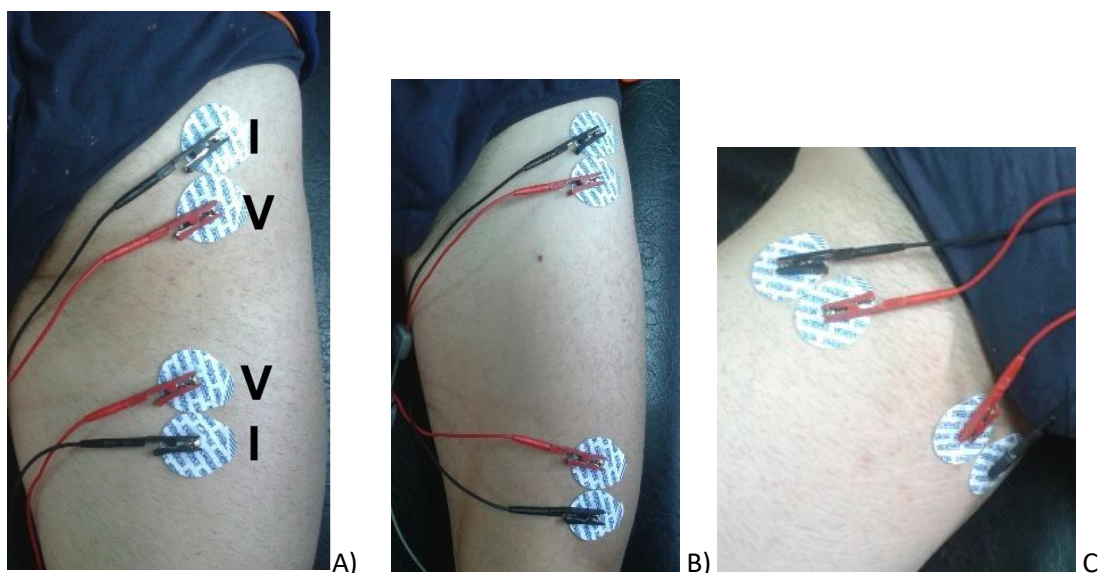


Figura 5. Exemple de de disposició dels elèctrodes en la L-BIA en configuració longitudinal curta (A) llarga (B) i transversal (C). Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27).

HIPÒTESIS

2. HIPÒTESIS

El mètode de L-BIA pot quantificar i diferenciar el grau de severitat de la lesió segons el "gap" muscular i la localització anatòmica. El tant per cent de canvi de Xc a les 24 hores després de la lesió, serà el paràmetre de L-BIA que millor discriminarà la severitat de la lesió segons el "gap" muscular i la seva localització anatòmica.

Això és possible perquè a 50 kHz, en mesures L-BIA, el paràmetre Xc està relacionat amb el dany de membrana cel·lular i R amb l'edema extracel·lular.

OBJECTIUS

3. OBJECTIUS

3.1. Objectiu general

Diferenciar per L-BIA la lesió muscular d'acord amb el grau de severitat i de la localització anatòmica; atenent a localització tendinosa, miofascial i miotendinosa de jugadors professionals de futbol.

3.2. Objectius específics

1. Caracteritzar la mostra de jugadors a l'inici i al final de la temporada.
2. Quantificar simetria bilateral entre els 4 grans grups musculars no lesionats en jugadors de futbol sala.
3. Quantificar per L-BIA la lesió muscular d'acord amb el grau de severitat ("gap" muscular).
4. Quantificar per L-BIA la lesió muscular segons la localització anatòmica atenent a lesió tendinosa, miofascial i miotendinosa.
5. Relacionar el tant per cent de canvi de Xc a les 24 h de la lesió amb el temps (dies) de tornada a la competició (RTP).

MATERIALS I MÈTODES

4. MATERIALS I MÈTODES

4.1 Mostra analitzada

Les mostres utilitzades per a aquest estudi corresponen a:

1. Mesures de L-BIA realitzades als jugadors del 2on equip de futbol professional del Futbol Club Barcelona després de patir una lesió muscular, des de la temporada 2011-2012 fins a la temporada 2013-2014, efectuades per el Dr. Javier Yanguas Leyes per realitzar la seva Tesi Doctoral. (21 mostres)
2. Mesures de L-BIA realitzades als 15 jugadors del 1er equip de futbol sala professional del Futbol Club Barcelona, per estudi de control, sense cap lesió muscular, les temporades 2015-2016, realitzant 2 mesures anuals, a principi i a final de la temporada. (15 mostres)
3. Mesures de L-BIA realitzades als jugadors del 2on equip de futbol i 1er equip de futbol sala professionals del Futbol Club Barcelona després de patir una lesió muscular i durant el seu seguiment fins la seva curació, des de la temporada 2015-2016 fins a la temporada 2018-2019. (17 mostres)

El Comitè Ètic del Futbol Club Barcelona va aprovar l'estudi, i cada jugador, voluntàriament va acordar proporcionar un consentiment informat verbal abans de participar en cap estudi.

4.2 Diagnòstic per la imatge.

Dos sistemes de diagnòstic per la imatge s'han utilitzat per realitzar aquests estudis. La ressonància magnètica (RMN) i la ecografia (US) múscul-esquelètica.

4.2.1 Ressonància magnètica (RMN)

La RMN és l'exploració "gold standard" per avaluar les lesions musculars, per la qual cosa va ser la tècnica escollida per al diagnòstic de les lesions múscul-tendinoses descrites. Proporciona informació sobre la localització anatòmica, l'àrea de secció transversal i l'abast de la ruptura (Cohen et al., 2011, Lee et al., 2012). És capaç d'identificar si la lesió és a nivell de la inserció òssia proximal, la unió miotendinosa proximal, el ventre muscular, unió miotendinosa distal i la inserció òssia distal (Ahmad et al., 2013) i no és una tècnica explorador-depenent com si que ho és l'ecografia múscul-esquelètica (Schneider-Kolsky et al., 2006).

Es va utilitzar una màquina de RMN de 3.0T, inicialment una Magnetom VERIO, Siemens Medical Solutions, versió VB 17 de la Clínica Creu Blanca de Barcelona i posteriorment una Toshiba 3.0T Canon Vantage Titan (Canon Medical Systems, Japan) del Centre Mèdic del Futbol Club Barcelona a Sant Joan Despí.

En les seqüències STIR o de supressió grassa en T2 (seqüències sensibles a la presència de fluid), les lesions musculars apareixen hiperintenses, a causa de l'edema intramuscular o per la acumulació de sang als extrems de la ruptura muscular.

De cara a millorar la qualitat de les imatges i homogeneïtzar la senyal dels teixits, es van utilitzar paquets externs de grassa (fat pads).

4.2.2. Ecografia (US)

Per localitzar el centre exacte de la lesió i per tal de poder col·locar correctament els elèctrodes per la mesura de L-BIA, es va utilitzar inicialment un ecògraf GE LOGIQ e (GE Healthcare; Milwaukee, WI EUA) i posteriorment un ecògraf Toshiba Aplio i800 (Canon Medical Systems, Japan). Es valoraven les imatges tant en eix longitudinal com transversal del lloc de la lesió muscular.

4.3 Classificació de la lesió muscular segons BAMIC

Per aquest estudi es van analitzar de manera prospectiva 37 lesions musculars de 32 jugadors de futbol professional masculí, ($23.5 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2}$; $1.8 \pm 0.1 \text{ m}$; 20-30 anys) entre les temporades 2016-17 i 2017-18 per a valorar i comparar els resultats trobats entre L-BIA i RMN. Les lesions eren escollides per a la seva inclusió en aquest estudi si el jugador de futbol havia patit una lesió muscular aguda recent, el metge de l'equip mèdic li havia realitzat un estudi per RMN en les primeres 24 hores després de la lesió i hi havia la possibilitat de realitzar un estudi L-BIA en el mateix període.

Després de l'examen per RMN, es van classificar les 37 lesions musculars segons la *"British Athletics Muscle Injury Classification"* [BAMIC, (Pollock et al., 2014)] i també segons la configuració histoarquitectònic de la lesió muscular (Balius et al., 2020) tenint en compte la:

- Afectació de la unió mioconnectiva
 - Lesió tendinosa o lesions que s'estenen a l'interior del tendó
 - Lesió de la unió miotendinosa (MTJ)
 - Lesió de la unió miofascial (MFJ)
- I la severitat de la lesió, diferenciant-la en 4 graus
 - Grau 1: Petita lesió, on la senyal de RNM afecta menys del 10% de l'àrea de secció transversal (CSA) del múscul i una àrea de menys de 5cm longitudinalment.
 - Grau 2: La senyal de RNM afecta entre un 10 i un 50% de la CSA i una longitud de entre 5 i 15 cm amb un "gap" de menys de 5cm.
 - Grau 3: Senyal de RNM superior al 50% de la CSA i superior als 15 cm longitudinalment.
 - Grau 4: Lesions musculars o tendinoses complertes que no s'inclouen en aquest estudi.

4.4 Detecció del "gap" muscular per RMN

Durant un període de 4 temporades, es van avaluar 22 lesions musculars de jugadors de futbol professional del Futbol Club Barcelona d'entre 20 i 28 anys (12 lesions de isquiotibials, 6 lesions del recte anterior del quàdriceps, 3 lesions de l'adductor llarg i 1 lesió del gastrocnemi medial)

Es va valorar la presència d'un "gap" intramuscular mitjançant RMN de 3.0 T.

Els músculs lesionats van ser explorats per estudi de RMN i ecografia a les 24 hores després de la lesió i es van dividir en 3 graus segons la presència de edema i "gap":

a) Grau 1: zona d'edema petita, miotendinosa o miofascial (de menys de un 10% de la secció transversal del múscul afectat i una longitud crani caudal inferior a 5 cm) sense "gap".

b) Grau 2f: quantitat moderada d'edema (entre el 10 i el 50% de l'àrea de secció transversal i de 5 a 15 cm de longitud) amb una imatge tipus "ploma", però sense afectació del teixit connectiu (no hi ha "gap").

c) Grau 2g: quantitat moderada d'edema (entre el 10 i el 50% de l'àrea de secció transversal i de 5 a 15 cm de longitud) amb una imatge tipus "ploma", amb afectació del teixit connectiu (amb presència de "gap").

4.5 Bioimpedància localitzada (L-BIA)

Les mesures de L-BIA es van fer 24 h després de la lesió muscular, per tal de quantificar el % de disminució dels valors de R (edema), Xc (teixit afectat) i angle de fase (PA) respecte al costat contra lateral sa. L'impacte de la gravetat de lesions musculars es va caracteritzar per la disminució del % de L-BIA (R, Xc i PA) en comparació amb la part no lesionada. Totes les lesions van ser diagnosticades prèviament per examen de RMN.

Per fer una mesura de L-BIA, cada tipus de lesió muscular ha de seguir un procediment específic.

Segons la localització i la profunditat de la zona lesionada, cal aplicar una configuració determinada en la col·locació dels elèctrodes (configuració longitudinal curta o configuració longitudinal llarga (Figura 6). Si els elèctrodes injectors de corrent estan a prop entre ells, la circulació de la corrent pel múscul té una profunditat limitada i es distribueix més superficialment, en cas contrari, una configuració més llarga (més distància entre els elèctrodes) proporciona una major penetració de la corrent, podent arribar a zones més profundes del múscul (Grimnes i Martinsen 2015). En ambdós casos, els elèctrodes d'injecció (I) han d'estar a prop dels elèctrodes de detecció (V).

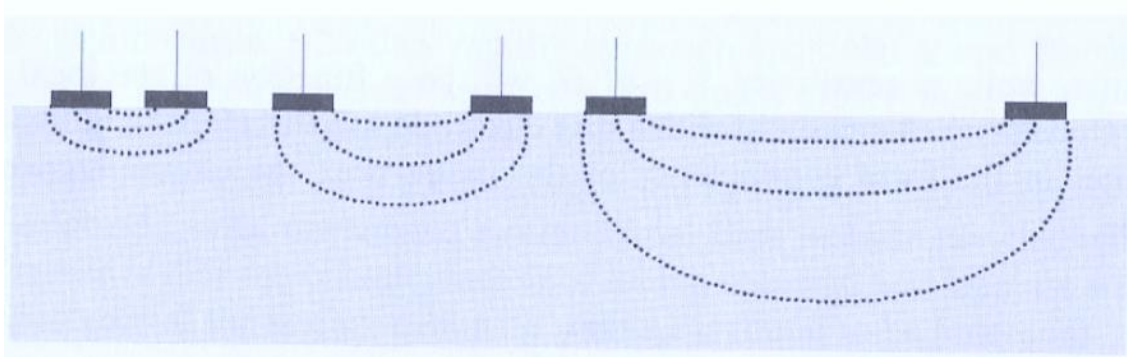


Figura 6. Penetració de la corrent segons configuració curta o llarga de la col·locació dels elèctrodes. Font: S. Grimnes and Ø.G. Martinsen/ "Bioimpedance & Bioelectricity. BASICS" 1st edition. 2000/ pp 134, capítol 5/Academic Press.

La configuració longitudinal curta (Figura 5A) i la configuració transversal són adequades per estudiar els músculs anatòmicament superficials com els isquiotibials (Figura 7). A causa de la proximitat dels elèctrodes d'injecció de corrent i de detecció de voltatge, 5 examinadors van avaluar la reproductibilitat entre testers (Nescolarde et al., 2013) de les mesures de R i Xc. El rang de variabilitat era insignificant, 1 Ω per R i 0.45 Ω per Xc. El valor mitjà \pm SD de R i Xc va ser de $39.6 \pm 0.6 \Omega$ i $14.2 \pm 0.5 \Omega$ respectivament, amb coeficients de variació de l'1.4% per a R i del 3.2% per a Xc.

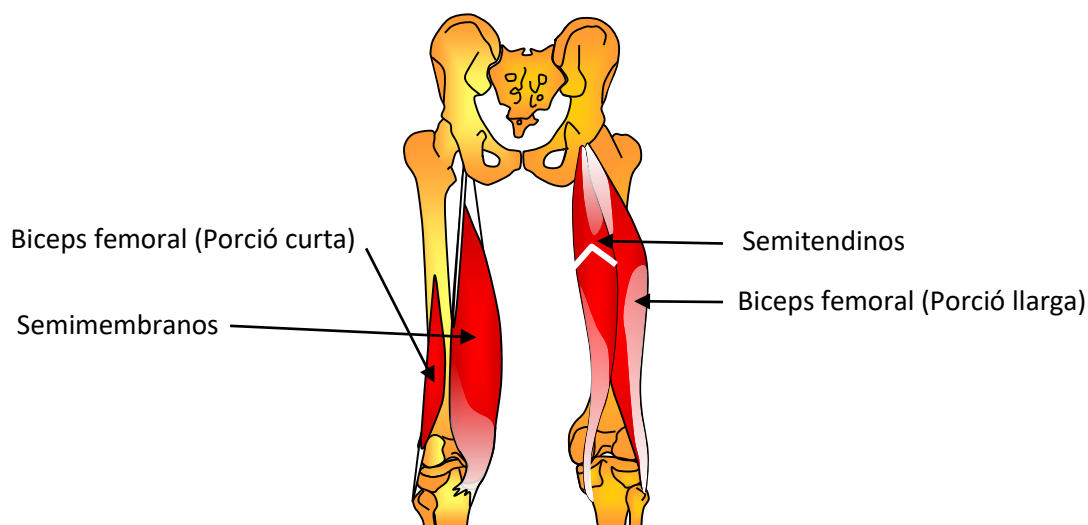


Figura 7. Grup muscular corresponent als isquiotibials. Font: Balius et al., “Lesiones musculares en el deporte”, 2013.

La configuració longitudinal llarga (Figura 5B) s'utilitza per valorar músculs anatòmicament més profunds (per exemple el vast intermig de la musculatura quadricipital, Figura 8) o per lesions mes extenses. En aquestes lesions els elèctrodes de tensió es van col·locar 10 cm proximalment i 10 cm distalment del centre de la lesió, per augmentar la sensibilitat de la mesura (Sanchez et al., 2016; Rutkove et al., 2017) .

La variabilitat de R i Xc (Nescolarde et al., 2015) entre un grup muscular sa de l'extremitat dreta i de l'extremitat esquerra es va estudiar en 10 jugadors de futbol no lesionats en 3 dies diferents amb un interval de 7 dies entre cada mesura. Les diferències intraindividuals en el 1/3 del quàdriceps a nivell proximal, 1/3 del quàdriceps a nivell mig, 1/3 dels isquiotibials a nivell proximal i 1/3 de isquiotibials a nivell mig, van oscil·lar entre -2.1 Ω i 0.5 Ω i les diferències interindividuals van ser inferiors al 15% (2SD) .

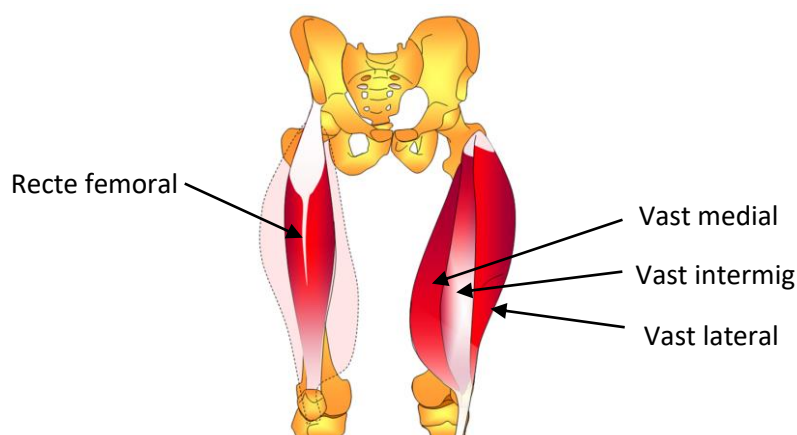


Figura 8. Musculatura quadricipital. Font: Balius et al., “Lesiones musculares en el deporte”, 2013.

Les línies de corrent s'han de fer córrer sempre de la mateixa manera sobre l'eix de les fibres musculars per evitar errors de mesurament a causa de les propietats elèctriques anisotròpiques del múscul.

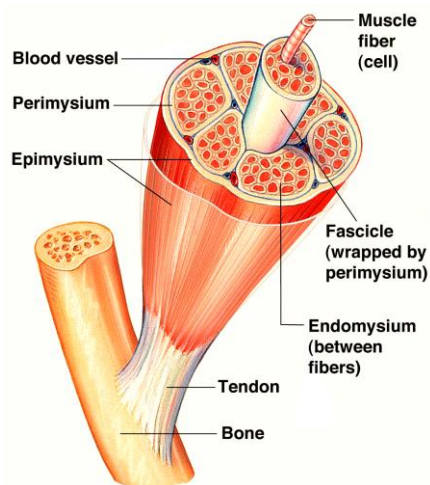


Figura 9. Muscle fiber. Font: <https://www.earthslab.com/physiology/actions-skeletal-muscles/>.

Els quatre elèctrodes de contacte adhesius Ag / AgCl [(Figura 10), COVIDIEN Ref. 31050522, COVIDIEN llc, Mansfield, IL, EUA] amb valors intrínsecs R i Xc de 10.89 Ω i 0.30 Ω respectivament (Nescolarde et al., 2016) es van col·locar a la zona afectada del múscul lesionat.



Figura 10. COVIDIEN elèctrodes. Ref. 31050522 (<https://www.4mdmedical.com/kendall-200-series-foam-electrodes.html>).

El centre de la lesió es va determinar prèviament per ultrasons.

El parell d'elèctrodes de mesura de tensió (V) es van col·locar a 5 cm proximal i a 5 cm a distal del centre de la lesió, i els elèctrodes injectors corrent (I) es van situar al costat dels mesuradors però distals al centre de la lesió.

Cas especial és una lesió del múscul vast intermig (figura 8), que està situat profund al recte

femoral, i per tant les possibles lesions a aquest múscul són més profundes, essent necessari utilitzar una configuració longitudinal llarga, col·locant els elèctrodes mesuradors de corrent (V) a 10 cm proximal i 10 cm distal de la lesió, i els 2 elèctrodes injectors distal als altres. (Figura 11)

Un altre cas especial és una lesió de la musculatura adductora, que com que el punt de lesió es massa a prop de la engonal, és necessari utilitzar una configuració transversal dels elèctrodes, situant els dos elèctrodes mesuradors (V) a 5 cm medial i 5 cm lateral del centre de la lesió, i els 2 elèctrodes injectors distal als altres (Figura 12).

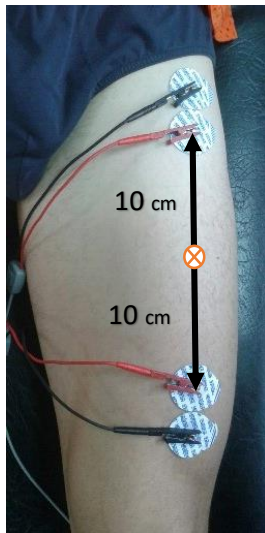


Figura 11. Configuració longitudinal llarga (10 cm). Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27).

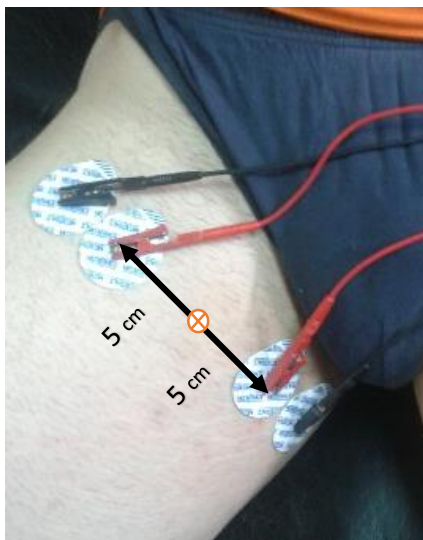


Figura 12. Configuració transversal (5cm) a la musculatura adductora. Font: (doi: 10.1088/0967-3334/36/1/27).

Per realitzar la mesura de L-BIA, els jugadors es van estirar en una camilla del centre mèdic (amb una temperatura ambient de 22-24°C). Per les mesures de lesions de quàdriceps i cuixa es van

situar en decúbit supí, i per les mesures de la musculatura isquiotibial i tríceps sural es van situar en decúbit pro.

Les mesures es van realitzar amb un analitzador de bioimpedància tetrapolar (Figura 13), de fase sensible a 50 kHz de freqüència (BIA-101 Anniversary; AKERN-Srl, Florència, Itàlia) que injectava una corrent alterna de 245 μ A RMS. Els errors del sistema de mesura, determinats amb un circuit paral·lel de precisió per la resistència i reactància, van ser per a la R, inferiors a 1 Ω i per a la Xc, inferiors al 2 Ω . El rang de mesura de la resistència és de 0-1500 Ω i de la reactància de 0-500 Ω , amb una tolerància màxima del 2%. Els errors de mesura determinats amb un circuit paral·lel de resistència de precisió i condensador van ser <1 Ω per a la R i <2% per a la Xc.

La resistència (R) mesurada (reducció de la tensió a mesura que la corrent aplicada passava pel grup muscular) i la reactància (Xc) (la capacitat de la membrana cel·lular a retardar el pas de la corrent aplicada per culpa de les membranes lipídiques bipolars) defineixen el líquid extracel·lular i la composició dels electròlits (R) i la massa i funció de la membrana cel·lular (Xc), mentre que l'angle de fase (PA) indica la vitalitat de la membrana cel·lular.



Figura 13. Analitzador BIA-101 Anniversary, AKERN-Florence, Italy (<https://www.akern.com/en/86-prodotti-eng/analizzatori-bia-eng/198-bia101-anniversary-en.html>).

4.6 Anàlisi estadístic

La normalitat de la distribució de les variables es va comprovar mitjançant la prova de Shapiro-Wilk i l'homogeneïtat de les variacions mitjançant el test de Levene. Les variables normalment distribuïdes es mostren com a mitjà \pm SD mentre que les dades no distribuïdes normalment es mostren com a mitjana i rang interquartile (IQR).

4.6.1 Obtenció dels valors de referencia dels paràmetres de L-BIA

Es van realitzar mesures de L-BIA, comparant els valors de R i Xc, dels 4 grups musculars de les extremitats inferiors (2 mesures a quàdriceps a 15 i 25 cm distals a la espina ilíaca àntero-inferior (EIAI), 1 mesura a adductors, 2 mesures a isquiotibials a 5 i 10 cm distals a la tuberositat isquiatàtica (TI) i 1 mesura al tríceps sural de la cama dominant i no dominant.

Dues mesures, una mesura a l'inici i una altra al final de la temporada 2015-2016, als 15 jugadors del 1er equip de futbol sala professional del Futbol Club Barcelona (19-28 anys: 1.78 ± 0.05 m d'alçada, 23.05 ± 1.27 kg / m² de IMC).

4.6.2 Primer treball: Detecció del “gap” muscular per L-BIA (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243)

L'anàlisi estadística One-way ANOVA amb la prova post-hoc de Scheffé o T2-Tamahne (si no homogeneïtzada) es va utilitzar per determinar l'efecte de la gravetat de la lesió en el canvi relatiu (disminució) en R, Xc i PA entre el grau 1, 2f i 2g, a més de determinar la relació entre la gravetat de la lesió muscular i segons els graus 1, 2f i 2g, amb dies al RTP.

Per a l'anàlisi de dades es va utilitzar el programari estadístic IBM® SPSS® versió 22.0 (Armonk, NY: IBM Corp, EUA). La importància estadística es va fixar en $P < 0.05$.

4.6.3 Segon treball: Valoració de la lesió muscular segons la localització anatòmica (doi: 10.3389/fphys.2020.574124)

Mesures repetides del test ANOVA 2x3 es van utilitzar per determinar diferències estadístiques entre R, Xc i PA 24 h després de la lesió, respecte al costat contra lateral sa, en lesió tendinosa, MTJ i MFJ, i segons el grau en les lesions de la MTJ. El test de Friedman es va utilitzar per a la mesura repetida de dades no distribuïdes normalment amb la prova de Wilcoxon.

L'anàlisi estadística única ANOVA es va utilitzar per determinar diferències estadístiques entre la disminució del % en els valors de R, Xc, PA i RTP, entre lesions tendinoses, MTJ i MFJ, i segons el grau en les lesions de la MTJ. En cas de dades no distribuïdes normalment es va fer servir la prova de Kruskal-Wallis.

Ambdues, mesures repetides ANOVA i test One-way ANOVA, amb prova de comparació múltiple de Bonferroni (diferències d'homogeneïtat assumides) o prova de Tamhane T2 (variacions d'homogeneïtat no assumides).

La part contra lateral no lesionada o sana és considerada com a referència, a causa de la simetria individual, en valors de L-BIA, entre l'àrea muscular esquerra i dreta de l'extremitat inferior en jugadors de futbol professionals. La variabilitat de L-BIA es va avaluar mitjançant la mesura de R i Xc a cinc zones anatòmiques dels músculs de les extremitats inferiors propensos a lesions musculars, en tres dies diferents, i amb un interval de 7 dies entre cada mesura, en 10 jugadors de futbol sans (Nescolarde et al., , 2015).

Segons el grau de lesió MTJ, es va estimar la mida de la mostra per a grups independents per valor R / H ($n = 6$; 3 per grup) i valor Xc / H ($n = 10$; 5 per grup), per tenir una potència ($\beta = 0,80$) per detectar una mida d'efecte de 0,996 amb un nivell de significació 0,05 mitjançant el programari estadístic MedCalc versió 19.0.3 (bvba de MedCalc Software, Ostenda, Bèlgica).

L'anàlisi de funcions discriminatòries es va utilitzar per trobar una combinació lineal de característiques que separa les lesions musculars valors de L-BIA (disminució del% en R, Xc i PA) segons el grau de gravetat de les lesions MTJ.

Per a l'anàlisi de dades es va utilitzar el programari estadístic IBM® SPSS® versió 22.0 (Armonk, NY: IBM Corp, EUA). El nivell de significació estadística es va fixar en $P < 0.05$.

RESULTATS

5. RESULTATS

5.1 Detecció del “gap” muscular per L-BIA (Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries:

Clinical prognosis. *Physiol Meas*, 38(7): L1-L9. doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

Es van avaluar per L-BIA 22 lesions musculars amb “gap” intramuscular a nivell miotendinós o miofascial, diagnosticades prèviament amb RNM, i es van agrupar en tres grups (grau 1, grau-2f i grau-2g).

La Taula 4 mostra les mesures de L-BIA i la disminució percentual corresponents a lesions musculars de grau 1 (n = 7), grau-2f (n = 8) i de grau-2g (n = 7), significativament en R (p <0.002) , Xc (p <0.0001) i PA (p <0.0001). La major gravetat de la lesió muscular va predir la major disminució de les mesures de L-BIA (Taula 2).

Taula 4. Mesures d’impedància bioelèctrica localitzades per al control (costat contra lateral no lesionat), costat lesionat i disminució percentual de la resistència (R), la reactància (Xc) i l’angle de fase (PA) corresponents a les lesions de grau 1, grau 2f i grau 2g.

	No lesionat			Lesionat			Disminució %		
	R (Ω)	Xc (Ω)	PA (°)	R (Ω)	Xc (Ω)	PA (°)	R	Xc	PA
Grau 1	37.3*	14.9	22.2	33.4	12.9	21.5	10.2	13.4	3.2
	7.8**	1.9	3.8	6.6	1.7	3.6	2.4	1.8	2.2
Grau 2f	42.1	15.1	20.1	36.7	11.6	17.8	12.8	23.5	11.2
	7.8	1.8	2.9	7.0	1.4	2.4	4.9	2.2	4.5
Grau 2g	41.2	16.2	22.4	32.8	10.1	17.6	19.9	37.5	20.5
	13.3	2.8	4.6	10.3	1.9	3.1	5.3	7.9	6.3

*Mean; **SD

Taula 5. Comparació del percentatge de disminució de les mesures de L-BIA corresponents a les lesions musculars de grau 1, grau 2f i grau 2g.

L-BIA	Comparació	SE	p
R ^a	1 vs. 2f	2.35236	<0.020
	2f vs. 2g	2.27766	<0.021
Xc ^b	1 vs. 2f	1.02689	<0.001
	1 vs. 2g	3.04438	<0.001
	2f vs. 2g	3.06761	<0.001
PA ^a	1 vs. 2f	2.41639	<0.014
	1 vs. 2g	2.49564	<0.001
	2f vs. 2g	2.41639	<0.004

*SE: error estàndard; ^aScheffe; ^bTamahne

La presència i la gravetat de la lesió muscular van afectar negativament ($p < 0.0001$) al temps de RTP en 8, 14 i 48 dies respectivament (Figura 14). Tal com es mostra a la Taula 6, es va observar una tendència ($p < 0.067$) a un temps més llarg al retorn al joc (RTP) entre el grau 1 (àrea petita d'edema) i el grau 2f (quantitat moderada d'edema i sense "gap"), mentre que es van trobar majors diferències entre el grau 1 (petita àrea d'edema) i el grau-2g (quantitat moderada d'edema i gap) ($p < 0.001$) i el grau 2f (quantitat moderada d'edema i sense "gap") i Grau 2g (quantitat moderada d'edema i "gap") de lesió muscular ($p < 0.001$).

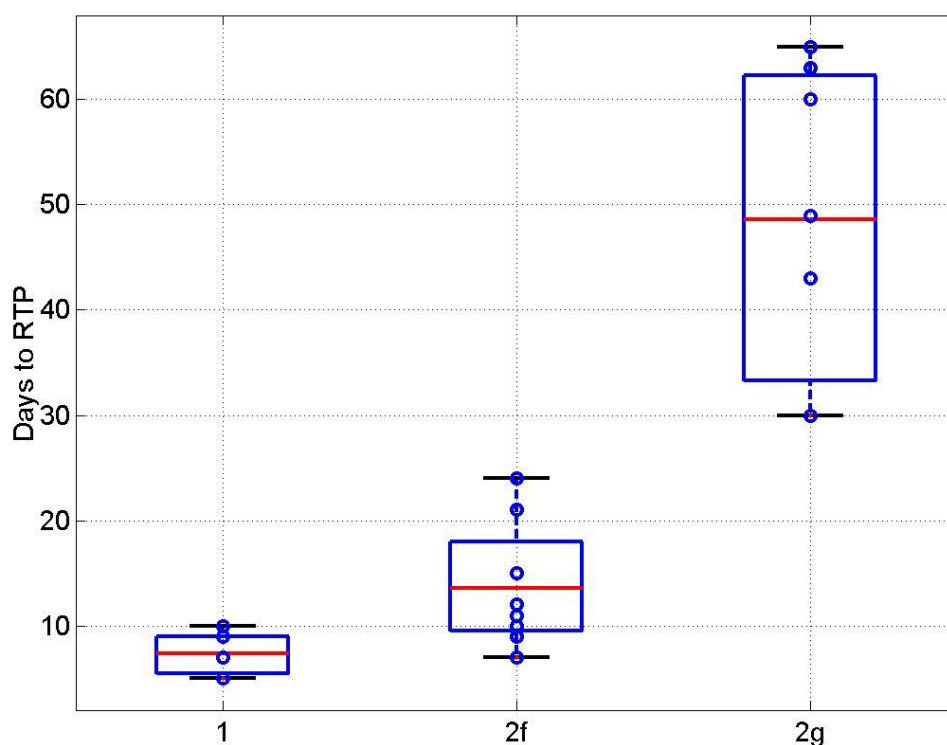


Figura 14. Diagrama de caixes descriptiu del nombre de dies des del dia de la lesió fins al dia del retorn a la competició (RTP) agrupant lesions segons la gravetat de l'afectació muscular ("gap") (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

Taula 6. Resultats de les anàlisis post-hoc del nombre de dies de RTP per les lesions agrupades per presència de disrupció muscular ("gap") (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

Dies de RTP	Comparació	SE*	p
T2-Tamahne	1 vs. 2f	2.24998	0.067
	1 vs. 2g	5.67666	0.001
	2f vs. 2g	6.01312	0.001

*SE: error estàndard

A les Figures 15,16 i 17 es mostren exemples de imatges de RMN de lesions musculars de la unió miotendinosa del septe intramuscular del recte femoral de grau 1, grau-2f i grau-2g, respectivament.

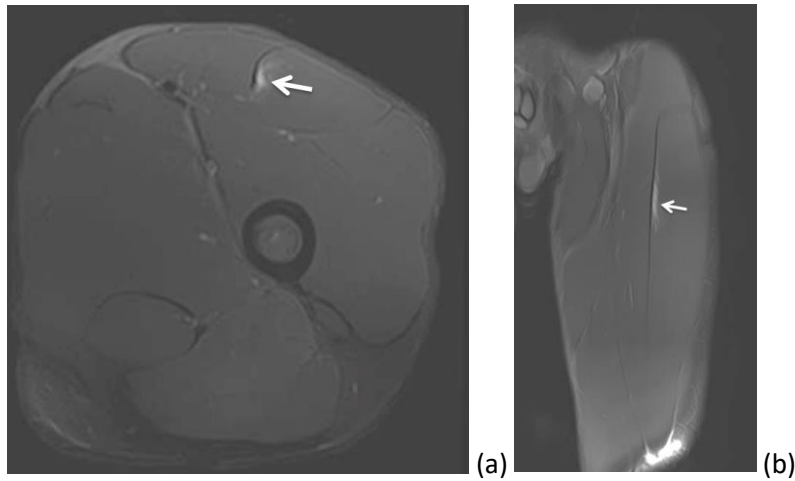


Figura 15. Grau 1. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat amb mínima àrea d'edema (fletxes) de la unió del miotendinosa sense presència radiològica de "gap" (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

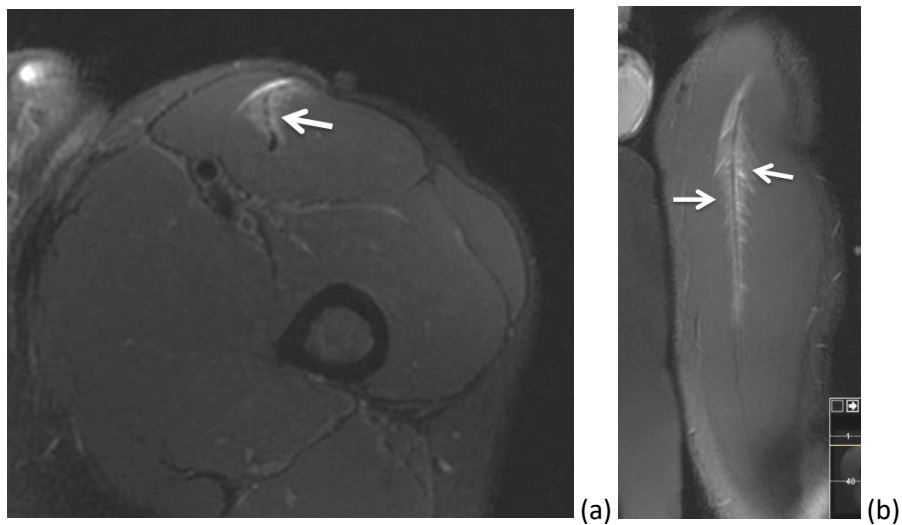


Figura 16. Grau 2f. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat sat amb un edema moderat en ploma (fletxes) que afecta la unió miotendinosa sense presència radiològica de "gap" (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

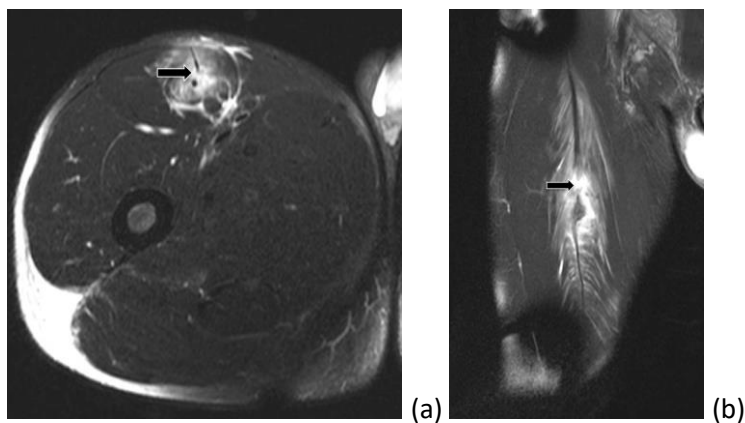


Figura 17. Grau 2g. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat amb un edema en ploma moderat o important de la unió miotendinosa, amb una imatge de “gap” clar (fletxes negres gruixudes) que mostra una pèrdua de la continuïtat i tensió tendinosa (doi: 10.1088/1361-6579/aa7243).

5.2 Valoració de la lesió muscular segons la localització anatòmica (Differentiation Between Tendinous, Myotendinous and Myofascial Injuries by L-BIA in Professional Football Players. *Frontiers in Physiology*. 11:574124. doi: 10.3389/fphys.2020.574124)

5.2.1 Diferenciació per RNM de lesions musculars segons localització anatòmica

Es van valorar per RNM realitzada 24 hores després de la lesió, 37 lesions musculars de les temporades 2016-17 i 2017-18, agrupant-les segons la localització anatòmica (figures 18, 19 i 20) i segons la classificació de la “British Athletics Muscle Injury Classification” (BAMIC) de Pollock et al., 2014; trobant lesions tendinoses (n = 4), miotendinoses MTJ (n = 26) i lesions miofascials MFJ (n = 7).

Aquestes lesions estaven situades a la porció llarga del bíceps femoral (n = 12), la porció curta del bíceps femoral (n = 9), el recte anterior femoral (n = 10), el semitendinos (n = 4) i el semimembranós (n = 2).

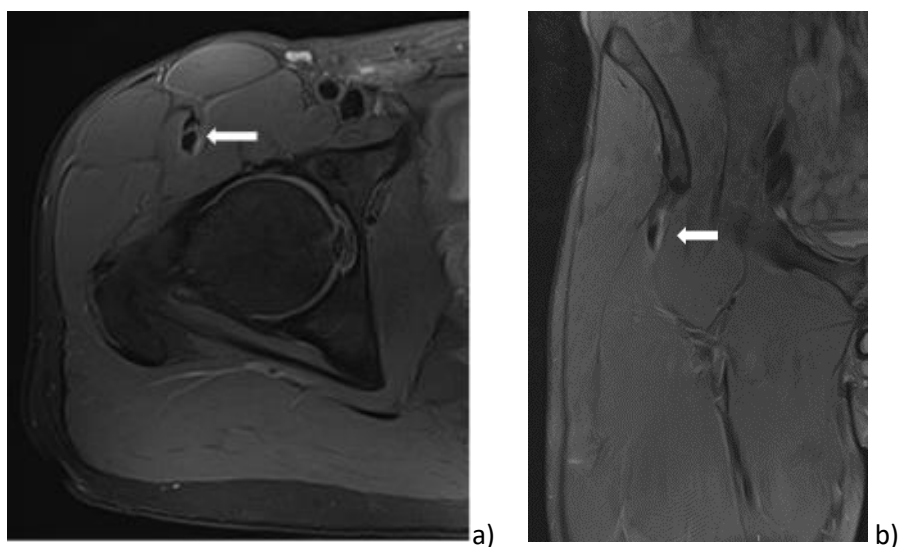


Figura 18. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d’una lesió tendinosa del sept

intramuscular del recte anterior femoral (ruptura longitudinal del tendó amb lleu edema peritendinós) (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

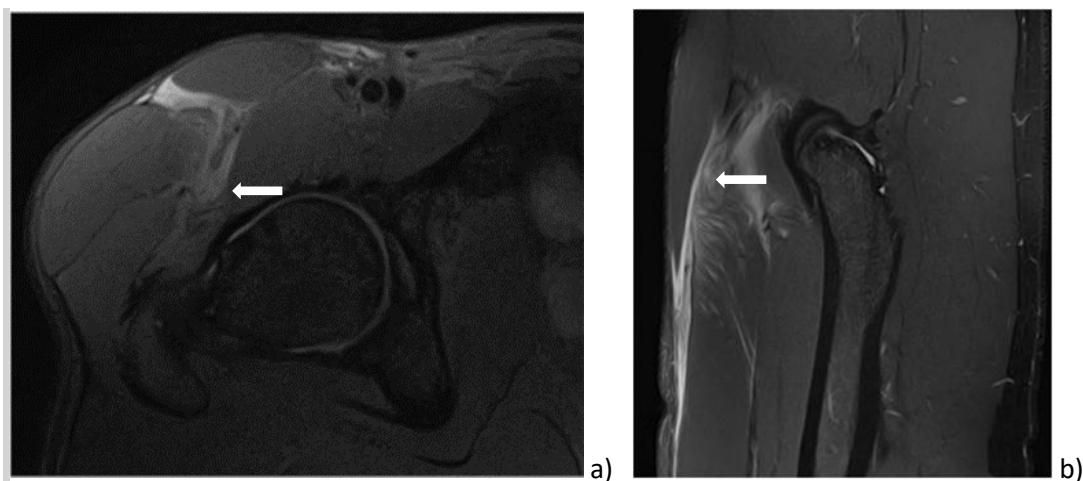


Figura 19. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d'una lesió de la unió miotendinosa MTJ proximal del recte anterior femoral (ruptura de teixit connectiu (fletxa) i fibres musculars desestructurades amb pèrdua de l'angle de penació de les fibres) (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

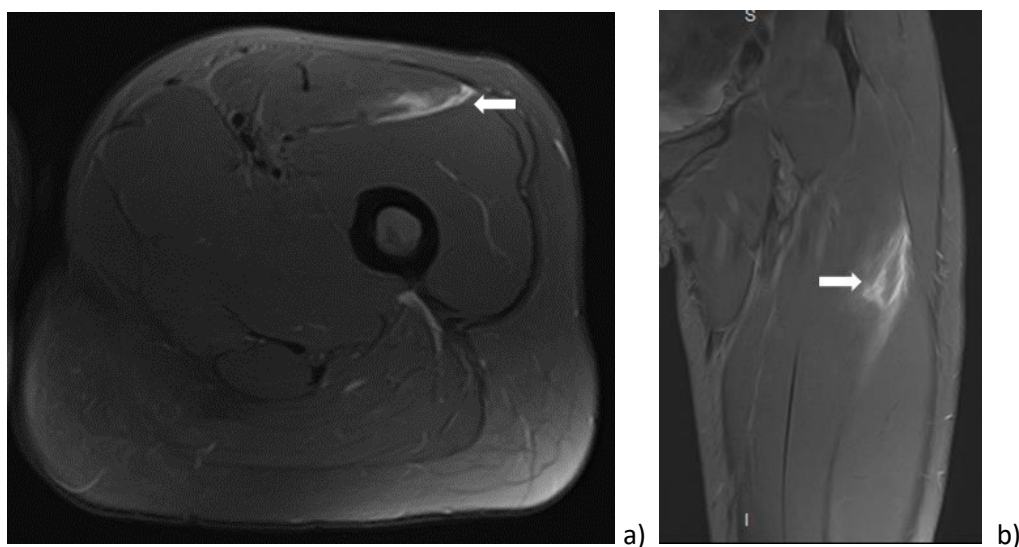


Figura 20. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d'una lesió miofascial de la unió miotendinosa distal del recte anterior femoral (fletxa) (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

5.2.2. Mesures de L-BIA de lesions tendinoses, MTJ i MFJ , diagnosticades prèviament per RNM, 24 hores després de la lesió.

La Taula 7 mostra els valors individuals de les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió [resistència (R), reactància (Xc) i angle de fase (PA)] de 37 lesions musculars. Segons la ubicació anatòmica, les lesions es classifiquen en tendinoses (n = 4), MTJ (n = 26) i MFJ (n = 7) en). També es mostren els graus de gravetat de les lesions MTJ (MTJ-Grau 1, MTJ-Grau 2, MTJ-Grau 3).

Taula 7. Valors individuals de mesures de L-BIA 24 h després de la lesió [costat contralateral sa (1), costat lesionat (2) a R, Xc i PA], inclosos els tendinosos (n = 4), MTJ (n = 26) i MFJ (n = 7) lesions (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

Muscle Injuries	Anatomical location	R (Ω)		Xc (Ω)		PA ($^{\circ}$)	
		Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)
1	T1	33.5	32.4	13.9	13.8	22.5	23.1
2	T2	38.8	38.0	17.2	17.0	23.9	24.1
3	T3	39.4	39.7	13.2	13.2	18.5	18.4
4	T4	45.5	44.4	12.8	12.8	15.7	16.1
5	MTJ-Grade 1	32.0	29.0	16.0	14.0	26.6	25.8
6	MTJ-Grade 1	29.0	26.0	14.0	12.0	25.8	24.8
7	MTJ-Grade 1	47.0	43.0	18.0	16.0	21.0	20.4
8	MTJ-Grade 1	31.0	28.0	15.0	13.0	25.8	24.9
9	MTJ-Grade 1	37.4	34.6	14.0	11.9	20.5	19.0
10	MTJ-Grade 1	48.7	41.5	15.0	12.6	17.1	16.9
11	MTJ-Grade 1	35.8	31.8	12.0	10.6	18.5	18.4
12	MTJ-Grade 1	42.0	40.1	18.9	17.5	24.2	23.6
13	MTJ-Grade 1	53.6	52.1	11.2	9.8	11.8	10.7
14	MTJ-Grade 1	39.1	37.1	15.7	14.5	21.9	21.3
15	MTJ-Grade 1	49.0	47.4	15.9	13.7	18.0	16.1
16	MTJ-Grade 2	42.0	37.0	17.0	13.0	22.0	19.4
17	MTJ-Grade 2	34.0	32.0	13.0	10.0	20.9	17.4
18	MTJ-Grade 2	38.6	35.0	15.2	12.0	21.5	18.9
19	MTJ-Grade 2	44.8	38.5	17.3	13.6	21.1	19.5
20	MTJ-Grade 2	59.4	52.0	14.2	11.2	13.4	12.2
21	MTJ-Grade 2	32.3	32.2	13.4	11.5	22.5	19.7
22	MTJ-Grade 2	41.0	38.0	13.2	11.0	17.8	16.1
23	MTJ-Grade 2	32.1	29.1	13.5	11.5	22.8	21.6
24	MTJ-Grade 3	29.3	24.6	15.3	9.7	27.5	21.6
25	MTJ-Grade 3	44.0	36.0	14.0	10.0	17.7	15.5
26	MTJ-Grade 3	39.6	27.7	14.3	7.3	19.8	14.6
27	MTJ-Grade 3	43.3	34.4	20.8	12.2	25.7	19.5
28	MTJ-Grade 3	42.9	40.3	12.9	9.8	16.7	13.7
29	MTJ-Grade 3	32.0	27.0	13.4	10.3	22.7	20.9
30	MTJ-Grade 3	43.2	37.6	16.7	12.3	21.1	18.1
31	MFJ	37.6	28.9	12.7	9.5	18.7	18.2
32	MFJ	68.0	54.0	19.0	13.0	15.6	13.5
33	MFJ	29.3	25.4	13.4	9.3	24.6	20.1
34	MFJ	37.2	32.4	15.0	11.1	22.0	18.9
35	MFJ	34.7	27.6	16.8	9.2	25.8	18.4
36	MFJ	47.3	40.4	18.5	12.7	21.4	17.5
37	MFJ	32.9	24.3	15.1	8.2	24.7	18.6

R, Resistance; Xc, Reactance; PA, phase angle; T, tendinous; MTJ, myotendinous junction; MFJ, myofascial junction

La Taula 8 descriu les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió, de 37 lesions musculars, amb una mitjana \pm SD corresponent a lesions tendinoses (n = 4), MTJ (n = 26) i MFJ (n = 7) i el percentatge diferència (diferència,%) en resistència (R), reactància (Xc) i angle de fase (PA). A més, s'informa del resultat de la prova ANOVA de mesures repetides entre el costat lesionat en comparació amb el costat sa de R, Xc i PA.

Taula 8. Valors de les mesures de L-BIA 24 h després de lesions [costat contralateral sa (1), costat lesionat (2) i % de diferència en R, Xc i PA], i el resultat de mesures repetides del test ANOVA corresponent a lesió tendinosa , MTJ i MFJ (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

Tendinous, (n=4)				
	Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference, %	F P value (1-2)^{a1}
R (Ω)	39.3 ± 4.9	38.6 ± 5.0	-1.8 ± 1.8	4.119 0.135
Xc (Ω)	14.3 ± 2.0	14.2 ± 1.9	-0.5 ± 0.6	2.455 0.215
PA (°)	20.2 ± 3.7	20.4 ± 3.8	1.2 ± 1.5	2.865 0.189
MTJ, (n=26)				
	Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference, %	F P value(1-2)^{a2}
R (Ω)	40.1 ± 7.7	35.8 ± 7.4	-10.7 ± 6.3	65.640 < 0.001
Xc (Ω)	15.0 ± 2.2	12.0 ± 2.2	-20.0 ± 10.1	76.565 < 0.001
PA (°)	20.9 ± 3.9	18.9 ± 3.8	-9.9 ± 7.0	41.988 < 0.001
MFJ, (n=7)				
	Non-injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference, %	F P value(1-2)^{a3}
R (Ω)	41.0 ± 13.1	33.3 ± 10.6	-18.7 ± 5.2	38.248 0.001

Xc (Ω)	15.8 \pm 2.4	10.4 \pm 1.9	-33.7 \pm 8.4	73.600 < 0.001
PA ($^\circ$)	21.8 \pm 3.7	17.9 \pm 2.1	-17.0 \pm 8.4	19.509 0.004

^aRepeated measures ANOVA test between non-injured side (1) and injured side (2) according to ¹tendinous, ²MTJ, ³MFJ injuries.

R, resistance; Xc, reactance; PA, phase angle; MTJ, myotendinous junction; MFJ, myofascial junction

Mitjançant mesures repetides del test ANOVA, els canvis anatòmics relacionats amb lesions tendinoses no es van reflectir mitjançant la mesura de L-BIA a través de R, Xc i PA ($P > 0.05$), 24 h després de la lesió. La diferència percentual en R, Xc i PA, 24 h després de la lesió, va ser del -0.5% \sim -2%. No obstant això, hem trobat significació estadística ($P < 0.01$) per a R, Xc i PA per a les lesions MTJ i MFJ. Els resultats de les lesions MTJ van mostrar una significació estadística ($P < 0.001$) en la diferència percentual de R, Xc i PA en el costat lesionat en comparació amb el contralateral sa (-11% en R, -20% en Xc i -10% en PA), així com en les lesions MFJ ($P < 0.01$) en diferència percentual de R, Xc i PA en el costat lesionat en comparació amb el costat contralateral sa (-19% en R, -34% en Xc i -17% en PA).

El test One-Way ANOVA, pel que fa a les lesions MTJ i MFJ, mostra una importància estadística per a la diferència del % en R ($F = 9.673$, $P = 0.004$), Xc ($F = 10.775$, $P = 0.003$) i significació estadística per a la PA ($F = 5.155$, $P = 0.030$).

La Figura 21 mostra la mitjana i la SD del percentatge de diferència (% de diferència) en R, Xc i PA, de lesions MTJ i MFJ, diagnosticades per ressonància magnètica 24 h després de la lesió i avaluades per mesures de L-BIA. A més, també mostra el resultat del One-Way ANOVA amb el % de diferència de R, Xc i PA de les lesions MTJ respecte al % de diferència de R, Xc i PA de les lesions MFJ.

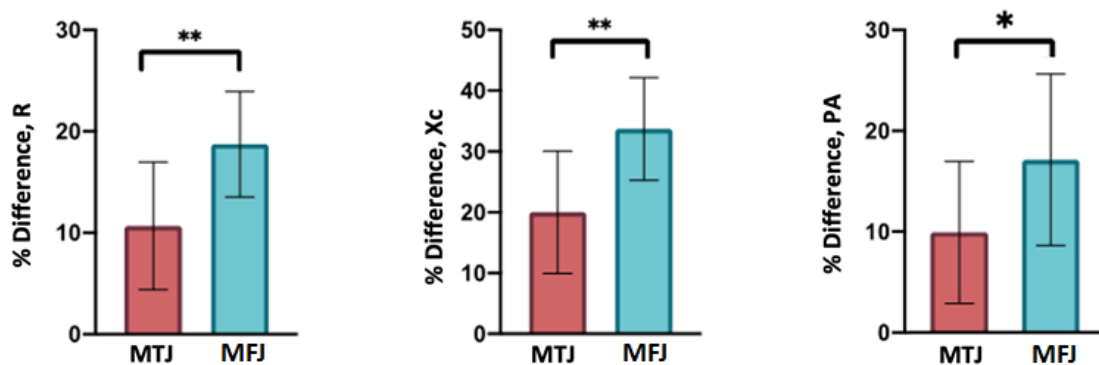


Figura 21. Mitjana i SD de la diferència del % en R, Xc i PA de 26 lesions MTJ (vermell) i 7 lesions MFJ (blau). També es presenten els resultats del One-Way ANOVA entre el % de diferència de les lesions MTJ respecte a les lesions MFJ (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

5.2.3. Mesures per L-BIA de lesions de la unió miotendinosa (MTJ), diagnosticades prèviament per RNM, 24 hores després de la lesió i agrupades segons la gravetat de la lesió.

En un segon anàlisi, 26 lesions de la unió miotendinosa (MTJ), avaluades per RMN 24 h després de la lesió, es van agrupar segons la seva gravetat (Figures 22, 23 i 24) segons la classificació BAMIC (Pollock et al.,2014) en grau 1 (n = 11), grau 2 (n = 8) i grau 3 (n = 7).

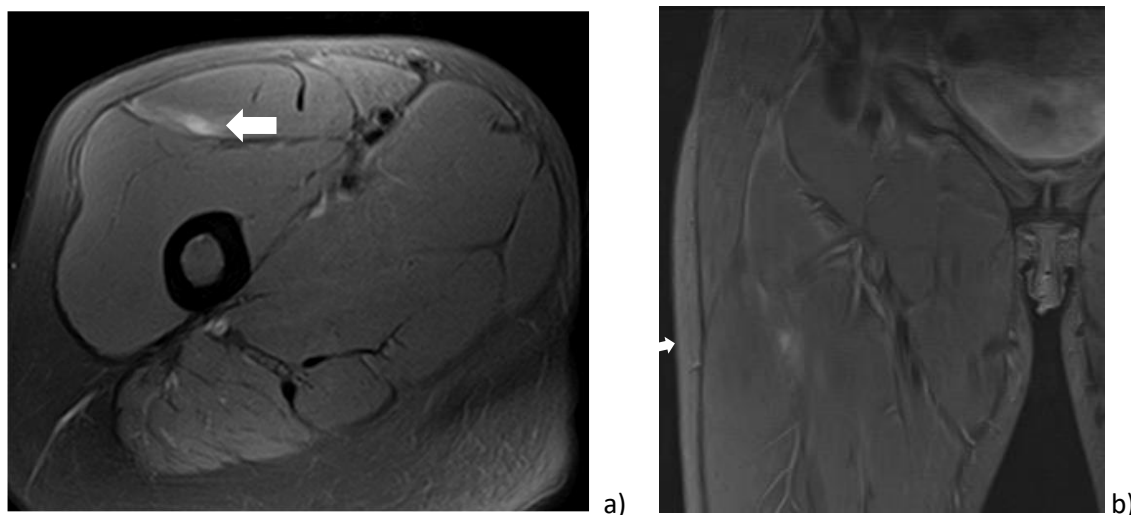


Figura 22. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d'una lesió de la MTJ distal grau 1 del recte anterior femoral. Mínima lesió miofascial (fletxa) (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

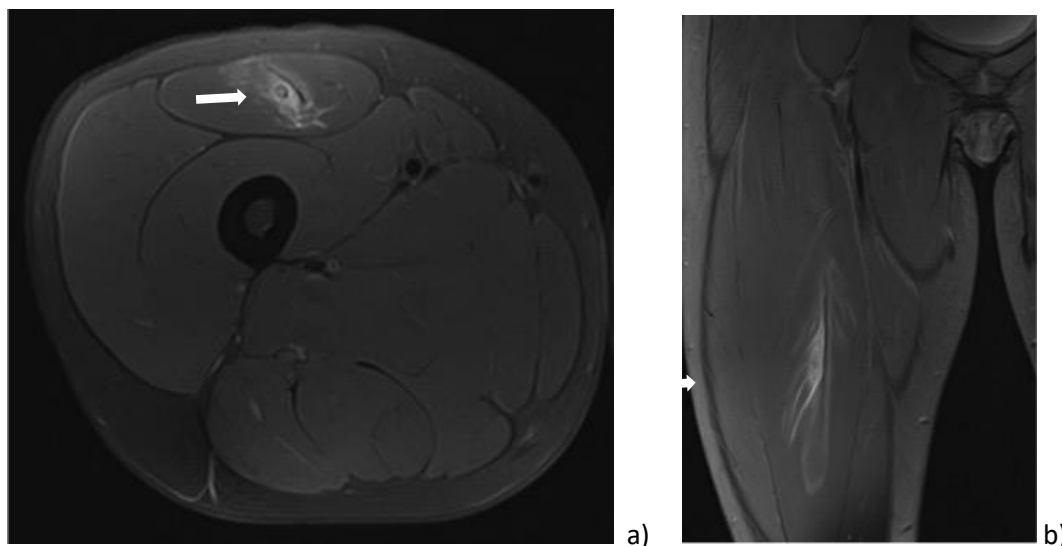


Figura 23. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d'una lesió MTJ proximal grau 2 del septe central del múscul recte anterior femoral. Desdibuixament de les fibres musculars a la MTJ lateral del septe central, amb un petit hematoma (fletxa). Podem veure que es tracta d'un múscul sobrecarregat (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

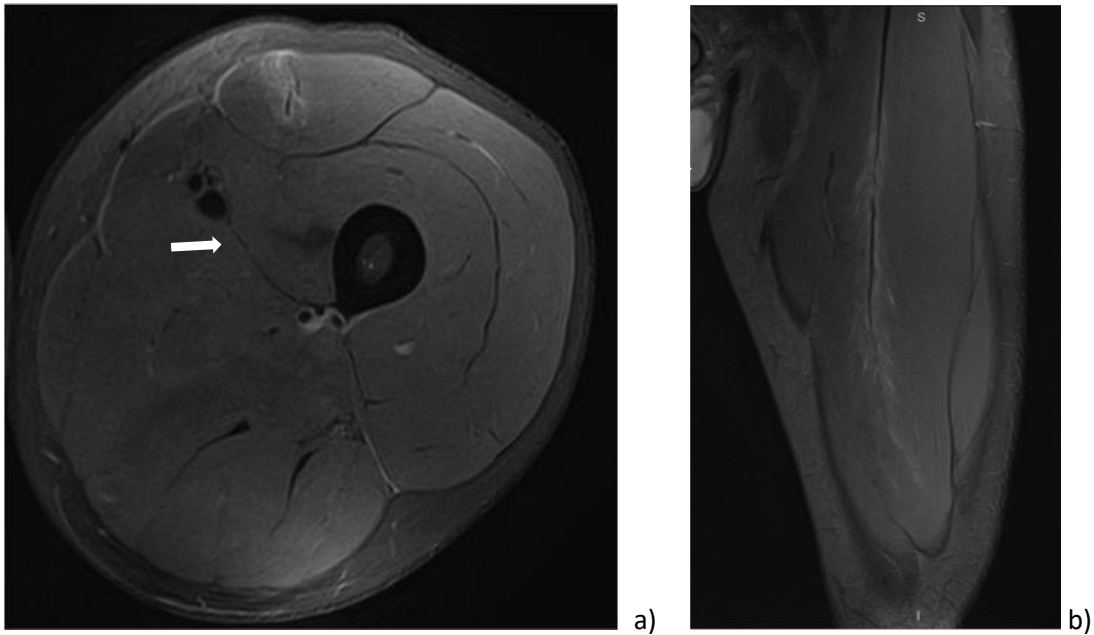


Figura 24. Imatge axial (a) i coronal (b) de RNM en T2 Fat Sat d'una lesió MTJ proximal grau 3 del septe central del múscul recte anterior femoral. La pèrdua de continuïtat del septe central (transversal i longitudinal), produeix una pèrdua de tensió tendinosa i un extens edema en ploma (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

La Taula 9 presenta les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió com a mitjana \pm SD i diferència percentual (diferència, %) en R, Xc i PA corresponents al grau de gravetat de la lesió MTJ en grau 1 (n = 11), grau 2 (n = 8) i grau 3 (n = 7). A més, es presenta el resultat de mesures repetides del test ANOVA entre el costat lesionat en comparació amb el costat sa de R, Xc i PA.

Taula 9. Valors de les mesures de L-BIA 24 h després de la lesió [costat contra lateral sa (1), costat lesionat (2) i % de diferència en R, Xc i PA] corresponent al grau de lesions MTJ i el resultat de mesures repetides del test ANOVA per R, Xc i PA (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

MTJ-Grau 1, (n=11)				
	Costat sa (24 h després lesió) (1)	Costat lesionat (24 h després lesió) (2)	% Diferència	F P value (1-2) ^{p1}
R (Ω)	40.4 \pm 8.3	37.3 \pm 8.4	-7.9 \pm 3.7	40.405 <0.001
Xc (Ω)	15.1 \pm 2.3	13.2 \pm 2.3	-12.3 \pm 2.8	229.221 <0.001
PA ($^\circ$)	21.0 \pm 4.5	20.2 \pm 4.6	-4.3 \pm 3.3	28.279 <0.001

MTJ-Grau 2, (n=8)				
	Costat sa (24 h després lesió) (1)	Costat lesionat (24 h després lesió) (2)	% Diferència	F P value (1-2)^{b1}
R (Ω)	40.5 ± 9.0	36.7 ± 7.0	-8.8 ± 4.4	20.788 0.004
Xc (Ω)	14.6 ± 1.7	11.7 ± 1.1	-19.5 ± 3.7	108.784 <0.001
PA (°)	20.3 ± 3.2	18.1 ± 2.9	-10.8 ± 3.5	54.428 <0.001
MTJ-Grau 3, (n=7)				
	Costat sa (24 h després lesió) (1)	Costat lesionat (24 h després lesió) (2)	% Diferència	F P value (1-2)^{b1}
R (Ω)	39.2 ± 6.0	32.5 ± 6.0	-17.1 ± 7.3	31.968 0.001
Xc (Ω)	15.3 ± 2.7	10.2 ± 1.7	-32.7 ± 9.8	42.505 0.001
PA (°)	21.6 ± 4.0	17.7 ± 3.1	-17.8 ± 6.6	32.618 0.001

^b Mesures repetides del Test ANOVA entre el costat sa i el costat lesionat en funció del grau de lesió MTJ
R, Resistència; Xc, reactància; PA, angle de fase; MTJ, unió miotendinosa; MFJ, unió miofascial

Utilitzant mesures repetides del test ANOVA, els canvis anatòmics relacionats amb el grau de lesió de MTJ es varen evidenciar mitjançant les mesures de L-BIA de la R, Xc i PA (P < 0.01), 24 hores després de lesions de grau 1, 2 i 3.

El test One-way ANOVA, pel que fa a les lesions MTJ classificades en els graus 1, 2 i 3, mostra una importància estadística per a la disminució del % en R (F = 7.630, P = 0.003) i una significació estadística per a % de diferència de Xc (F = 26.964, P < 0.001) i un % de diferència de PA (F = 20.089, P < 0.001).

La Figura 25 mostra la mitjana i la SD de la diferència del % en R, Xc i PA, de 26 lesions MTJ classificades com a grau 1 (n = 11), grau 2 (n = 8) i grau 3 (n = 7) mitjançant examen de RMN 24 hores després de la lesió. A més, els resultats del test de comparació múltiple de Tamhane T2 van revelar diferències estadístiques (P < 0.001) en Xc i PA entre el grau 1 i el grau 2, així com entre el grau 1 i el grau 3.

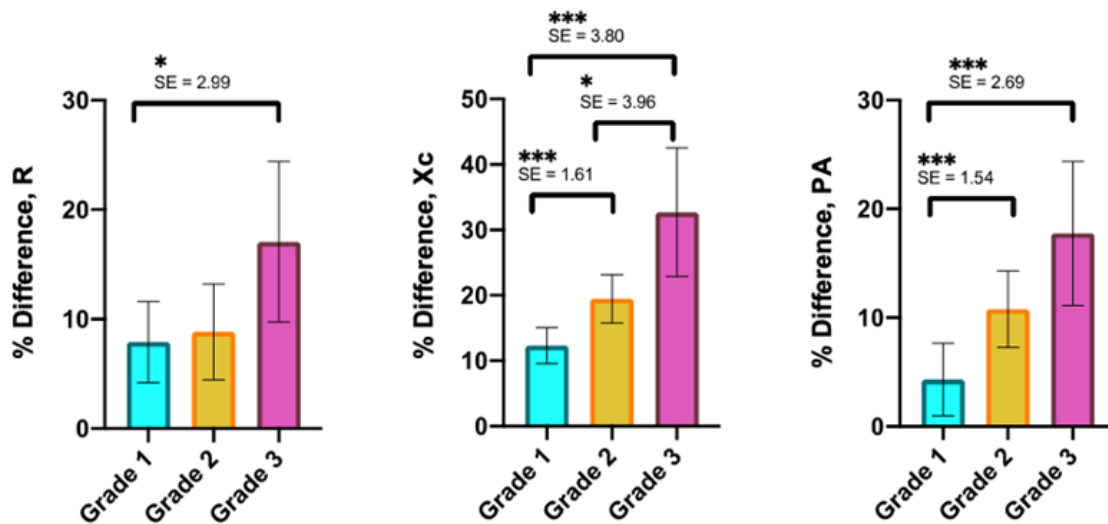


Figura 25. Mitjana i SD de diferència de % en R, Xc i PA de lesions MTJ graus 1-3. També es presenten resultats de SE i resultats de la prova post-hoc (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

La Figura 26 mostra les funcions discriminants canòniques, segons el grau de lesió de la MTJ, mitjançant l'anàlisi de funcions discriminatòries del percentatge de diferència (% diferència) de R, Xc i PA.

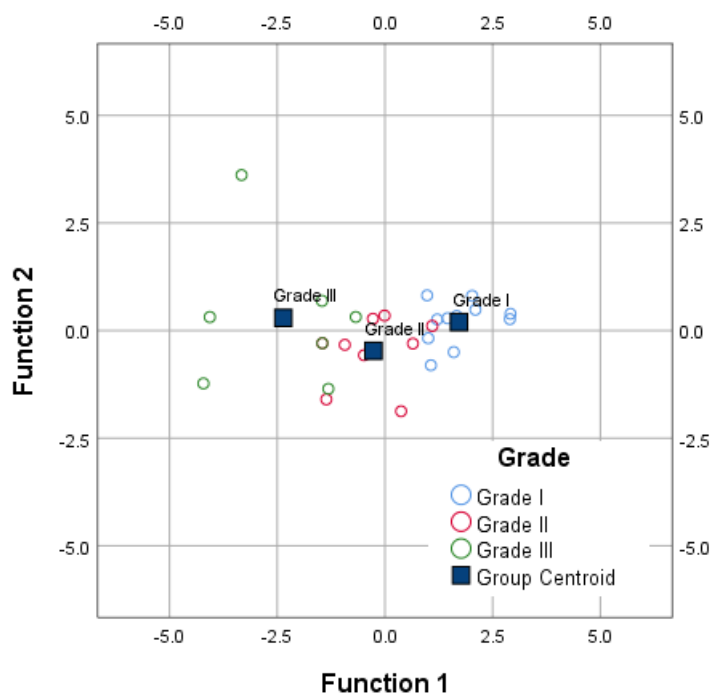


Figura 26. Funcions discriminants canòniques per a un % diferència en R, Xc i PA, segons el grau de lesió MTJ, de grau 1 (n = 11), grau 2 (n = 8) i grau 3 (n = 7) (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

Les puntuacions de funció obtingudes a través dels coeficients de funció canònica discriminant normalitzats són:

$$FScore1 = 3.198\%disminucióR - 5.093\%disminucióXc + 2.701\%disminucióPA$$

$$FScore2 = 4.212\%disminucióR - 4.746\%disminucióXc + 3.064\%disminucióPA$$

La primera i la segona funció mostren el coeficient estandarditzat per un % diferència de R, % un % diferència de Xc i un % diferència del PA. Les magnituds d'aquests coeficients indiquen la intensitat de les variables que discriminen. Així, el descens del % en Xc té el major impacte de les tres variables, en la primera i segona puntuació discriminant, però sobretot en la primera puntuació. Per tant, Xc és la variable que més discrimina segons el grau de lesions MTJ per mesures de L-BIA 24 h després de la lesió.

5.2.4. Tornada a la competició (RTP) en lesions MTJ i MFJ.

La Taula 10 presenta els dies de retorn a la competició (RTP) i el resultat del test One-Way ANOVA entre les lesions MTJ i MFJ i segons el grau de gravetat de les lesions MTJ.

Taula 10. RTP de les lesions de la unió mioconnectiva (doi: 10.3389/fphys.2020.574124).

Ubicació anatòmica (Mida de la mostra)	RTP, dies	F P value ¹
MTJ (26)	25 ± 22	2.277 0.124
MFJ (7)	20 ± 8	
Grau de lesió MTJ (Mida de la mostra)	RTP, dies	F P value ²
Grau 1 (11)	8 ± 3	39.517 P<0.001
Grau 2 (8)	14 ± 10	
Grau 3 (7)	52 ± 14	

¹One-way ANOVA entre lesions MTJ i MFJ

²One-way ANOVA entre les lesions de MTJ segons la seva gravetat

Utilitzant el test One-way ANOVA i pel que fa a lesions MTJ i MFJ, el RTP no presenta importància estadística (P > 0.05).

Pel que fa a les lesions MTJ classificades en els graus 1, 2 i 3, hem trobat una significació estadística elevada en dies per al RTP (P < 0,001). Tamhane's T2 revela una diferència estadística elevada (SE = 5.121, P = 0.002) que contrasta el grau 1 (8 ± 3 dies) amb el grau 3 (52 ± 14 dies) i també una gran diferència estadística (SE = 5.475, P = 0.001) que contrasta amb el grau 2 (14 ± 10 dies) amb el grau 3 (52 ± 14 dies).

DISCUSSIÓ

6. DISCUSSIÓ

6.1 Primer article

Mitjançant mesures de L-BIA a 50 kHz en ferides a les extremitats inferiors del cos humà, Lukaski i Moore (2012) van trobar una lleugera disminució de R, Xc i PA de forma aguda després del desbridament, amb una disminució considerablement major a mesura que progressa la infecció i un augment substancial en R, Xc i PA després del tractament i la curació de les ferides; resultats que demostren la hipòtesi que la BIA il·lustra de manera no invasiva l'estructura de nivell cel·lular anteriorment postulada pel mateix autor (Lukaski 1996).

Xc és proporcional a la massa cel·lular (les membranes cel·lulars es componen de bicapa de lípids i actuen com a condensadors). Els augments de Xc indiquen una proliferació i granulació epidèrmica mentre que la Xc disminueix amb la infecció i la conseqüent pèrdua de massa cel·lular.

El valor R és inversament proporcional al líquid extracel·lular i directament proporcional a la presència de fibrina i epitelització, i per tant, indica una curació de ferides. Les membranes cel·lulars provoquen un retard en el trànsit del voltatge i la corrent elèctrica; així, com més gran és la PA, més sanes són les membranes cel·lulars i la disminució de la PA reflecteix una deteriorada funció de la membrana.

Posteriorment, Nescolarde et al. (2013 i 2015), van trobar un patró similar a l'estudi anterior de Lukaski i Moore (2012) en les lesions musculars en jugadors de futbol professionals, trobant un patró de canvi en R i Xc segons la gravetat de la lesió en termes de "grau I" (lesió lleu), "grau II" (ruptura parcial o lesió moderada) i "grau III" (ruptura completa o lesió greu). Els canvis més significatius es van observar en lesions greus, mostrant una significació estadística en els canvis en Xc (retracció de fibres musculars, és a dir, "gap"), però no en R (edema). Així, els autors van concloure que, segons estudis anteriors basats en criteris de ressonància magnètica (Reurink et al., 2015 i Schneider-Kolsky et al., 2006), la presència d'edema al múscul lesionat no es correlacionava amb el grau de la lesió.

En aquest treball vam estudiar 22 lesions musculars de 18 jugadors de futbol. En la Taula 1 del treball es descriu el percentatge de disminució de la resistència (R), reactància (Xc) i angle de fase (PA) del teixit muscular lesionat respecte al contra lateral sa, segons la presència d'edema i/o de "gap" estudiats prèviament per RMN. En els resultats del test ANOVA segons el percentatge de disminució, es classifiquen 7 lesions musculars com a grau 1, 8 lesions com a grau 2f, i 7 lesions com a grau 2g; mostrant una gran significació estadística entre el grau 1, 2f i 2g per a R ($F = 9.126$, $p < 0.002$), Xc ($F = 46.269$, $p < 0.000$) i PA ($F = 24.164$, $p < 0.000$). A causa del baix nombre de lesions de grau III en el futbol (ruptures musculars completes que impliquen a més el tendó) no les hem utilitzat per a aquest treball.

Recentment, s'ha proposat una nova classificació de lesions musculars (Valle et al., 2016) on el "gap" té un paper important, davant l'inconvenient que no sempre és possible identificar per ressonància magnètica. Per això, hem dividit les clàssiques "lesions musculars parcials" (grau II, ruptures parcials o lesions moderades) en 2 subgrups: 2f (RMN amb edema en ploma sense "gap") i 2g (RMN amb edema en ploma i "gap"). Totes dues són lesions parcials, però la RNM no va poder detectar petites ruptures en algunes d'elles i la classificació, basada en la RNM, es determinarà per una petita quantitat d'edema (grau I) o molta més extensió d'edema (grau II). El pronòstic de la lesió i el temps de RTP dependran, entre d'altres factors, de la gravetat de la lesió i això serà incorrecte si ens equivoquem en la classificació de la lesió. L'anàlisi post-hoc

mostrat a la Taula 2 del treball revela una alta diferència estadística al contrastar el Xc i PA en les lesions de grau-1 amb les lesions de grau-2f, les de grau-1 amb les de grau-2g i les de grau-2f amb les de grau-2g. Només, en el cas de no trobar diferències estadístiques, s'observava contrast de R entre les lesions de grau-1 amb les de grau-2f. Per tant, és interessant diferenciar millor, el gran i heterogeni grup de lesions musculars parcials en 2 subgrups, perquè els canvis significatius de Xc ens podrien ajudar a donar una major importància real de lesions musculars i, per tant, proporcionar el millor pronòstic possible.

Pel que fa al RTP, entre les lesions de grau 1 (7 ± 2 dies), 2f (14 ± 6 dies) i 2g (48 ± 15 dies), també es va trobar una alta diferència estadística mitjançant el test One-way ANOVA ($F = 41.286$, $p < 0.000$). Els resultats del test post hoc T2-Tamahne mostren una alta diferència estadística que contrasta entre el grau 1 amb 2g, les de grau 2f amb les de grau 2g i una diferència estadística lleu entre el grau 1 i el 2f. Aquests resultats es mostren a la Taula 3 i a la Figura 14. La rellevància estadística lleu entre les lesions de primer grau i grau 2f ens porta a pensar que la ruptura que podria existir en el grau 2f (no detectable avui dia per la RMN) és tan petita que la recuperació i el temps fins al RTP podria ser similar. La gran diferència les trobem entre el grau 2f i el 2g, avui dia considerats com a lesions pertanyents al mateix grup però amb pronòstic molt diferent entre ells.

6.2. Segon article

Aquest segon projecte de L-BIA desenvolupat pel departament mèdic del Futbol Club Barcelona, avalua la capacitat del mètode L-BIA per diferenciar les lesions musculars segons la seva ubicació anatòmica en lesió tendinosa, de la unió miotendinosa (MTJ) i la unió miofascial (MFJ), prèviament diagnosticades per RMN a les 24 hores de la lesió, i classificades segons la classificació de la British Athletics Muscle Injury Classification (Pollock et al., 2014) i també tenint en compte l'enfocament histo-arquitectònic de la lesió múscul-esquelètica (Balius et al., 2020). El descobriment més important és la bona correlació entre els mètodes de la RMN i la L-BIA en lesions de la unió miotendinosa (MTJ) i de la unió miofascial (MFJ). I també, el fet que es produeixin canvis més elevats en Xc (reactància) i més temps de RTP en les lesions MTJ més greus.

Al comparar el costat lesionat amb el costat no lesionat o sa, tant per les lesions MTJ com per les MFJ, el % de diferència de les mesures de L-BIA concorden amb les troballes de l'examen de RMN a les 24 h després de la lesió. El costat contra lateral no lesionat o sa, es pren com a referència a causa de la simetria individual dels valors de L-BIA entre les zones musculars esquerres i dretes de l'extremitat inferior en jugadors de futbol professionals. Mitjançant un examen de ressonància magnètica, les lesions MFJ mostren un edema més gran i hemorràgies més grans que les lesions MTJ, cosa que justifica el per què en la diferència percentual (diferència en %) del costat lesionat en comparació amb el costat contra lateral no lesionat és major en les lesions MFJ que en les lesions MTJ. Tant en lesions de MTJ com de MFJ, la diferència de % en Xc va ser superior al % de diferència de R. Segons les nostres troballes, per avaluar els canvis anatòmics produïts en MTJ i MFJ, 24 h després de la lesió per L-BIA, el Xc és la variable més sensible.

Tot i que les lesions que afecten únicament a la estructura del tendó són els casos més greus (Crema et al., 2016), el mètode L-BIA és completament insensible als canvis anatòmics produïts en les lesions tendinoses. Afortunadament, també són menys habituals en jugadors de futbol professionals (Crema et al., 2016). Per ressonància magnètica, les lesions tendinoses presenten menys edema i menys sagnat en comparació amb les lesions MTJ i MFJ. En la lesió intratendinosa, la afectació cel·lular és menor que en les lesions musculars i, en general, presenten menys edema i sagnat que les lesions MTJ i MFJ en seqüències sensibles als líquids de ressonància magnètica. En les lesions intratendinoses agudes, no hi ha cap component inflamatori important i el seu procés de reparació segueix les línies de formació de cicatrius, provocant la resistència a la tracció del tendó curat, com el tendó sa (Nourissat et al., 2016). Cal aclarir que, un tendó intramuscular com el septe del recte anterior té més vascularització i per tant poden tenir més edema i sagnat que a una lesió d'un tendó aïllat (Brukner i Connell 2016).

Comparant el % de diferència de les lesions MTJ amb el % de diferència de les lesions MFJ, així com en la diferència en l'examen de ressonància magnètica a les 24 h després de la lesió, tant per edema produït a la zona de la lesió (% diferència R) com per la quantitat de disrupció cel·lular (% diferència Xc), el mètode L-BIA distingeix entre les lesions MTJ i MFJ. La diferència del % d'angle de fase està més estretament relacionada amb els canvis produïts a la Xc que amb els produïts a la R per a la relació geomètrica entre ells (Lukaski 1996, Lukaski et al., 2019).

En el futbol professional, les lesions musculars es produeixen amb més freqüència a la unió miotendinosa (MTJ), especialment en la musculatura isquiotibial (Crema et al., 2016) que tenen com a objectiu principal la transmissió de la força en la carrera (Balius et al., 2018). En aquest estudi, 26 de les 37 lesions es van produir a la unió miotendinosa, i es van classificar en grau 1, grau 2 i 3, segons la seva gravetat. Totes elles van mostrar una disminució notable de R i Xc, essent el canvi més gran observat a la Xc. A més, aquest canvi va ser encara més gran en el grau 3 de la lesió MTJ després de comparar el costat lesionat amb el costat contra lateral sa. El % de diferència de les lesions MTJ grau 1 en comparació amb el % diferència de les lesions MTJ de grau 2 i les MTJ de grau 3, va explicar que, com més greu és la lesió, es troben canvis més elevats en R i Xc, especialment en Xc; i que es relaciona amb el "gap" muscular trobat a l'examen de ressonància magnètica 24 hores després de la lesió. De manera similar a la cicatrització de ferides (Lukaski i Moore 2012), les lesions musculars es classifiquen segons la ubicació anatòmica, la diferència % en Xc (interrupció cel·lular, "gap" muscular) està relacionada amb la gravetat de la lesió. Pel que fa a RTP (en dies), no es van trobar diferències entre lesions MTJ i MFJ. No obstant això, segons la gravetat de les lesions de MTJ, es van trobar diferències de dies de RTP entre les lesions MTJ de grau 1 i 2 i les de grau 3. Les lesions amb major grau de gravetat es van associar amb més dies de RTP.

El pronòstic dels dies de RTP està condicionada per la gravetat de la lesió (Pedret et al., 2015, Balius et al., 2018, 2020) i per la unió mioconnectiva implicada. Els dies fins al RTP estan fortament associats amb els canvis en Xc (retracció de les fibres musculars quantificades en un percentatge diferent de Xc), és a dir, la severitat de les lesions es reflecteix en canvis més elevats en Xc i un temps més llarg de RTP. La recuperació de lesió està relacionada amb un reajustament del paràmetre Xc més proper al valor del costat contra lateral sa amb una diferència del % inferior al 15% en les lesions musculars més greus (Nescolarde et al., 2013). És important comentar que per les mesures en músculs lesionats amb L-BIA fins al RTP, cada jugador és la seva pròpia referència (Nescolarde et al., 2013). El paper de la ressonància magnètica és clau per al diagnòstic i el pronòstic de les lesions i, per tant, és una gran eina per a la predicció de RTP. Tot i això, no és l'únic criteri a tenir en compte. El pronòstic del temps de RTP dels metges

del FCB es basa en l'orientació del club tenint en compte no només criteris d'imatge, sinó també proves específiques, avaluació de les dades del GPS, i fins i tot de l'estat psicoemocional del jugador.

CONCLUSIONS

7. CONCLUSIONS

En jugadors professionals de futbol i futbol sala el mètode de L-BIA és capaç de diferenciar la lesió muscular d'acord amb el grau de severitat, segons el "gap" muscular, i de la localització anatòmica; atenent a si la lesió és a la unió miotendinosa, (MTJ) o a la unió miofascial (MFJ).

Les lesions musculars amb un percentatge de canvi més gran en Xc (-24 a -43%) presenten un RTP més llarg (38 a 66 dies), d'aquí que L-BIA podria ajudar en el diagnòstic de la lesió muscular i contribuir a donar un pronòstic per el RTP.

El paràmetre més discriminant per a la classificació de la lesió muscular segons el "gap" muscular i la localització anatòmica és la reactància capacitiva (Xc).

Segons la localització anatòmica, les lesions MTJ van presentar un % de diferència des de -10 a -30% respecte al costat contra lateral no lesionat %, mentre que les lesions MFJ van presentar un % de diferència des de -25 fins a 42%. El mètode de L-BIA és insensible a la detecció i seguiment de lesions tendinoses aïllades.

Segons el "gap" muscular, els percentatges de diferència van ser des de -10 a -14% per a les lesions MTJ grau-1, des de -16 a -23% per a les lesions MTJ grau-2 i des de -23 a -43% per a les lesions MTJ grau-3.

En jugadors professionals de futbol i futbol sala, no lesionats, existeix una simetria en els paràmetres de L-BIA mesurats en extremitat inferior dreta i extremitat inferior esquerra.

Mesures de L-BIA realitzades en els 4 grans grups musculars d'estudi (isquiotibials, quàdriceps, adductors i tríceps sural) no presenten canvis significatius en jugadors no lesionats de futbol sala en mesures realitzades tant a l'inici com al final de temporada.

TREBALLS PUBLICATS

8. TREBALLS PUBLICATS

8.1. Articles en revistes

8.1.1. Lexa Nescolarde, Joaquim Terricabras, Sandra Mechó, Gil Rodas, Javier Yanguas (2020): Differentiation Between Tendinous, Myotendinous and Myofascial Injuries by L-BIA in Professional Football Players. *Frontiers in Physiology* (Aprovat 12 agost de 2020). *Frontiers in Physiology*. Impact Factor: 3.367/quartile: Q1/area: Physiology.

8.1.2. Nescolarde L, Yanguas J, Terricabras J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J and Rodas G (2017): Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: Clinical prognosis. *Physiol Meas*, 38(7): L1-L9. doi: 10.1088/1361-6579/aa7243. Impact Factor: 2.006/quartile: Q2-T1/area: Engineering, Biomedical.

8.2. Comunicacions congressos internacionals

8.2.1. Nescolarde L, Terricabras J, Yanguas J, Alomar X, Rodas G. Could L-BIA differentiate myotendinous junction injury from myofascial injuries?. XXVII Isokinetic Medical Group Conference, Football Medicine Outcomes, Barcelona (Spain), June 2018. ISBN 9788860285416, pp 372, 385.

8.2.2. Nescolarde L, Yanguas J, Terricabras J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J and Rodas G. Return-to-play according to GAP in muscle injuries by L-BIA measurements: clinical prognosis. XXVI International Conference on Sports Rehabilitation and Traumatology. Barcelona (Spain), 13th – 15th May, 2017. ISBN 9788860285058, pp 88, 101.

LIMITACIÓ DE LA TESI

9. LIMITACIÓ DE LA TESI

Per estendre l'ús de L-BIA com a mètode de suport a la ressonància magnètica (RMN) i a la ecografia múscul-esquelètica (US) es necessari: incrementar la mida de mostra, i estendre-ho a altres clubs esportius incloent als equips professionals de futbol femení.

TREBALLS DE FUTUR

10. TREBALLS DE FUTUR

La bioimpedància pot contribuir a categoritzar millor les lesions musculars i, al temps, contribuir a afinar el pronòstic de RTP. En un futur potser podria estalviar altres exploracions ara encara considerades imprescindibles actualment.

1. Estendre aquests resultats i ampliar la mostra amb jugadors professionals de futbol d'altres divisions incloent jugadores de futbol femení, segons la classificació de lesió muscular de BAMIC (doi:10.1136/bjsports-2013-093302) tenint en compte la història d'arquitectura muscular (doi: 10.1177/2325967120909090).
2. Estudiar per L-BIA l'atrofia muscular secundària a lesions de genoll.
3. Estudiar per L-BIA l'impacte de la sarcopènia.

REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES

11. REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Ahmad, CS; Redler, LH; Ciccotti, MG; Maffulli, N; Longo, UG; Bradley, J. (2013). Evaluation and management of hamstring injuries. *Am J Sports Med.* 41, 2933-47. doi: 10.1177/0363546513487063
Am. J. Clin. Nutr. 64 391S-404S.
- Askling, CM; Nilsson, J; Thorstensson, A. (2010). A new hamstring test to complement the common clinical examination before return to sport after injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 18, 1798-803. doi: 10.1007/s00167-010-1265-3.
- Balius, R; Alomar, X; Pedret, C; Blasi, M; Rodas, G; Pruna, R; Peña-Amaro, J; Fernández-Jaén, T. (2018). Role of the Extracellular Matrix in Muscle Injuries: Histoarchitectural Considerations for Muscle Injuries. *Orthop J Sports Med.* 6, 2325967118795863. doi: 10.1177/2325967118795863.
- Balius, R; Blasi, M; Pedret, C; Alomar, X; Peña-Amaro, J; Vega, JA; Pruna, R; Ardèvol, J; Álvarez, G; De la Fuente, J; Fernández-Jaén, T; Järvinen, TAH; Rodas, G. (2020). A Histoarchitectural Approach to Skeletal Muscle Injury: Searching for a Common Nomenclature. *Orthop J Sports Med.* 8, 2325967120909090. doi: 10.1177/2325967120909090.
- Barça Innovation Hub. Available at: <https://barcainnovationhub.com/muscle-injury-guide-preventing-and-treating-muscle-injuries-in-football/>. (Accessed May 24, 2020).
- Brooks, JHM; Fuller, CW; Kemp, SPT; Reddin, DB. (2006). Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am J Sports Med.* 34, 1297-306. doi: 10.1177/0363546505286022.
- Brukner, P; Connell, D. (2016). Serious thigh muscle strains: beware the intramuscular tendon which plays an important role in difficult hamstring and quadriceps muscle strains. *Br J Sports Med.* 50, 205-8. doi.org/10.1136/bjsports-2015-095136.
- Connell DA, Schneider-Kolsky ME, Hoving JL. (2014). Longitudinal study comparing sonographic and RMN assessments of acute and healing hamstring injuries *Am. J. Roentgenol.* 183:975-84.
- Crema, MD; Guermazi, A; Tol, JL; Niu, J; Hamilton, B; Roemer, FW. (2016). Acute hamstring injury in football players: Association between anatomical location and extent of injury-A large single-center RMN report. *J Sci Med Sport.* 19, 317-22. doi: 10.1016/j.jsams.2015.04.005.
- Ekstrand, J; Hägglund, M; Waldén, M. (2011). Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study. *Br J Sports Med.* 45, 553-8. doi: 10.1136/bjism.2009.060582.
- Ekstrand, J; Healy, JC; Waldén, M; Lee, JC; English, B; Hägglund, M. (2012). Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of RMN findings with return to play. *Br J Sports Med.* 46, 112-7. doi: 10.1136/bjsports-2011-090155.
- Ekstrand, J; Waldén, M; Hägglund, M. (2016). Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br J Sports Med.* 50, 731-7. doi: 10.1136/bjsports-2015-095359.
- Elliott, MC; Zarins, B; Powell, JW; Kenyon, CD. (2011). Hamstring muscle strains in professional football players: a 10-year review. *Am J Sports Med* 39, 843-50. doi: 10.1177/0363546510394647.
- Engelbrechtsen, L; Soligard, T; Steffen, K; Alonso, JM; Aubry, M; Budgett, R; Dvorak, J; Jegathesan, M; Meeuwisse, WH; Mountjoy, M; Palmer-Green, D; Vanhegan, I; Renström, PA. (2013) Sports injuries and illnesses during the London Summer Olympic Games 2012. *Br. J. Sports Med.* 47, 407-414. doi:10.1136/bjsports-2013-092380.
- Hägglund, M; Waldén, M; Bahr, R; Ekstrand, J. (2005). Methods for epidemiological study of injuries to professional football players: developing the UEFA model. *Br J Sports Med.* 39, 340-346. doi: 10.1136/bjism.2005.018267.
- Hamilton B, Valle X, Rodas G, Til L, Pruna Grive R, Gutierrez Rincon JA, and Tol JL 2014 Classification and grading of muscle injuries: a narrative review *Br. J. Sports. Med.* 0 1-7.
- Heiderscheit, BC; Sherry, MA; Silder, A; Chumanov, ES; Thelen, DG. (2010). Hamstring strain injuries: recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention. *J Orthop Sports Phys Ther.* 40, 67-81. doi:10.2519/jospt.2010.3047.
- Junge, A; Engelbrechtsen, L; Mountjoy, ML; Alonso, JM; Renström, PA; Aubry, MJ; Dvorak, J. (2009). Sports injuries during the Summer Olympic Games 2008. *Am J Sports Med.* 37 2165-72. doi: 10.1177/0363546509339357.
- Lukaski HC, Moore M. (2012). Bioelectrical impedance assessment of wound healing *J. Diabetes. Sci.*
- Lukaski, H.C. (1996). Biological indexes considered in the derivation of the bioelectrical impedance analysis. *Am J Clin Nutr.* 64(3Suppl), 397S-404S. doi: 10.1093/ajcn/64.3.397S.
- Lukaski, H.C. (2013). Evolution of bioimpedance: a circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research. *Eur J Clin Nutr.* 67(Suppl 1), S2-S9. doi: 10.1038/ejcn.2012.149.
- Lukaski, HC; Piccoli, A. (2012). Bioelectrical impedance vector analysis for assessment of hydration in physiological states and clinical conditions In: Preedy V (ed) *Handbook of Anthropometry* Springer: London UK 287-315.
- Lukaski, H; Vega Diaz, N; Talluri, A; Nescolarde, L. (2019). Review: Classification of Hydration in Clinical Conditions: Indirect and Direct Approaches Using Bioimpedance. *Nutrients.* 11, 809; doi:10.3390/nu11040809.
- Lukaski, HC; Moore, M. (2012). Bioelectrical impedance assessment of wound healing *J. Diabetes Sci Technol.* 6, 209-12. doi: 10.1177/193229681200600126.

- Mueller-Wohlfahrt, HW; Haensel, L; Mithoefer, K; Ekstrand, J; English, B; McNally, S; Orchard, J; van Dijk, CN; Kerkhoffs, GN; Schamasch, P; Blotner, D; Swaerd, L; Goedhart, E; Ueblacker, P. (2013). Terminology and classification of muscle injuries in sport: a consensus statement. *Br. J. Sports Med.* 47, 342-50. doi:10.1136/bjsports-2012-091448.
- Nescolarde, L; Lukaski, H; De Lorenzo, A; de-Mateo-Silleras, B; Redondo-Del-Río, MP; Camina-Martín, MA. (2016). Different displacement of bioimpedance vector due to Ag/AgCl electrode effect. *Eur J Clin Nutr.* 70, 1401-1407. doi: 10.1038/ejcn.2016.121.
- Nescolarde, L; Yanguas, J; Lukaski, H; Alomar, X; Rosell-Ferrer, J; Rodas, G. (2013). Localized bioimpedance to assess muscle injury. *Physiol Meas.* 34, 237-245. doi: 10.1088/0967-3334/34/2/237.
- Nescolarde, L; Yanguas, J; Lukaski, H; Alomar, X; Rosell-Ferrer, J; Rodas, G. (2015). Effects of muscle injury severity on localized bioimpedance measurements. *Physiol Meas.* 36, 27-42. doi: 10.1088/0963334/36/1/27.
- Nescolarde, L; Yanguas, J; Terricabras, J; Lukaski, H; Alomar, X; Rosell-Ferrer, J; Rodas, G. (2017). Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: Clinical prognosis. *Physiol Meas.* 38, L1-L9. doi: 10.1088/1361-6579/aa7243.
- Nescolarde, L; Terricabras, J; Mechó, S; Rodas, G; Yanguas, J. (2020). Differentiation between tendinous, myotendinous and myofascial injuries by L-BIA in professional football players. *Frontiers in Physiology.* 11:574124. doi: 10.3389/fphys.2020.574124.
- Nourissat, G; Berenbaum, F; Duprez, D. (2015). Tendon injury: from biology to tendon repair. *Nat Rev Rheumatol.* 11, 223-33. doi: 10.1038/nrrheum.2015.26.
- Novacheck, TF. (1995). The biomechanics of running. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation* 5 (4): 273–79. doi.org/10.3233/BMR-1995-5404.
- Orchard, JW. (2001). Intrinsic and extrinsic risk factors for muscle strains in Australian Football. *Am J Sports Med.* 29 (3): 300–303. doi.org/10.1177/03635465010290030801.
- Orchard, J; Best, TM; Verrall, GM. (2005). Return to play following muscle strains. *Clin J Sport Med.* 15 (6): 436–41. doi.org/10.1097/01.jsm.0000188206.54984.65.
- Orchard, JW. (2012). Hamstrings are most susceptible to injury during the early stance phase of sprinting. *Br J Sports Med.* 46 (2): 88–89. https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090127.
- Patel, A; Chakraverty, J; Pollock, N; Chakraverty, R; Suokas, AK; James, SL. (2015). British athletics muscle injury classification: a reliability study for a new grading system. *Clin Radiol.* 70, 1414-20. doi: 10.1016/j.crad.2015.08.009.
- Pedret, C; Rodas, G; Balias, R; Capdevila, LI; Bossy, M; Vernooij, RWM; Alomar, X. (2015). Return to play after soleus muscle injuries. *Orthop J Sports Med.* 3, 2325967115595802. doi: 10.1177/2325967115595802.
- Pollock, N; Patel, A; Chakraverty, J; Suokas, A; James, SL; Chakraverty, R. (2016). Time to return to full training is delayed and recurrence rate is higher in intratendinous ('c') acute hamstring injury in elite track and field athletes: clinical application of the British Athletics Muscle Injury Classification. *Br J Sports Med.* 50, 305-10. doi: 10.1136/bjsports-2015-094657.
- Pollock, N; Steven, LJ; Lee, JC; Chakraverty, R. (2014). British athletics muscle injury classification. *Br J Sports Med.* 48, 1347-1351; doi:10.1136/bjsports-2013-093302.
- Reurink G, Brilman EG, de Vos RJ, Maas M, Moen MH, Weir A, Goudswaard GJ, Tol JL. (2015). Magnetic resonance imaging in acute hamstring injury: can we provide a return to play prognosis? *Sports. Med.* 45(1):133-46.
- Reurink, G1; Goudswaard, GJ; Tol, JL; Almusa, E; Moen, MH; Weir, A; Verhaar, JA; Hamilton, B; Maas, M. (2013). RMN observations at return to play of clinically recovered hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 48, 1370-1376. doi: 10.1136/bjsports-2013-092450.
- Rutkove, S; Pacheck, A; Sanchez, B. (2017). Sensitivity distribution simulations of surface electrode configurations for electrical impedance myography. *Muscle Nerve.* doi: 10.1002/mus.25561.
- Rutkove, SB. (2009). Electrical impedance myography: background, future state and future directions. *Muscle Nerve* 40 936-46. doi: 10.1002/mus.21362.
- Rutkove, SB; Fogerson, PM; Garmirian, LP; Tarulli, AW. (2008). Reference values of 50-kHz electrical impedance myography. *Muscle Nerve.* 38, 1128-32. doi: 10.1002/mus.21075.
- Sanchez B, Pacheck A, Rutkove SB 2016 Guidelines to electrode positioning for human and animal electrical impedance myography research *Scientific Reports*, 6:32615, DOI: 10.1038.
- Schneider-Kolsky, ME; Hoving, JL; Warren, P; Connell, DA. (2006). A comparison between clinical assessment and magnetic resonance imaging of acute hamstrings injuries *Am J Sports Med.* 34, 1000-07. doi.org/10.1177/0363546505283835.
- Slavotinek JP, Verrall GM, Fon GT 2002 Hamstring injury in athletes: using MR imaging measurements to compare extent of muscle injury with amount of time lost from competition *Am. J. Roentgenol.*
- Snedeker, JG; Foolen, J. (2017). Tendon injury and repair - a perspective on the basic mechanisms of tendon disease and future clinical therapy. *Acta Biomater.* 63, 18-36. doi: 10.1016/j.actbio.2017.08.032. *Technol.* 6 209-12.
- Ueblacker, P; Müller-Wohlfahrt, HW; Ekstrand, J. (2015). Epidemiological and clinical outcome comparison of indirect ('strain') versus direct ('contusion') anterior and posterior thigh muscle injuries in male elite football players: UEFA Elite League study of 2287 thigh injuries (2001-2013). *Br J Sports Med.* 49 (22): 1461–65. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094285.

- Valle, X; Alentorn-Geli, E; Tol, JL; Hamilton, B; Garret, WE; Pruna, R; Til, LL; Gutierrez, JA; Alomar, X; Balias, R; Malliaropoulos, N; Monllau, JC; Whiteley, R; Witvrouw, E; Samuelsson, K; Rodas, G. (2017). Muscle Injuries in Sports: A New Evidence-Informed and Expert Consensus-Based Classification with Clinical Application. *Sports Med.* 2017 47, 1241-1253. doi: 10.1007/s40279-016-0647-1.
- Valle, X; Mechó, S; Pruna, R; Pedret, C; Isern, J; Monllau, JC; Rodas, G. (2019). The MLG-R muscle injury classification for hamstrings. Examples and guidelines for its use. *Apunts Sports Med.* 54, 73-9.
- Vermeulen R, Almusa E, Buckens S, Six W, Whiteley R, Reurink G, Weir A, Moen M, Gino M M J Kerkhoffs GMMJ, Tol JL (2019). Complete resolution of a hamstring intramuscular tendon injury on MRI is not necessary for a clinically successful return to play. *Br J Sports Med.* doi: 10.1136/bjsports-2019-101808.
- Verrall GM, Slavotinek JP, Barnes PG, Fon GT, Esterman A 2006 Assessment of physical examination and magnetic resonance imaging findings of hamstring injury as predictors for recurrent injury. *J Orthop. Sports. Phys. Ther.* 36:215-24.
- Volterrani, D; Erba, PA; Carrió, I; Strauss, W; Mariani, G. (2019). Nuclear Medicine Textbook: Methodology and Clinical Applications. Ed. Springer. ISBN (eBook) 978-3-319-95564-3. doi: 10.1007/978-3-319-95564-3.
- Wangensteen, A; Guermazi, A; Tol, JL; Roemer, FW; Hamilton, B; Alonso, JM; Whiteley, R; Bahr, R. (2018). New RMN muscle classification systems and associations with return to sport after acute hamstring injuries: a prospective study. *Eur Radiol.*
- Wangensteen, A; Tol, JL; Roemer, FW; Bahr, R; Dijkstra, HP; Crema, MD; Farooq, A; Guermazi, A. (2017). Intra- and interrater reliability of three different RMN grading and classification systems after acute hamstring injuries. *Eur J Radiol.* 89, 182-190. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.02.010.

ANEXES



Universitat Autònoma de Barcelona
Departament de Cirurgia
Programa de Doctorat en Cirurgia i Ciències Morfològiques

Joaquim Terricabras Genís
Mas Serrarols, s/n
08551 Tona

Vista la instància presentada per en/na Joaquim Terricabras Genís, de sol·licitud de presentació de tesi doctoral com a compendi de publicacions,

De conformitat amb el que disposa la Normativa acadèmica de la UAB aplicable als estudis universitaris regulats de conformitat amb el RD 1393/2007, de 29 d'octubre, modificat pel RD 861/2010, de 2 de juliol (text refós aprovat per l'Acord de Consell de Govern de 2 de març de 2011),

RESOLC:

Acceptar la presentació de la tesi doctoral de Joaquim Terricabras Genís com a compendi de publicacions amb els articles següents:

1. Títol: "Differentiation between tendinous, myotendinous and myofascial injuries by L-BIA in professional football players".

Autors: Lexa Nescolarde, Joaquim Terricabras, Sandra Mechó, Gil Rodas, Javier Yanguas.

Dades de la publicació: *Frontiers in Physiology, Exercise Physiology*. Volum 11, Article 574124. Data d'acceptació: 14/08/2020.

DOI: doi: 10.3389/fphys.2020.574124

2. Títol: "Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: clinical prognosis".

Autors: L Nescolarde, J Yanguas, J Terricabras, H Lukaski, X Alomar, J Rosell-Ferrer, G Rodas.

Dades de la publicació: *IOP Publishing. ©2017 Institute of Physics and Engineering in Medicine*. *Physiol. Meas.* 38 (2017) L1–L9. Data d'acceptació: 10/05/2017.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa7243>

Passeig de la Vall d'Hebron, 119 - 129 - 08035 Barcelona. Spain
Tel: 34 - 93 428 56 21 - Fax: 34 - 93 428 32 64
doctorat.cirurgia@uab.cat
<http://doctoratcirurgia.uab.cat/>



Universitat Autònoma de Barcelona
Departament de Cirurgia
Programa de Doctorat en Cirurgia i Ciències Morfològiques

La Comissió Acadèmica del Programa de Doctorat en Cirurgia i Ciències Morfològiques,

JAVIER SERRA
ARACIL - DNI
21635429L

Firmado digitalmente
por JAVIER SERRA
ARACIL - DNI
21635429L
Fecha: 2020.10.14
21:48:34 +02'00'

Xavier Serra Aracil
Coordinador del programa de doctorat

Segell

Barcelona, 13 d'octubre de 2020



Universitat Autònoma de Barcelona
Departament de Cirurgia
Programa de Doctorat en Cirurgia i Ciències Morfològiques

Contra aquesta resolució, que no esgota la via administrativa, les persones interessades poden interposar recurs d'alçada davant del Rector Magnífic de la UAB, en el termini d'un mes, a comptar des del dia següent a la recepció d'aquesta notificació o, si s'escau, des del dia següent de la seva publicació, de conformitat amb el que preveu l'article 115 de la Llei 30/1992, de 26 de novembre, de Règim Jurídic de les Administracions Públiques i del Procediment Administratiu Comú, modificada per la Llei 4/1999, de 13 de gener, i l'article 76 de la Llei 26/2010, de 3 d'agost, de Règim Jurídic i de Procediment de les Administracions Públiques de Catalunya de la Generalitat de Catalunya.



Differentiation Between Tendinous, Myotendinous and Myofascial Injuries by L-BIA in Professional Football Players

Lexa Nescolarde^{1*}, Joaquim Terricabras^{2,3}, Sandra Mechó^{2,4}, Gil Rodas² and Javier Yanguas^{2*}

¹ Department of Electronic Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, ² Medical Department, Futbol Club Barcelona, FIFA Medical Center of Excellence, Barcelona, Spain, ³ Department of Surgery, Faculty of Medicine, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain, ⁴ Department of Radiology, SCIAS-Hospital de Barcelona, Barcelona, Spain

OPEN ACCESS

Edited by:

Emiliano Cè,
University of Milan, Italy

Reviewed by:

Stefano Longo,
University of Milan, Italy
Rod Whiteley,
Aspetar Hospital, Qatar

*Correspondence:

Lexa Nescolarde
lexa.nescolarde@upc.edu
Javier Yanguas
xavier.yanguas@fcbarcelona.cat

Specialty section:

This article was submitted to
Exercise Physiology,
a section of the journal
Frontiers in Physiology

Received: 18 June 2020

Accepted: 14 August 2020

Published: 04 September 2020

Citation:

Nescolarde L, Terricabras J,
Mechó S, Rodas G and Yanguas J
(2020) Differentiation Between
Tendinous, Myotendinous
and Myofascial Injuries by L-BIA
in Professional Football Players.
Front. Physiol. 11:574124.
doi: 10.3389/fphys.2020.574124

Purpose: To differentiate by localized bioimpedance (L-BIA) measurements 24 h after injury, between tendinous, myotendinous junction (MTJ), and myofascial junction (MFJ) injuries, previously diagnosed by MRI exam. To evaluate by L-BIA, the severity of MTJ injuries graded from 1 to 3, and to determine the relationship between days to return to play (RTP) and L-BIA measurements.

Methods: 3T MRI and tetra polar L-BIA was used to analyzed 37 muscle injuries 24 h after injury in 32 male professional football players, ($23.5 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2}$; $1.8 \pm 0.1 \text{ m}$; 20–30 year.) between the 2016–2017 and 2017–2018 seasons. Muscle injuries were classified by *The British Athletics Muscle Injury Classification* (BAMIC). Percentage difference of L-BIA parameters [resistance (R), reactance (Xc), and phase angle (PA)] of the injured side were calculated considering contralateral non-injured side as the reference value.

Results: According to BAMIC classification and by MRI exam, we found tendinous ($n = 4$), MTJ ($n = 26$), and MFJ ($n = 7$) muscle injuries. In addition, MTJ injuries were grouped according to the severity of injury in grade 1 ($n = 11$), grade 2 ($n = 8$), and grade 3 ($n = 7$). Significant decrease ($P < 0.01$) was found in the L-BIA parameters R, Xc, and PA, in both MTJ and MFJ as well as in the different grades of MTJ injuries. In particular, in Xc ($P < 0.001$), which is related to muscle cell disruption. Regarding days to RTP, there was statistical significance among the three different grades of MTJ injuries ($P < 0.001$), especially when grade 1 was compared to grade 3 and grade 2 compared to 3.

Conclusion: L-BIA is a complementary method to imaging diagnostic techniques, such as MRI and US, to quantify MTJ and MFJ injuries. In addition, the increase in the severity of the MTJ injury resulted in higher changes of the Xc parameter and longer time to RTP.

Keywords: localized bioimpedance, MRI, myotendinous junction, grade of muscle injury, professional football players

INTRODUCTION

Muscle injuries of lower limbs are the most common injury types in athletes (Junge et al., 2009; Engebretsen et al., 2013), accounting for more than 30% of injuries in professional football players (Ekstrand et al., 2011; Elliott et al., 2011). This trend seems to keep growing in professional male football players in Europe (Ekstrand et al., 2016).

An optimal diagnosis of muscle injury determines the severity of the injury, time to return to play (RTP) and risk of re-injury. However, determining the optimal RTP in professional football players is difficult due to the variability and complexity of the process. The decision of whether an athlete can safely RTP remains challenging (Asking et al., 2010) with ~ 60% of re-injuries few weeks after RTP (Brooks et al., 2006; Heiderscheit et al., 2010). Imaging, either through magnetic resonance imaging (MRI) and/or ultrasound imaging (US) is key to assess muscle injuries and prognosis. However, it is still debated whether MRI report is a good predictor for time to RTP (Reurink et al., 2014). This is probably due to the lack of consensus in the diagnosis and classification of muscle injuries.

In the last 8 years, there have been proposed multiple different systems of muscle injury classifications based on clinical examination and radiological findings, especially through MRI (Mueller-Wohlfahrt et al., 2013; Pollock et al., 2014; Valle et al., 2017). The *British Classification of Muscle Injuries of Athletics, BAMIC* (Pollock et al., 2014), based on MRI findings, is one of the most internationally used and classifies muscle injuries according to anatomical location: myofascial, muscle-tendon junction, and intratendinous; as well as according to the severity of the injury, grading from 0 to 4. Moreover, the BAMIC specifies that each hamstring muscle injury localization has different RTP. The criteria is based on the tissue type involved and the extent of the injury, being the intratendinous injury the one with longer time to RTP and higher recurrence rate (Patel et al., 2015; Pollock et al., 2016; Wangensteen et al., 2017).

The classification proposed by Pollock et al. (2014) agree with the idea of a histoarchitectural approach to skeletal muscle injury from Balius et al. (2020) describing that when myoconnective junction is affected, the injury can be located either in a MTJ (the injury affects an aponeurosis or a tendinous expansion attached to muscle fibers) or in the myofascial junction (MFJ) (when the injury involves muscle fiber and their perimysium and/or epimysium). And when an injury in the myoconnective junction has a tendon gap (by MRI), the injury will have worst prognosis, require longer time to RTP and could present greater risk of re-injury compared to others injuries. However, a study of full-thickness intramuscular tendon damage, did not show re-injury after 12 months (Vermeulen et al., 2019). Regarding MTJ and MFJ injuries, it is not clear which one has better prognosis and, consequently, less time to RTP (Balius et al., 2020).

Mono-frequency non-invasive electrical bioimpedance is associated with the injection of low-intensity sinusoidal current at 50 kHz into a biological conductor resulting in measuring values of resistance (R), associated with the hydration state of

soft tissue, and reactance (Xc) associated with the integrity of soft tissue structures (Lukaski, 1996; Lukaski and Piccoli, 2012; Lukaski, 2013). The current is delayed by the current flowing through the cell membranes (capacitive element, C). The $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ is an indirect measure of the amount of applied current that penetrates to the cell membranes (Lukaski et al., 2019). That is, bioimpedance is a complex number $Z = R - jX_c$, whose module, Z is obtained by $\sqrt{(R)^2 + (X_c)^2}$ and phase angle (PA) is the $\tan^{-1} \left(\frac{X_c}{R} \right)$.

When bioimpedance measurements are taken on a specific human body area, they are known as localized bioimpedance measurements (L-BIA). One of the first clinical applications of non-invasive L-BIA at 50 kHz is related to electrical impedance myography (EIM) in neuromuscular diseases demonstrated significantly reduced values of R, Xc, and PA due to muscle fiber atrophy, connective tissue accretion, fat infiltration, and edema (Rutkove et al., 2008; Rutkove, 2009). Lukaski and Moore (2012), using L-BIA with phase-sensitive BIA analyzer at 50 kHz, identified in lower leg wounds, a moderate decrease in R, Xc, and PA acutely after removing damaged tissue from a wound. Notably, the decreased occurred during infection and R, Xc, and PA values were restored after healing. Therefore, L-BIA could provide a safe and effective method to detect changes at cellular level.

In professional football players (Nescolarde et al., 2013, 2015), L-BIA measurements using 50 kHz phase-sensitive BIA analyzer, are in agreement with the severity of muscle injury, diagnosed by MRI 24 h after injury, according to muscle gap and independently to anatomical location. L-BIA measurements 24 h after injury showed a significant reduction of R, Xc and PA directly related to the severity of muscle injuries, being more noticeable in Xc than in R. Moreover, more severe injuries showed larger percentage difference in Xc (% difference) (Nescolarde et al., 2013, 2015). Sometimes there is a great challenge for the sports physicians and radiologists to be able to confirm diagnosis and especially the prognosis. Accurately quantifying the severity of muscle injury could help to improve the diagnosis of muscle injury.

This work aims (1) to differentiate by L-BIA, according to anatomical location, between tendinous, MTJ and MFJ injuries, previously diagnosed by MRI exam 24 h after injury; (2) to determine the severity of MTJ injuries graded from 1 to 3 by L-BIA; and (3) to determine the relationship between days to return to play (RTP) and L-BIA measurements 24 h after injury with severity of the injury.

MATERIALS AND METHODS

Participants

Futbol Club Barcelona (FCB) Medical Department studied prospectively 37 muscle injuries of 32 male professional football players, (23.5 ± 1.5 kg m⁻²; 1.8 ± 0.1 m; 20–30 year.) between the 2016–2017 and 2017–2018 seasons to assess and compare L-BIA and MRI findings. This

study only evaluates injuries of football players (both during matches and training sessions) that presented acute muscle injury, to whom the medical team prescribed an MRI in the first 24 h after the injury, and in those cases that L-BIA study was performed during the same period of time.

Magnetic Resonance Imaging (MRI)

Magnetic resonance imaging is not only the gold standard technique of choice in professional football for diagnosing muscle injuries that has proven to be an essential tool in the assessment of muscle injuries in elite athletes, but is also rapidly becoming the imaging technique of choice for the evaluation of the connective tissue injuries (Schneider-Kolsky et al., 2006; Ekstrand et al., 2012). This imaging technique allows specialists to define muscle injury with excellent resolution of the three axes, including oblique planes, and assessing deep muscles by identifying the injury site from the origin, proximal myotendinous junction, muscle belly, distal junction or insertion point (Ahmad et al., 2013).

MRI Protocol

Magnetic resonance imaging was performed on 3T Canon Vantage Titan (Canon Medical Systems, Japan) in FCB Medical Center by a specialist musculoskeletal radiologist (SM) to classify the muscle injury. The specific MRI parameters are a maximum gradient strength of 45, 203 T/m/s Slew Rate, and 32 receiver channels. Axial, Sagittal and Coronal T2 Fat Sat, TR 5200, 5000, and 3700 ms, TE 44–60 ms, Eco train 7.5, SL 2.5–3.5 mm, in-plane resolution 0.9–1.4 mm × 0.88–0.97 mm, FOV 256 × 256, 192 × 272, 288 × 320 mm, and Axial and Coronal TSE T1, TR 900–980 ms, TE 11 ms, Eco train 7.5, SL 2.5–3.5 mm, in-plane resolution 0.71–0.9 mm × 0.71–0.9 mm, FOV 352 × 352, 288 × 320 mm was acquired. On T2 Fat Sat sequences, muscle injuries are detected by the presence of hyperintense fluid accumulation. It is recommended to perform fluid-sensitive sequences (T2-weighted in our case) with intermediate echo time (TE) (e.g., less than 65 ms) to obtain an adequate contrast and spatial resolution of connective tissues. With these sequences we are able to detect edematous changes around the myotendinous, myoaponeurotic, and myofascial junctions, identify small tears in the connective tissue, as well as to delineate intra- or inter-muscular fluid collections or hematomas. T1-weighted sequences are useful in the assessment of hematic collections, in the detection of fatty muscular infiltration, as well as in the detection of scar tissue in chronic injuries that could be detected as chemical shift artifacts in the T2-weighted sequences.

Muscle Injury Grouping Through MRI Exam 24 h After Injury

After MRI exam, 37 muscle injuries were categorized according to *The British Athletics Muscle Injury Classification* (Pollock et al., 2014) and considering the histoarchitectural

approach to skeletal muscle injury (Balius et al., 2020) taking to account:

1. Myoconnective junction affected

- Tendinosis injuries are tears that extend into the tendon.
- Myotendinous junction (MTJ) injuries are high signal change occurs within the muscle or more commonly located exactly at the MTJ.
- Myofascial junction (MFJ) injuries extend from the fascia and demonstrate high signal change on fat-suppressed/STIR sequences within the periphery of the muscle.

2. Severity of the injury, graded from 1 to 4

- Grade 1 injuries are small tears. High signal in MRI extends less than 10% of the cross-sectional area (CSA) of the muscle and over a limited area of less than 5 cm.
- Grade 2 shows hyper signal in MRI measure between 10 and 50% of CSA or extends between 5 and 15 cm within the muscle with a fiber disruption (gap) less than 5 cm.
- Grade 3 injuries show high signal change patterns greater than 50% of the CSA or greater than 15 cm in length.
- Grade 4, complete muscle or tendon tears are not included in this study.

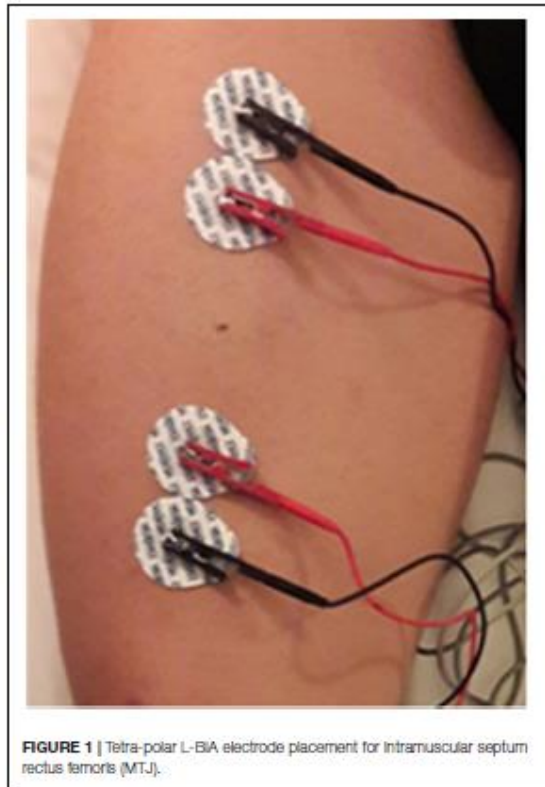


FIGURE 1 | Tetra-polar L-BIA electrode placement for intramuscular septum rectus femoris (MTJ).

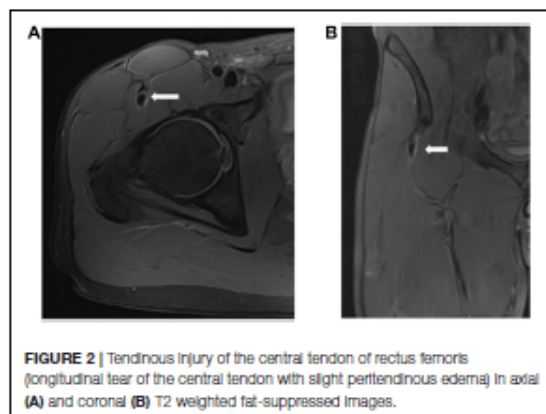


FIGURE 2 | Tendinous injury of the central tendon of rectus femoris (longitudinal tear of the central tendon with slight peritendinous edema) in axial (A) and coronal (B) T2 weighted fat-suppressed Images.

Localized Bioimpedance Measurements (L-BIA)

Tetra polar L-BIA measurements, both in the injured side and the non-injured side, were performed 24 h after occurrence of the injury to quantify the percentage difference in R, Xc, and PA of injured side respect to the contralateral non-injured side. The impact of the severity of muscle injury was characterized by the percentage difference in L-BIA (R, Xc, and PA). All injuries were diagnosed 24 h after injury by MRI exam. The variability of R and Xc (Nescolarde et al., 2015) between left and right non-injured muscle area were studied in 10 non-injured football players on three different days with an interval of 7-day between each measurement. The intra-individual differences in 1/3 proximal quadriceps, 1/3 medium quadriceps, 1/3 proximal hamstrings and 1/3 medium hamstrings ranged from -2.1 to 0.5Ω and the inter-individual differences were lower than 15% (2 SD).

The measurements were taken with a phase-sensitive impedance instrument BIA 101 Anniversary (Akern-Srl, Florence, Italy) that applied a constant sinusoidal alternating current of $245 \mu\text{ARMS}$ at 50 kHz. The range of measure for resistance is $0-1500 \Omega$ and for reactance $0-500 \Omega$, with 2% maximum tolerance. Measurement errors determined with a parallel circuit of precision resistor and capacitor, were $<1 \Omega$ for R and $<2\%$ for Xc.

The adhesive contact electrode Ag/AgCl (COVIDIEN Ref. 31050522, COVIDIEN llc, Mansfield, IL, United States) with R and Xc intrinsic values of 10.89 and 0.30Ω respectively (Nescolarde et al., 2016), was chosen for L-BIA measurements. Similar to previous reports (Nescolarde et al., 2015, 2017) detector voltage electrodes (red) were placed 5 cm proximally and 5 cm distally, respectively, from the center of the injury located by US Aplio i800 (Canon Medical Systems, Japan). Two current injecting electrodes (black) were placed close to the detector voltage electrodes (Figure 1). Because of the proximity of the current-introducing and voltage-detecting electrodes, the inter-tester reproducibility (Nescolarde et al., 2013) of the R and Xc measurements

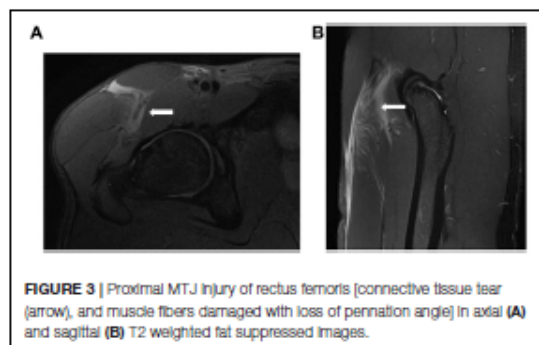


FIGURE 3 | Proximal MTJ injury of rectus femoris [connective tissue tear (arrow), and muscle fibers damaged with loss of pennation angle] in axial (A) and sagittal (B) T2 weighted fat suppressed images.

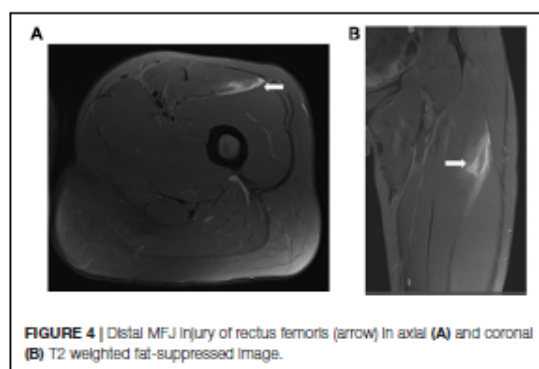


FIGURE 4 | Distal MFJ injury of rectus femoris (arrow) in axial (A) and coronal (B) T2 weighted fat-suppressed Image.

was evaluated by 5 examiners. The range of variability was negligible, 1Ω for R and 0.45Ω for Xc. The mean \pm SD value of R and Xc were 39.6 ± 0.6 and $14.2 \pm 0.5 \Omega$ respectively, with coefficients of variation of 1.4% for R and 3.2% for Xc.

In injuries located near the bone detector, voltage electrodes were placed 10 cm proximally and 10 cm distally, respectively, from the center of the injury to increase the sensitivity of the measurement (Sanchez et al., 2016; Rutkove et al., 2017).

Injury Diagnosis and Return to Play Criteria

Injuries were diagnosed by the medical team of the FCB Medical Department based on clinical history, physical examination, and US and MRI assessment. The establishment of return to play (RTP) criteria was addressed by the FCB Medical Department and team physicians follow the criteria expressed in FCB Muscle Guide 2019 (Barça Innovation Hub, 2020). The RTP (in days) started when the injury occurred and continued beyond the point when the player made his return to unrestricted match play (Hägglund et al., 2005). The RTP plan of FCB is individual avoiding re-injuries due to premature reinstatements.

TABLE 1 | Individual values of L-BIA measurements 24 h after injury [contralateral non-injured side (1), injured side (2) in R, Xc, and PA], including tendinous ($n = 4$), MTJ ($n = 26$), and MFJ ($n = 7$) injuries.

Muscle Injuries	Anatomical location	R (Ω)		Xc (Ω)		PA ($^{\circ}$)	
		Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)	Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)	Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)
1	T1	33.5	32.4	13.9	13.8	22.5	23.1
2	T2	38.8	38.0	17.2	17.0	23.9	24.1
3	T3	39.4	39.7	13.2	13.2	18.5	18.4
4	T4	45.5	44.4	12.8	12.8	15.7	16.1
5	MTJ-Grade 1	32.0	29.0	16.0	14.0	26.6	25.8
6	MTJ-Grade 1	29.0	26.0	14.0	12.0	25.8	24.8
7	MTJ-Grade 1	47.0	43.0	18.0	16.0	21.0	20.4
8	MTJ-Grade 1	31.0	28.0	15.0	13.0	25.8	24.9
9	MTJ-Grade 1	37.4	34.6	14.0	11.9	20.5	19.0
10	MTJ-Grade 1	48.7	41.5	15.0	12.6	17.1	16.9
11	MTJ-Grade 1	35.8	31.8	12.0	10.6	18.5	18.4
12	MTJ-Grade 1	42.0	40.1	18.9	17.5	24.2	23.6
13	MTJ-Grade 1	53.6	52.1	11.2	9.8	11.8	10.7
14	MTJ-Grade 1	39.1	37.1	15.7	14.5	21.9	21.3
15	MTJ-Grade 1	49.0	47.4	15.9	13.7	18.0	16.1
16	MTJ-Grade 2	42.0	37.0	17.0	13.0	22.0	19.4
17	MTJ-Grade 2	34.0	32.0	13.0	10.0	20.9	17.4
18	MTJ-Grade 2	38.6	35.0	15.2	12.0	21.5	18.9
19	MTJ-Grade 2	44.8	38.5	17.3	13.6	21.1	19.5
20	MTJ-Grade 2	59.4	52.0	14.2	11.2	13.4	12.2
21	MTJ-Grade 2	32.3	32.2	13.4	11.5	22.5	19.7
22	MTJ-Grade 2	41.0	38.0	13.2	11.0	17.8	16.1
23	MTJ-Grade 2	32.1	29.1	13.5	11.5	22.8	21.6
24	MTJ-Grade 3	29.3	24.6	15.3	9.7	27.5	21.6
25	MTJ-Grade 3	44.0	36.0	14.0	10.0	17.7	15.5
26	MTJ-Grade 3	39.6	27.7	14.3	7.3	19.8	14.6
27	MTJ-Grade 3	43.3	34.4	20.8	12.2	25.7	19.5
28	MTJ-Grade 3	42.9	40.3	12.9	9.8	16.7	13.7
29	MTJ-Grade 3	32.0	27.0	13.4	10.3	22.7	20.9
30	MTJ-Grade 3	43.2	37.6	16.7	12.3	21.1	18.1
31	MFJ	37.6	28.9	12.7	9.5	18.7	18.2
32	MFJ	68.0	54.0	19.0	13.0	15.6	13.5
33	MFJ	29.3	25.4	13.4	9.3	24.6	20.1
34	MFJ	37.2	32.4	15.0	11.1	22.0	18.9
35	MFJ	34.7	27.6	16.8	9.2	25.8	18.4
36	MFJ	47.3	40.4	18.5	12.7	21.4	17.5
37	MFJ	32.9	24.3	15.1	8.2	24.7	18.6

R, Resistance; Xc, Reactance; PA, phase angle; T, tendinous; MTJ, myotendinous junction; MFJ, myofascial junction.

Data Analysis

The normality of distribution in the variables was determined by the Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variances by Levene's test. Normally distributed variables are shown as mean \pm SD.

Repeated measures ANOVA test 2×3 was used to determine statistical differences between injured side respect to non-injured side in R, Xc, and PA considering contralateral non-injured side as reference value. In addition, different grades of severity (grades 1 to 3) of MTJ injuries were analyzed following the same statistical procedure.

One-way ANOVA test was used to determine statistical differences in the percentage difference of R, Xc, PA, and RTP values, between tendinous, MTJ, and MFJ injuries, as well as between different grades of severity of MTJ injuries.

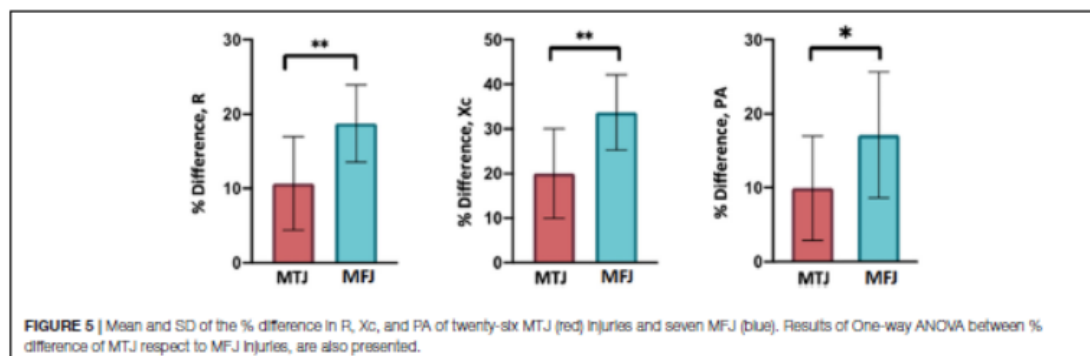
Both, repeated measures ANOVA and One-way ANOVA test, with multiple comparison tests by Bonferroni (homogeneity variances assumed) or Tamhane's T2 test (homogeneity variances not assumed) were used.

Discriminant Function Analysis was used to find a linear combination of features that separates muscle injuries L-BIA

TABLE 2 | Values of L-BIA measurements 24 h after injury [contralateral non-injured side (1), injured side (2) and % difference in R, Xc, and PA], and the result of repeated measures ANOVA test corresponding to tendinous, MTJ and MFJ.

Tendinous, (n = 4)	Non-Injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference,%	F P value (1-2) ^{a1}
R (Ω)	39.3 ± 4.9	38.6 ± 5.0	-1.8 ± 1.8	4.119 0.135
Xc (Ω)	14.3 ± 2.0	14.2 ± 1.9	-0.5 ± 0.6	2.455 0.215
PA (°)	20.2 ± 3.7	20.4 ± 3.8	1.2 ± 1.5	2.865 0.189
MTJ, (n = 26)	Non-Injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference,%	F P value(1-2) ^{a2}
R (Ω)	40.1 ± 7.7	35.8 ± 7.4	-10.7 ± 6.3	65.640 <0.001
Xc (Ω)	15.0 ± 2.2	12.0 ± 2.2	-20.0 ± 10.1	76.565 <0.001
PA (°)	20.9 ± 3.9	18.9 ± 3.8	-9.9 ± 7.0	41.988 <0.001
MFJ, (n = 7)	Non-Injured side 24 h after injury (1)	Injured side 24 h after injury (2)	Difference,%	F P value(1-2) ^{a3}
R (Ω)	41.0 ± 13.1	33.3 ± 10.6	-18.7 ± 5.2	38.248 0.001
Xc (Ω)	15.8 ± 2.4	10.4 ± 1.9	-33.7 ± 8.4	73.600 <0.001
PA (°)	21.8 ± 3.7	17.9 ± 2.1	-17.0 ± 8.4	19.509 0.004

^aRepeated measures ANOVA test between non-injured side (1) and injured side (2) according to ¹tendinous, ²MTJ, ³MFJ injuries. R, resistance; Xc, reactance; PA, phase angle; MTJ, myotendinous junction; MFJ, myofascial junction.



values (% difference in R, Xc, and PA) according to the grade of severity of MTJ injuries.

The statistical software IBM® SPSS® version 22.0 (IBM Corp, Armonk, NY, United States) was used for data analysis. The level of statistical significance was set at $P < 0.05$.

RESULTS

Tendinous, MTJ and MFJ Injuries, Previously Diagnosed With MRI 24 h After Injury

A total of 37 muscle injuries occurred between 2016–2017 and 2017–2018 seasons and evaluated by an MRI exam 24 h after

injury, were grouped according to the myoconnective junction affected and classified following Pollock et al., 2014 in tendinous ($n = 4$), MTJ ($n = 26$), and MFJ ($n = 7$) injuries (Figures 2–4).

These injuries affected the long head of the biceps femoris ($n = 12$), the short head of the biceps femoris ($n = 9$), rectus femoris ($n = 10$), semitendinosus ($n = 4$) and semimembranosus ($n = 2$).

L-BIA Measurements in Tendinous, MTJ and MFJ Injuries Diagnosed Previously by MRI 24 h After Injury

Table 1 shows the individual values of L-BIA measurements 24 h after injury [resistance (R), reactance (Xc), and phase

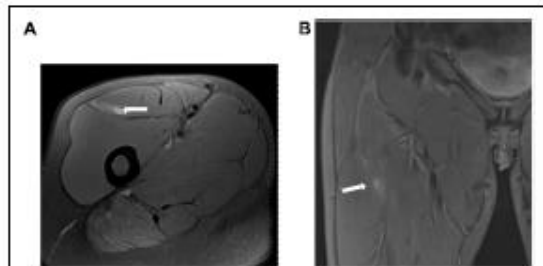


FIGURE 6 | Distal MTJ injury grade 1 of rectus femoris in axial (A) and coronal (B) T2 weighted fat-suppressed image. Small myofascial tear (arrow).

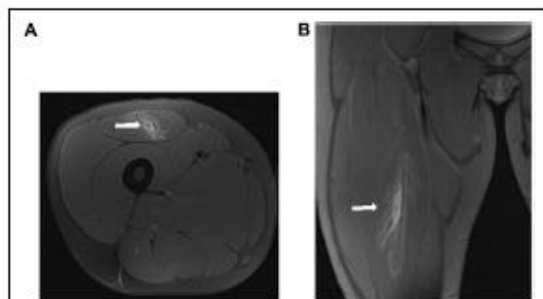


FIGURE 7 | Proximal MTJ injury grade 2 of rectus femoris in axial (A) and coronal (B) T2 weighted fat-suppressed image. Blurring of the muscle fibers in the lateral MTJ of the central septum, with a small hematoma. We can see that this is an overloaded rectus femoris.



FIGURE 8 | Proximal MTJ injury grade 3 of rectus femoris in axial (A) and coronal (B) T2 weighted fat-suppressed image. The mixed tear of the central septum (transversal and longitudinal), resulting in loss of tension and extensive feathery edema.

angle (PA)] of thirty-seven muscle injuries. According to anatomical location, injuries are classified as tendinous ($n = 4$), MTJ ($n = 26$) and MFJ ($n = 7$) in. Grades of severity

of MTJ injuries (MTJ-Grade 1, MTJ-Grade 2, MTJ-Grade 3) are also displayed.

Table 2 describes the L-BIA measurements 24 h after injury, of thirty-seven muscle injuries, as mean \pm SD corresponding to tendinous ($n = 4$), MTJ ($n = 26$), and MFJ ($n = 7$) injuries and the percentage difference (Difference,%) in resistance (R), reactance (Xc), and phase angle (PA). In addition, the result of the repeated measures ANOVA test between injured side compared to the non-injured side of R, Xc, and PA is reported.

Using repeated measures ANOVA test, anatomical changes related to tendinous injury were not reflected by L-BIA measurement through R, Xc, and PA ($P > 0.05$), 24 h after injury. The percentage difference in R, Xc, and PA, 24 h after injury, were $-0.5\% \sim -2\%$. However, we found statistical significance ($P < 0.01$) for R, Xc, and PA for both MTJ and MFJ injuries. The MTJ injury results showed statistical significance ($P < 0.001$) in percentage difference of R, Xc, and PA in the injured side compared to the contralateral non-injured side (-11% in R, -20% in Xc and -10% in PA), as well as MFJ injuries ($P < 0.01$) in percentage difference of R, Xc, and PA in injured side compared to the contralateral non-injured side (-19% in R, -34% in Xc, and -17% in PA).

The One-way ANOVA test, with regard to MTJ and MFJ injuries, shows statistical significance for% difference in R ($F = 9.673$, $P = 0.004$), Xc ($F = 10.775$, $P = 0.003$) and statistical significance for PA ($F = 5.155$, $P = 0.030$).

Figure 5 shows the mean and SD of percentage difference (% Difference) in R, Xc, and PA, of MTJ and MFJ injuries, diagnosed by MRI exam 24 h after injury and evaluated by L-BIA measurements. In addition, the result of One-way ANOVA between % difference of R, Xc and PA in MTJ respect to % difference of R, Xc, and PA in MFJ injuries.

L-BIA Measurements of MTJ Grouped According to the Severity of the Injury Diagnosed Previously by MRI 24 h After Injury

In a second analysis, 26 myotendinous junction (MTJ) injuries, evaluated by MRI 24 h after injury, were grouped according to the severity of the injury (**Figures 6–8**) follow BAMIC classification (Pollock et al., 2014) in grade 1 ($n = 11$), grade 2 ($n = 8$), and grade 3 ($n = 7$).

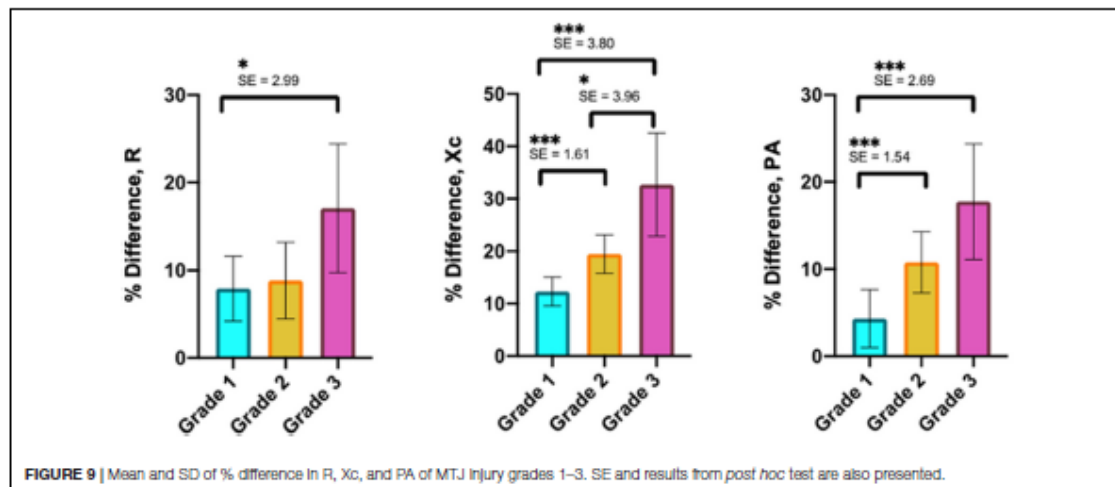
Table 3 presents the L-BIA measurements 24 h after the injury as mean \pm SD and percentage difference (Difference,%) in R, Xc, and PA corresponding to the grade of severity of MTJ injury in grade 1 ($n = 11$), grade 2 ($n = 8$) and grade 3 ($n = 7$). In addition, the result of the repeated measures ANOVA test between injured side compared to the non-injured side of R, Xc, and PA is presented.

Using repeated measures ANOVA test, anatomical changes related to the grade of MTJ injuries were reflected by L-BIA measurement through R, Xc, and PA ($P < 0.01$), 24 h after injury for grade 1, 2, and 3.

TABLE 3 | Values of L-BIA measurements 24 h after injury (contralateral non-injured side (1), injured side (2) and % difference in R, Xc, and PA) corresponding to the grade of MTJ injuries, and the result of repeated measures ANOVA test for R, Xc, and PA.

MTJ-Grade 1, (n = 11)	Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)	Difference,%	F P value(1-2) ^{b1}
R (Ω)	40.4 ± 8.3	37.3 ± 8.4	-7.9 ± 3.7	40.405 <0.001
Xc (Ω)	15.1 ± 2.3	13.2 ± 2.3	-12.3 ± 2.8	229.221 <0.001
PA (°)	21.0 ± 4.5	20.2 ± 4.6	-4.3 ± 3.3	28.279 <0.001
MTJ-Grade 2, (n = 8)	Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)	Difference,%	F P value(1-2) ^{b2}
R (Ω)	40.5 ± 9.0	36.7 ± 7.0	-8.8 ± 4.4	20.788 0.004
Xc (Ω)	14.6 ± 1.7	11.7 ± 1.1	-19.5 ± 3.7	108.784 <0.001
PA (°)	20.3 ± 3.2	18.1 ± 2.9	-10.8 ± 3.5	54.428 <0.001
MTJ-Grade 3, (n = 7)	Non-Injured side 24 h after Injury (1)	Injured side 24 h after Injury (2)	Difference,%	F P value(1-2) ^{b3}
R (Ω)	39.2 ± 6.0	32.5 ± 6.0	-17.1 ± 7.3	31.968 0.001
Xc (Ω)	15.3 ± 2.7	10.2 ± 1.7	-32.7 ± 9.8	42.505 0.001
PA (°)	21.6 ± 4.0	17.7 ± 3.1	-17.8 ± 6.6	32.618 0.001

^{b1} Repeated measures ANOVA test between non-injured side (1) and injured side (2) according to grade of MTJ injuries ¹grade 1, ²grade 2, ³grade 3. R, resistance; Xc, reactance; PA, phase angle; MTJ, myotendinous junction; MFJ, myofascial junction.



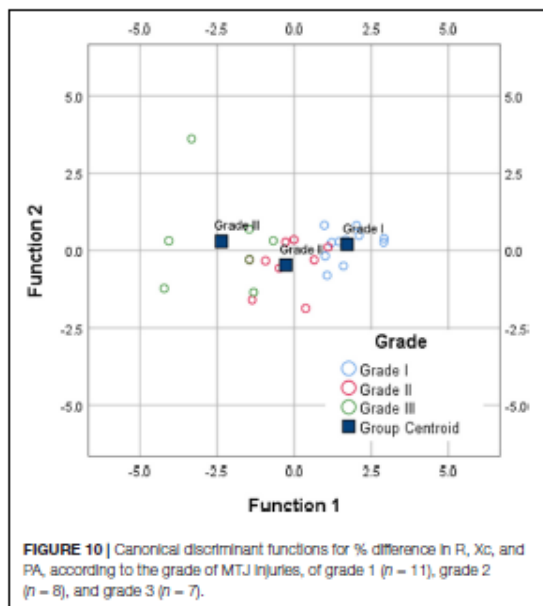
The One-way ANOVA test, regarding the MTJ injuries classified in grades 1, 2, and grade 3, showed statistical significance in the % difference of R ($F = 7.630$, $P = 0.003$) and statistical significance for % difference of Xc ($F = 26.964$, $P < 0.001$) and % difference of PA ($F = 20.089$, $P < 0.001$).

Figure 9 shows the mean and SD of the % difference in R, Xc, and PA, of twenty-six MTJ injuries classified as grade 1 ($n = 11$), grade 2 ($n = 8$), and grade 3 ($n = 7$) by MRI exam, 24-hour after injury. In addition,

the results of Tamhane's T2 multiple comparison test revealed statistical differences ($P < 0.001$) in Xc and PA between grade 1 and grade 2, as well as between grade 1 and grade 3.

Figure 10 shows the canonical discriminant functions, according to the grade of MTJ injuries, by Discriminant Function Analysis of percentage difference (% difference) in R, Xc, and PA.

The function scores obtained through the standardized canonical discriminant function coefficients are:



$$FScore1 = 3.198 \% \text{ difference } R - 5.093 \% \text{ difference } Xc \\ + 2.701 \% \text{ difference } PA$$

$$FScore2 = 4.212 \% \text{ difference } R - 4.746 \% \text{ difference } Xc \\ + 3.064 \% \text{ difference } PA$$

Both first and second function show the standardized coefficient for % difference R, % difference Xc, and % difference PA. The magnitude of these coefficients indicate how strongly the discriminating variables affect the score. Thus, % difference in Xc has the greatest impact of the three variables, on the first (-5.093) and second (-4.746) discriminant score, but especially in the first score. Therefore, Xc is the variable that most discriminates according to the grade of MTJ injuries by L-BIA measurements 24 h after injury.

Return to Play (RTP) in MTJ and MFJ Injuries

Table 4 present the RTP (in days), and the result of the One-way ANOVA test between MTJ and MFJ injuries and according to the grade of severity of MTJ injuries.

Using the One-way ANOVA test, and regarding MTJ and MFJ injuries, the RTP does not show statistical significance ($P > 0.05$).

Regarding the MTJ injuries classified in grades 1, 2, and grade 3, we found statistical significance in days to RTP ($P < 0.001$). Tamhane's T2 reveals statistical difference ($SE = 5.121$, $P = 0.002$) contrasting grade 1 (8 ± 3 days) with grade 3 (52 ± 14 days) and

TABLE 4 | Return to play in MTJ and MFJ injuries.

Anatomical Location (Sample size)	RTP, days	F P value ¹
MTJ (26)	25 ± 22	2.277 0.124
MFJ (7)	20 ± 8	
Grade of MTJ Injury (Sample size)	RTP, days	F P value ²
Grade 1 (11)	8 ± 3	39.517 $P < 0.001$
Grade 2 (8)	14 ± 10	
Grade 3 (7)	52 ± 14	

¹One-way ANOVA between MTJ and MFJ injuries. ²One-way ANOVA among MTJ injuries according to severity.

also statistical difference ($SE = 5.475$, $P = 0.001$) contrasting grade 2 (14 ± 10 days) with grade 3 (52 ± 14 days).

DISCUSSION

This second project of L-BIA developed by FCB Medical Department evaluates the capacity of the L-BIA method to differentiate muscle injuries according to anatomical location in tendinous, MTJ and MFJ, which are diagnosed by MRI exam 24 h after injury and classified according to *The British Athletics Muscle Injury Classification* (Pollock et al., 2014) considering the histoarchitectural approach to skeletal muscle injury (Balius et al., 2020). The most important finding is the good association between both MRI and L-BIA methods in myotendinous junction (MTJ) and myofascial junction (MFJ) injuries. Also, the fact that higher changes in Xc, and longer time to RTP are found in more severe MTJ injuries.

Comparing the injured side to non-injured side both for MTJ and MFJ injuries, the % difference in L-BIA measurements 24 h after injuries are in concordance with findings by MRI exam 24 h after injury. The contralateral non-injured side is taken as reference due to the individual symmetry in L-BIA values between left and right muscle areas of the lower-limb in professional football players. By MRI exam, MFJ injuries show greater edema and greater bleeding than MTJ injuries, which justifies why the percentage difference (% difference) of the injured side compared to the contralateral non-injured side is greater in MFJ injuries than in MTJ injuries. Both in MTJ and MFJ injuries the % difference in Xc was greater than the % difference in R. According to our findings, to evaluate anatomical changes produced in MTJ and MFJ, 24 h after injury by L-BIA, the Xc is the most sensitive variable.

Although the tendinous injuries are the most severe cases (Crema et al., 2016) L-BIA method is completely insensitive to the anatomical changes produced in the tendinous injuries. Fortunately, they are also less common in professional football players (Crema et al., 2016). By MRI, the tendinous injuries show less edema and bleeding comparing to MTJ and MFJ injuries, and the intra-tendinous gap is considerably smaller.

A normal tendon is a compact structure with tenocytes attached to a highly ordered fibrillar collagen matrix (ECM) composed of type-I collagen (65–80% of its dry mass), and small leucine-rich proteoglycans that regulate collagen self-assembly into collagen fibrils, which in turn are ordered by the cell into collagen fibers (Snedeker and Foolen, 2017). In the intratendinous injury, tendon gap is smaller than those in muscle injuries and show generally less edema and bleeding than MTJ and MFJ injuries in MRI fluid-sensitive sequences. In acute intratendinous injuries, there is no major inflammatory component and its repair process goes along the lines of scar formation causing to the tensile strength of healed tendon like the healthy tendon (Nourissat et al., 2015). It should be clarified that differently to the hamstring free tendon, the intramuscular tendon has more vascularization (Brukner and Connell, 2016).

Comparing the percentage difference of MTJ injuries to the percentage difference of MFJ injuries, as in MRI exam 24 h after injury, both for edema produced in the area of the injury (% difference R) and the amount of cell disruption (% difference Xc), the L-BIA method distinguishes between MTJ and MFJ injuries. The % difference in phase angle is more closely related to the changes produced in the Xc than with those produced in R for the geometric relationship between them (Lukaski, 1996; Lukaski et al., 2019).

In professional football, muscle injuries occur with major frequency at the myotendinous junction (MTJ) especially in hamstring muscle groups (Crema et al., 2016) whose main objective is the transmission of force (Balius et al., 2018). In this study, 26 out of 37 injuries occurred in the myotendinous junction, which were classified into grades 1, 2, and 3, according to the severity of the injury. All of them showed a notable decrease in R and Xc, being the largest change observed in Xc. Furthermore, this change was even greater in grade 3 of the MTJ injury after comparing the injured side to the non-injured side. The % difference of MTJ injuries grade 1 compared to the % difference of MTJ injuries grade 2 and MTJ grade 3, elucidated that the more severe the injury is, higher changes in R and Xc are found, especially in Xc which is related to muscle "gap" in agreement with the findings shown on the MRI exam 24 h after injury. Similar to wound healing (Lukaski and Moore, 2012), muscle injury is classified according to anatomical location, the % difference in Xc (cell disruption, muscle "gap") is related with the severity of the injury. Regarding RTP (in days), it was not found differences between MTJ and MFJ injuries. However, according to severity of MTJ injuries, it was found differences among days to RTP and MTJ grades 1, 2, and 3. The injuries with the highest degree of severity were associated with longer time to RTP.

The decision on the days to RTP, is conditioned by the severity of the injury (Pedret et al., 2015; Balius et al., 2018, Balius et al., 2020) and by the myoconnective junction involved. The days to RTP are strongly associated with changes in Xc (muscular fibers retraction quantified by % different of Xc) i.e., the severity of injuries is reflected by higher changes in Xc and longer time to RTP. Injury recovery is related to a readjustment of the Xc parameter closer to the value of the

contralateral non-injured side with % difference lower than 15% in those muscle injuries of high degree of severity according to the muscle "gap" (Nescolarde et al., 2013). It is important mentioning that for measurements on injured muscles with L-BIA until RTP time point, each player is his own reference (Nescolarde et al., 2013). The role of MRI is key for the diagnosis and prognosis of injuries, and therefore, a great tool for RTP prediction. However, it is not the only criterion to take into account. The decision on time to RTP by FCB physicians are based on club's guidance, taking into account not only imaging criteria but also specific tests, GPS assessment, and even the player's psycho-emotional state.

CONTRIBUTION

Localized bioimpedance is a complementary method to MRI and US as currently it can only quantify MTJ and MFJ injuries. In addition, it could be useful for the medical team, physiotherapists, and physical trainers in the diagnosis of muscle injury helping in day-to-day decision-making. L-BIA measurements are carried out using a phase-sensitive impedance instrument at 50 kHz, robust and easy to apply, and economically feasible.

LIMITATION

To validate L-BIA as a complementary method to MRI and US, it is necessary to extend this study to other professional football teams to increase the sample size, as well as to include female athletes.

CONCLUSION

We conclude that L-BIA is a tool able to differentiate between MTJ and MFJ injuries. Additionally, it discriminates between MTJ grade 3 injury and grades 1 and 2. The sensitivity of L-BIA method is shown to be higher in the percentage difference of Xc 24 h after injury, which is related to muscle cell disruption. In addition, more severe injuries presented higher % difference in Xc and longer time to RTP.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

ETHICS STATEMENT

Ethics approval was obtained from the Medical Committee of Barça Innovation Hub in Futbol Club Barcelona according to principles of the Helsinki Declaration for experiments

with human beings. The participants provided oral and written informed consent before participation in the study during a period of 2016–2017 and 2017–2018. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors designed the experiments, analyzed the data, revised the manuscript, and approved the final version of the manuscript. LN processed the data and prepared the tables and figures. LN and GR wrote the manuscript.

REFERENCES

- Ahmad, C. S., Redler, L. H., Cicciotti, M. G., Maffulli, N., Longo, U. G., and Bradley, J. (2013). Evaluation and management of hamstring injuries. *Am. J. Sports Med.* 41, 2933–2947. doi: 10.1177/0363546513487063
- Askling, C. M., Nilsson, J., and Thorstensson, A. (2010). A new hamstring test to complement the common clinical examination before return to sport after injury. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 18, 1798–1803. doi: 10.1007/s00167-010-1265-3
- Balius, R., Alomar, X., Pedret, C., Blasi, M., Rodas, G., Pruna, R., et al. (2018). Role of the extracellular matrix in muscle injuries: histoarchitectural considerations for muscle injuries. *Orthop. J. Sports Med.* 6:2325967118795863. doi: 10.1177/2325967118795863
- Balius, R., Blasi, M., Pedret, C., Alomar, X., Peña-Amaro, J., Vega, J. A., et al. (2020). A histoarchitectural approach to skeletal muscle injury: searching for a common nomenclature. *Orthop. J. Sports Med.* 8:2325967120909090. doi: 10.1177/2325967120909090
- Barça Innovation Hub (2020). *Barça Innovation Hub/Muscle Injury Guide - Preventing and Treating Muscle Injuries in Football*. Available online at: <https://barcainnovationhub.com/muscle-injury-guide-preventing-and-treating-muscle-injuries-in-football/> (accessed May 24, 2020).
- Brooks, J. H. M., Fuller, C. W., Kemp, S. P. T., and Reddin, D. B. (2006). Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am. J. Sports Med.* 34, 1297–1306. doi: 10.1177/0363546505286022
- Brukner, P., and Connell, D. (2016). Serious thigh muscle strains: beware the intramuscular tendon which plays an important role in difficult hamstring and quadriceps muscle strains. *Br. J. Sports Med.* 50, 205–208. doi: 10.1136/bjsports-2015-095136
- Crema, M. D., Guerazzi, A., Tol, J. L., Niu, J., Hamilton, B., and Roemer, F. W. (2016). Acute hamstring injury in football players: association between anatomical location and extent of injury—A large single-center MRI report. *J. Sci. Med. Sport.* 19, 317–322. doi: 10.1016/j.jsams.2015.04.005
- Ekstrand, J., Häggglund, M., and Waldén, M. (2011). Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study. *Br. J. Sports Med.* 45, 553–558. doi: 10.1136/bjsm.2009.060582
- Ekstrand, J., Healy, J. C., Waldén, M., Lee, J. C., English, B., and Häggglund, M. (2012). Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play. *Br. J. Sports Med.* 46, 112–117. doi: 10.1136/bjsports-2011-090155
- Ekstrand, J., Waldén, M., and Häggglund, M. (2016). Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br. J. Sports Med.* 50, 731–737. doi: 10.1136/bjsports-2015-095359
- Elliott, M. C., Zarins, B., Powell, J. W., and Kenyon, C. D. (2011). Hamstring muscle strains in professional football players: a 10-year review. *Am. J. Sports Med.* 39, 843–850. doi: 10.1177/0363546510394647
- Engelbreten, L., Soligard, T., Steffen, K., Alonso, J. M., Aubry, M., Budgett, R., et al. (2013). Sports injuries and illnesses during the London summer olympic games 2012. *Br. J. Sports Med.* 47, 407–414. doi: 10.1136/bjsports-2013-092380

FUNDING

This study was supported by the Electronic and Biomedical Instrumentation Research Group of Electronic Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya and FCB Medical Department, Barcelona, Spain.

ACKNOWLEDGMENTS

We especially thank the players of Futbol Club Barcelona and Ana Núñez-Nescolarde for their collaboration in this study.

- Häggglund, M., Waldén, M., Bahr, R., and Ekstrand, J. (2005). Methods for epidemiological study of injuries to professional football players: developing the UEFA model. *Br. J. Sports Med.* 39, 340–346. doi: 10.1136/bjsm.2005.018267
- Heiderscheit, B. C., Sherry, M. A., Silder, A., Chumanov, E. S., and Thelen, D. G. (2010). Hamstring strain injuries: recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 40, 67–81. doi: 10.2519/jospt.2010.3047
- Junge, A., Engelbreten, L., Mountjoy, M. L., Alonso, J. M., Renström, P. A., Aubry, M. J., et al. (2009). Sports injuries during the summer olympic games 2008. *Am. J. Sports Med.* 37, 2165–2172. doi: 10.1177/0363546509339357
- Lukaski, H., Vega Diaz, N., Talluri, A., and Nescolarde, L. (2019). Review: classification of hydration in clinical conditions: indirect and direct approaches using bioimpedance. *Nutrients* 11:809. doi: 10.3390/nu11040809
- Lukaski, H. C. (1996). Biological indexes considered in the derivation of the bioelectrical impedance analysis. *Am. J. Clin. Nutr.* 64(3 Suppl.), 397S–404S. doi: 10.1093/ajcn/64.3.397S
- Lukaski, H. C. (2013). Evolution of bioimpedance: a circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research. *Eur. J. Clin. Nutr.* 67(Suppl. 1), S2–S9. doi: 10.1038/ejcn.2012.149
- Lukaski, H. C., and Moore, M. (2012). Bioelectrical impedance assessment of wound healing. *J. Diabetes Sci. Technol.* 6, 209–212. doi: 10.1177/193229681200600126
- Lukaski, H. C., and Piccoli, A. (2012). "Bioelectrical impedance vector analysis for assessment of hydration in physiological states and clinical conditions," *Handbook of Anthropometry*, ed. V. Preedy (London, UK: Springer), 287–315.
- Mueller-Wohlfahrt, H. W., Haensel, L., Mithoefer, K., Ekstrand, J., English, B., McNally, S., et al. (2013). Terminology and classification of muscle injuries in sport: a consensus statement. *Br. J. Sports Med.* 47, 342–350. doi: 10.1136/bjsports-2012-091448
- Nescolarde, L., Lukaski, H., De Lorenzo, A., de-Mateo-Silleras, B., Redondo-Del-Río, M. P., and Camina-Martin, M. A. (2016). Different displacement of bioimpedance vector due to Ag/AgCl electrode effect. *Eur. J. Clin. Nutr.* 70, 1401–1407. doi: 10.1038/ejcn.2016.121
- Nescolarde, L., Yanguas, J., Lukaski, H., Alomar, X., Rosell-Ferrer, J., and Rodas, G. (2013). Localized bioimpedance to assess muscle injury. *Physiol. Meas.* 34, 237–245. doi: 10.1088/0967-3334/34/2/237
- Nescolarde, L., Yanguas, J., Lukaski, H., Alomar, X., Rosell-Ferrer, J., and Rodas, G. (2015). Effects of muscle injury severity on localized bioimpedance measurements. *Physiol. Meas.* 36, 27–42. doi: 10.1088/0963334/36/1/27
- Nescolarde, L., Yanguas, J., Terrabras, J., Lukaski, H., Alomar, X., Rosell-Ferrer, J., et al. (2017). Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: clinical prognosis. *Physiol. Meas.* 38, L1–L9. doi: 10.1088/1361-6579/aa7243
- Nourissat, G., Berenbaum, F., and Duprez, D. (2015). Tendon injury: from biology to tendon repair. *Nat. Rev. Rheumatol.* 11, 223–233. doi: 10.1038/nrrheum.2015.26
- Patel, A., Chakraverty, J., Pollock, N., Chakraverty, R., Suokas, A. K., and James, S. L. (2015). British athletics muscle injury classification: a reliability study for

- a new grading system. *Clin. Radiol.* 70, 1414–1420. doi: 10.1016/j.crad.2015.08.009
- Pedret, C., Rodas, G., Balias, R., Capdevila, L. L., Bossy, M., Vernooij, R. W. M., et al. (2015). Return to play after soleus muscle injuries. *Orthop. J. Sports Med.* 3:2325967115595802. doi: 10.1177/2325967115595802
- Pollock, N., Patel, A., Chakraverty, J., Suokas, A., James, S. L., and Chakraverty, R. (2016). Time to return to full training is delayed and recurrence rate is higher in intratendinous ('c') acute hamstring injury in elite track and field athletes: clinical application of the british athletics muscle injury classification. *Br. J. Sports Med.* 50, 305–310. doi: 10.1136/bjsports-2015-094657
- Pollock, N., Steven, L. J. J., Lee, J. C., and Chakraverty, R. (2014). British athletics muscle injury classification. *Br. J. Sports Med.* 48, 1347–1351. doi: 10.1136/bjsports-2013-093302
- Reurink, G., Goudswaard, G. J., Tol, J. L., Almusa, E., Moen, M. H., Weir, A., et al. (2014). MRI observations at return to play of clinically recovered hamstring injuries. *Br. J. Sports Med.* 48, 1370–1376. doi: 10.1136/bjsports-2013-092450
- Rutkove, S., Pachek, A., and Sanchez, B. (2017). Sensitivity distribution simulations of surface electrode configurations for electrical impedance myography. *Muscle Nerve* 56, 887–895. doi: 10.1002/mus.25561
- Rutkove, S. B. (2009). Electrical impedance myography: background, future state and future directions. *Muscle Nerve* 40, 936–946. doi: 10.1002/mus.21362
- Rutkove, S. B., Fogerson, P. M., Garmirian, L. P., and Tarulli, A. W. (2008). Reference values of 50-kHz electrical impedance myography. *Muscle Nerve* 38, 1128–1132. doi: 10.1002/mus.21075
- Sanchez, B., Pachek, A., and Rutkove, S. B. (2016). Guidelines to electrode positioning for human and animal electrical impedance myography research. *Sci. Rep.* 6:32615.
- Schneider-Kolsky, M. E., Hoving, J. L., Warren, P., and Connell, D. A. (2006). A comparison between clinical assessment and magnetic resonance imaging of acute hamstrings injuries. *Am. J. Sports Med.* 34, 1000–1007. doi: 10.1177/0363546505283835
- Snedeker, J. G., and Foleen, J. (2017). Tendon injury and repair - a perspective on the basic mechanisms of tendon disease and future clinical therapy. *Acta Biomater.* 63, 18–36. doi: 10.1016/j.actbio.2017.08.032
- Valle, X., Alentorn-Geli, E., Tol, J. L., Hamilton, B., Garret, W. E., Pruna, R., et al. (2017). Muscle injuries in sports: a new evidence-informed and expert consensus-based classification with clinical application. *Sports Med.* 2017, 1241–1253. doi: 10.1007/s40279-016-0647-1
- Vermeulen, R., Almusa, E., Buckens, S., Six, W., Whiteley, R., Reurink, G., et al. (2019). Complete resolution of a hamstring intramuscular tendon injury on MRI is not necessary for a clinically successful return to play. *Br. J. Sports Med.* [Epub ahead of print]. doi: 10.1136/bjsports-2019-101808
- Wangenstein, A., Tol, J. L., Roemer, F. W., Bahr, R., Dijkstra, H. P., Crema, M. D., et al. (2017). Intra- and interrater reliability of three different MRI grading and classification systems after acute hamstring injuries. *Eur. J. Radiol.* 89, 182–190. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.02.010

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2020 Nescolarde, Terricabras, Mechó, Rodas and Yanguas. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Letter

Detection of muscle gap by L-BIA in muscle injuries: clinical prognosis

L Nescolarde^{1,6}, J Yanguas², J Terricabras^{2,3}, H Lukaski⁴,
X Alomar⁵, J Rosell-Ferrer¹ and G Rodas²

¹ Department of Electronic Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, c/Jordi Girona, 1-3, Edifici C4, 08034 Barcelona, Spain

² Medical Department, Futbol Club Barcelona, FIFA Medical Center of Excellence, Ciutat Esportiva Futbol Club Barcelona, Av. del Sol s/n, 08790 Sant Joan Despí, Barcelona, Spain

³ Department of Surgery, Universitat Autònoma de Barcelona, Edifici U, Campus UAB, 08913-Bellaterra, Barcelona, Spain

⁴ Department of Kinesiology and Public Health Education, Hyslop Sports Center, University of North Dakota, Grand Forks, ND 58202, United States of America

⁵ Department of Radiology, Centres Mèdics Creu Blanca, Av. Reina Elisenda de Montcada 15-17, 08034 Barcelona, Spain

E-mail: lexa.nescolarde@upc.edu

Received 30 March 2017, revised 28 April 2017

Accepted for publication 10 May 2017

Published 22 June 2017



Abstract

Sport-related muscle injury classifications are based basically on imaging criteria such as ultrasound (US) and magnetic resonance imaging (MRI) without consensus because of a lack of clinical prognostics for return-to-play (RTP), which is conditioned upon the severity of the injury, and this in turn with the muscle gap (muscular fibers retraction). Recently, Futbol Club Barcelona's medical department proposed a new muscle injury classification in which muscle gap plays an important role, with the drawback that it is not always possible to identify by MRI. Localized bioimpedance measurement (L-BIA) has emerged as a non-invasive technique for supporting US and MRI to quantify the disrupted soft tissue structure in injured muscles. *Objective:* To correlate the severity of the injury according to the gap with the RTP, through the percent of change in resistance (R), reactance (X_c) and phase-angle (PA) by L-BIA measurements in 22 muscle injuries. *Main results:* After grouping the data according to the muscle gap (by MRI exam), there were significant differences in R between grade 1 and grade 2f (myotendinous or myofascial muscle injury with feather-like appearance), as well as between grade 2f and grade 2g (myotendinous or myofascial muscle injury with feather and gap).

⁶ Author to whom any correspondence should be addressed.

The X_c and PA values decrease significantly between each grade (i.e. 1 versus 2f, 1 versus 2g and 2f versus 2g). In addition, the severity of the muscle gap adversely affected the RTP with significant differences observed between 1 and 2g as well as between 2f and 2g. *Significance:* These results show that L-BIA could aid MRI and US in identifying the severity of an injured muscle according to muscle gap and therefore to accurately predict the RTP.

Keywords: localized bioimpedance, grade of muscle injury, return-to-play, professional football players

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction

Injuries to skeletal muscles are prevalent in competitive sports, particularly in football, with an incidence of around 30% of total injuries (Ekstrand *et al* 2012). Sport-related muscle injury classifications (Hamilton *et al* 2014) are primarily based on imaging criteria such as ultrasound (US) and more recently magnetic resonance imaging (MRI). However, the prognosis using these criteria is still not clear. There is strong evidence that a great part of the return-to-play (RTP) decision is conditioned upon the severity of the injury (Pedret *et al* 2015) and this is associated with *muscle gap* (muscular fibers retraction). Some authors (Slavotinek *et al* 2002, Verrall *et al* 2006, Connell *et al* 2014) have affirmed that the amount of edema of the injured muscle is associated with longer recovery times, whereas others (Schneider-Kolsky *et al* 2006, Reurink *et al* 2015) find no strong evidence of any MRI findings able to give a prognosis of RTP. Pedret *et al* (2015) points out that the amount of edema is relatively non-significant in comparison with other important factors: the extent of the muscle gap and the involvement of the surrounding tissues. Recently, a new classification of muscle injuries has been proposed (Valle *et al* 2016) in which muscle gap plays an important role, with the drawback that it is not always possible to identify by MRI.

Localized bioimpedance measurement (L-BIA) has emerged as an alternative, low-cost or accessible technique for supporting imaging in quantifying the disrupted soft tissue structure in injured muscles (Nescolarde *et al* 2015). It utilizes measurements of the passive electrical characteristics of healthy tissue in response to the administration of a low-intensity alternating current to identify differences in muscle pathology and severity of injury. Resistance (R) is the opposition to the conduction of applied current and is inversely related to fluid volume, and reactance or capacitance (X_c) is the delay in the conduction of current on cell membranes and tissue interfaces (Lukaski 2013). In a group of professional football players, R measured at the site of the injury was modified by muscle fluid accumulation (edema) whereas X_c was modified due to muscle cell disruption. The magnitude of the decrease in both parameters 24 h after injury was consistent with the severity of the injury previously diagnosed by MRI. The severity of the injury was evidenced by a greater reduction in X_c , compared to the contralateral non-injured muscle, while the amount of edema demonstrated by a reduction in R did not show a good correlation (Nescolarde *et al* 2013, 2015). In this way, L-BIA appears to be a useful non-invasive tool to quantify structural tissue damage independent of the amount of edema in classifying its severity and to help in the follow-up until RTP.

The aim of this work is to use L-BIA measurements to correlate the severity of an injury according to the muscle gap with the RTP.

2. Methods

2.1. Muscle injury grouped according to gap

Twenty-two muscle injuries, 12 hamstrings; 6 rectus femoris; 3 adductor longus and 1 gastrocnemius (medial head), in 18 male professional football players (20–28 years) were evaluated taking into account the presence of the gap, supported by a 3.0 T MRI system (Magnetom VERIO, Siemens Medical Solutions, version VB 17) during a period of four seasons, ending in June 2016. The Medical Committee of Futbol Club Barcelona approved the study and each volunteer provided oral and written informed consent before participation in the study. The muscle injuries were grouped according to the presence of muscle gap identified by MRI exam 24 h after injury:

- Grade 1: Small area of edema, either myotendinous or myofascial (<10% of cross sectional area (CSA) of the muscle affected and <5 cm of craniocaudal length) with no gap.
- Grade 2f: Moderate amount of edema (10–50% of CSA and 5–15 cm of length) with a feather-like image and no gap.
- Grade 2g: Moderate amount of edema (10–50% of CSA and 5–15 cm of length) with a feather-like image and gap.

2.2. L-BIA

The L-BIA measurements at 50 kHz (BIA-101 Anniversary; AKERN-Srl, Florence, Italy) were done 24 h after injury and on the day of RTP to quantify the percent of change, with respect to contralateral non-injured side, R , X_c and phase-angle (PA).

R , X_c and the PA, determined at the contralateral (non-injured side), considered as the reference value, as well as the injured side values, were both measured 24 h after injury. The impact of severity of muscle injury was characterized by the percentage of decrease (% decrease) in L-BIA (R , X_c and PA) compared to the non-injured side.

The adhesive contact electrodes Ag/AgCl (COVIDIEN Ref. 31050522, Covidien LLC, Mansfield, IL, USA) were placed in the area of the injured muscle. The sensing pair of electrodes measuring the voltage (V) drop were placed 5 cm proximally and 5 cm distally from the center of the injury, and the source electrodes injecting the current (I) were positioned close to the others. In the vastus intermedius, injuries are located below the rectus femoris and are therefore anatomically deeper, electrodes for detecting V were placed 10 cm proximally and 10 cm distally to the center of the injury and two for injecting I close to the others. Similar to previous reports (Nescolarde *et al* 2013, 2015), the center of the injury was determined by ultrasound (LOGIQ e, GE Healthcare; Milwaukee, WI, USA). For the placement of the electrodes, we had to consider that in deep injuries (near the bone), the current electrodes should be placed with a greater separation than in superficial injuries to increase the depth of the current's penetration. These considerations are in agreement with those reported by Sanchez *et al* (2016) and more recently by Rutkove *et al* (2017). The positioning of the electrodes for L-BIA is crucial in correctly assessing muscle injury and following recovery until the RTP because inconsistent electrode positioning can influence the measurement.

Figure 1 shows a localized bioimpedance electrode placement on the injury located in 1/3 medium quadriceps. Points of reference in the center of the injury determined by US, done with a black permanent marker, can be seen on the leg of the football player. The injured players were supine for 15 min in the medical service (22–24 °C) prior to the L-BIA measurement.



Figure 1. Tetra-polar localized bioimpedance electrode placement on the injury located in 1/3 medium quadriceps.

The reliability of electrode placement is a critical aspect of L-BIA measurement. The inter-tester reproducibility for this L-BIA method had a standard deviation (SD) of 0.6Ω for R and 0.5Ω for X_c , with coefficients of variation (CV) of 1.4 and 3.2%, respectively (Nescolarde *et al* 2013). These estimates are consistent with posterior determinations of repeatability of the L-BIA measurements with a CV of 1.0–1.9% of the L-BIA measurements except in the adductors, which reached 2.1–3.5% (Nescolarde *et al* 2015).

2.3. Data analysis

Data are presented as means and standard deviations (SD). The normality of the distribution of the variables was checked by the Shapiro–Wilk test, and the homogeneity of variances by Levene's test.

One-way ANOVA statistical analysis with Scheffé post hoc test or T2-Tamahne (if non-homogeneity) was used to determine the effect of the severity of injury on relative change (decrease) in R , X_c and PA among grades 1, 2f and 2g, in addition to determining the relationship between the severity of muscle injury and according to grades 1, 2f and 2g, to days to RTP.

The statistical software IBM® SPSS® version 22.0 (Armonk, NY: IBM Corp, USA) was used for the data analysis. The statistical significance was set at $P < 0.05$.

3. Results

The 22 muscle injuries were grouped by identification of the gap by MRI exam, either in myotendinous or myofascial areas, in three groups (grade 1, grade 2f and grade 2g) and evaluated by L-BIA.

Table 1 shows the L-BIA measurements and percent decreases corresponding to grade 1 ($n = 7$), grade 2f ($n = 8$) and grade 2g ($n = 7$) muscle injuries, significantly in R ($p < 0.002$), X_c ($p < 0.0001$) and PA ($p < 0.0001$). The increasing severity of the muscle injury predicted the greater decrease in L-BIA measurements (table 2).

The presence and severity of muscle disruption adversely affected ($p < 0.0001$) time to RTP by 8, 14 and 48 d, respectively (figure 2). As shown in table 3, there was a tendency ($p < 0.067$) for a longer time for RTP between grade 1 (small area of edema) and grade 2f (moderate amount of edema and no gap) whereas greater differences were found between grade 1 (small area of edema) and grade 2g (moderate amount of edema and gap) ($p < 0.001$).

Table 1. Localized bioelectrical impedance measurements for control (contralateral non-injured side), injured side and percentage decrease in R , X_c and PA corresponding to grade 1, grade 2f and grade 2g injuries.

	Non-injured			Injured			Decrease (%)		
	R (Ω)	X_c (Ω)	PA ($^\circ$)	R (Ω)	X_c (Ω)	PA ($^\circ$)	R	X_c	PA
Grade 1	37.3 ^a	14.9	22.2	33.4	12.9	21.5	10.2	13.4	3.2
	7.8 ^b	1.9	3.8	6.6	1.7	3.6	2.4	1.8	2.2
Grade 2f	42.1	15.1	20.1	36.7	11.6	17.8	12.8	23.5	11.2
	7.8	1.8	2.9	7.0	1.4	2.4	4.9	2.2	4.5
Grade 2g	41.2	16.2	22.4	32.8	10.1	17.6	19.9	37.5	20.5
	13.3	2.8	4.6	10.3	1.9	3.1	5.3	7.9	6.3

^aMean.

^bSD.

Table 2. Comparison of percentage of decrease of L-BIA measurements corresponding to grade 1, grade 2f and grade 2g muscle injuries.

L-BIA measurement	Comparison	SE ^c	p
R ^b	1 versus 2f	2.35236	<0.020
	2f versus 2g	2.27766	<0.021
X_c ^c	1 versus 2f	1.02689	<0.001
	1 versus 2g	3.04438	<0.001
	2f versus 2g	3.06761	<0.001
PA ^b	1 versus 2f	2.41639	<0.014
	1 versus 2g	2.49564	<0.001
	2f versus 2g	2.41639	<0.004

^aSE: standard error.

^bScheffe.

^cTamahne.

as well as grade 2f (moderate amount of edema and no gap) and grade 2g (moderate amount of edema and gap) muscle injury ($p < 0.001$).

Figures 3–5 show a MRI example of a muscle injury in rectus femoris grade 1, grade 2f and grade 2g, respectively.

4. Discussion

Using tetra-polar L-BIA measurements at 50kHz in lower leg wounds, Lukaski and Moore (2012) found a modest decrease in R , X_c and PA acutely after debridement with a considerably greater decrease in the advance of infection, and a substantial increase in R , X_c and PA after treatment, and healing is consistent with the hypothesis that L-BIA non-invasively illustrates a cellular level structure previously postulated by the same author (Lukaski 1996). X_c is proportional to cell mass (cell membranes consist of bilayers of lipids and they act as capacitors). Increases in X_c indicate epidermal proliferation and granulation whereas X_c decreases with infection and cell loss. The R -value is inversely proportional to extra-cellular fluid and directly proportional to the fibrin clot and epithelialization and thus indicates successful wound healing. Healthy membranes cause a delay in the transit of voltage and current; thus, the greater the PA, the healthier the cell membranes, and decreases in PA reflect impaired membrane function.

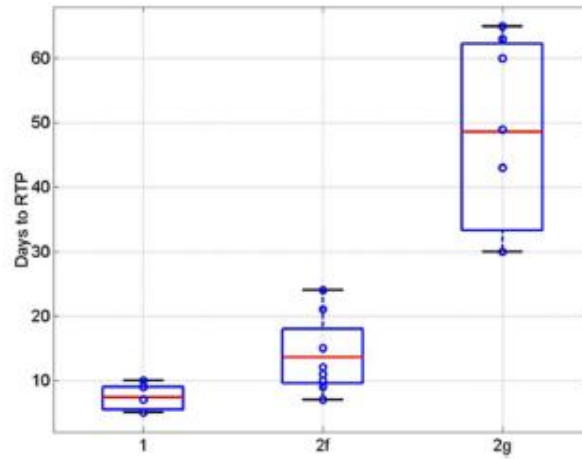


Figure 2. Description of the number of the days from day of injury until day of RTP as box diagrams for injuries grouped by increasing severity of muscle disruption (gap).

Table 3. Results of post hoc analyses of the number of days to RTP for injuries grouped by the presence of muscle disruption (gap).

Days to RTP	Comparison	SE ^a	<i>p</i>
T2-Tamahne	1 versus 2f	2.249 98	0.067
	1 versus 2g	5.676 66	0.001
	2f versus 2g	6.013 12	0.001

^aSE: standard error.

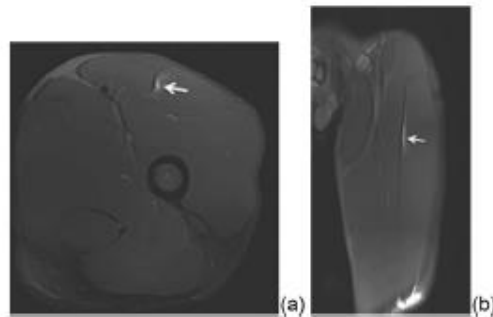


Figure 3. (Grade 1) Fat-suppressed T2-weighted axial (a) and coronal (b) image showing a minimal area of edema (arrows) involving the myotendinous junction with no gap.

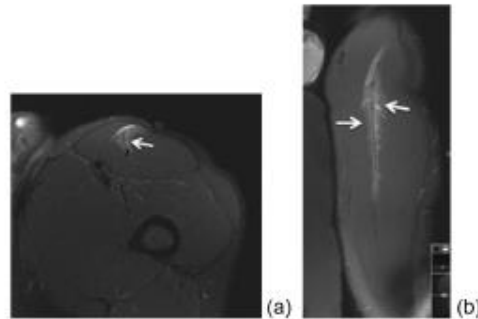


Figure 4. (Grade 2f) Fat-suppressed T2-weighted MRI axial (a) and coronal (b) images showing a moderate feather-like edema (arrows) affecting the myotendinous junction with no gap.

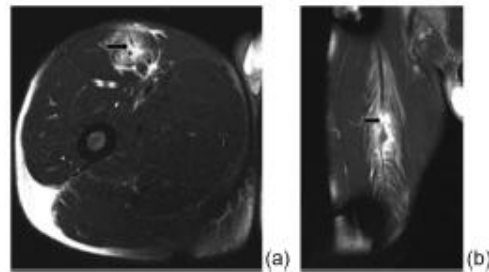


Figure 5. (Grade 2g) Fat-suppressed T2-weighted MRI axial (a) and coronal (b) images showing a moderate feather-like hyper-intense edema affecting the myotendinous junction with a clear gap (thick black arrows) showing loss of integrity of the muscle-tendon complex.

Later Nescolarde *et al* (2013, 2015), found a similar pattern to the aforementioned study in muscle injuries in professional football players, reporting quantitatively a pattern of change in R and X_c according to the severity of the injury in terms of 'grade I' (minor injury), 'grade II' (partial tear or moderate injury) and 'grade III' (complete rupture or severe injury). The most significant changes were observed in severe injuries, showing statistical significance in changes in X_c (muscle fibers retraction, that is 'gap') but not in R (edema). Thus, the authors concluded that, according to previous studies based on MRI criteria (Schneider-Kolsky *et al* 2006, Reurink *et al* 2015), the presence of edema in the injured muscle did not correlate with the grade of the injury.

This work presents 22 muscle injuries in 18 football players. Table 1 describes the value of the contralateral, non-injured side, 24h after injury and the percentage of decrease in R , X_c and PA according to the presence of edema and/or gap by MRI. The results of the one-way ANOVA test of percentage of decrease for seven muscle injuries classified as grade 1, 8 as grade 2f and seven injuries as grade 2g shows high statistical significance among grades 1, 2f and 2g for R ($F = 9.126$, $p < 0.002$), X_c ($F = 46.269$, $p < 0.000$) and PA ($F = 24.164$,

$p < 0.000$). Due to the low number of grade III injuries (complete muscle ruptures involving in addition the tendon) in football we have not used them for this work.

Recently, a new classification of muscle injuries was proposed (Valle *et al* 2016) where the *gap* plays an important role, with the drawback that it is not always possible to identify by MRI. That is the reason why we have divided the classical 'partial muscle tears' (grade II, partial ruptures or moderate injuries) into subgroups: 2f (feather-like MRI with no gap) and 2g (feather-like MRI and gap image). Both are partial tears but the MRI could not detect small gaps in some of them and the classification, based on MRI, will be determined by a small amount of edema (grade I) or much more extension (grade II). The prognosis of the injury and the RTP time will depend on, among others factors, on the severity of the injury and this will be incorrect if the classification of the injury is mistaken. The post hoc analysis shown in table 2 reveals a high statistical difference in X_c and PA contrasting grade 1 with grade 2f, grade 1 with grade 2g and grade 2f with grade 2g. Only in the case of where no statistical differences were observed contrasting grade 1 with grade 2f with the R parameter. So it is interesting to better differentiate the great and heterogeneous group of partial tears in two subgroups because significant changes in X_c could help us give real importance to muscle injury demands and therefore provide the best possible prognosis. Without a doubt, new future MRI devices will be able to detect the very little gaps in small grade II injuries that L-BIA is starting to reveal.

Regarding RTP, grade 1 (7 ± 2 d), 2f (14 ± 6 d) and 2g (48 ± 15 d), a high statistical difference using one-way ANOVA test ($F = 41.286$, $p < 0.000$) was also found. The results of the T2-Tamhane post hoc test show a high statistical difference contrasting grade 1 with grade 2g, grade 2f with grade 2g and a slight statistical difference between grade 1 and grade 2f. These results are shown in table 3 and figure 2. A slight statistical relevance between grade 1 and grade 2f injuries leads us to think that the gap that could exist in grade 2f (not detectable nowadays by MRI) is so small that the recovery time until the RTP could be similar. The great difference is between grades 2f and 2g, nowadays considered as injuries belonging to the same group but with very different prognoses between them.

5. Conclusion

We conclude that the grade of the muscle injury is proportional to the size of the gap, and these results reveal that gap and the severity of the muscle disruption adversely affect RTP time. L-BIA could help in arriving at a diagnosis and in establishing a prognosis for the RTP time.

Acknowledgment

The authors especially wish to thank the players of Futbol Club Barcelona and Jordi Urpí Bellós for their collaboration in this study.

References

- Connell D A *et al* 2014 Longitudinal study comparing sonographic and MRI assessments of acute and healing hamstring injuries *Am. J. Roentgenol.* **183** 975–84
- Ekstrand J, Healy J C, Waldén M, Lee J C, English B and Hägglund M 2012 Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play *Br. J. Sports. Med.* **46** 112–7

- Hamilton B, Valle X, Rodas G, Til L, Pruna Grive R, Gutierrez Rincon J A and Tol J L 2014 Classification and grading of muscle injuries: a narrative review *Br. J. Sports Med.* **49** 306
- Lukaski H C 1996 Biological indexes considered in the derivation of the bioelectrical impedance analysis *Am. J. Clin. Nutr.* **64** 391S–404S
- Lukaski H C 2013 Evolution of bioimpedance: a circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research *Eur. J. Clin. Nutr.* **67** 2S–9S
- Lukaski H C and Moore M 2012 Bioelectrical impedance assessment of wound healing *J. Diabetes Sci. Technol.* **6** 209–12
- Nescolarde L, Yanguas J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J and Rodas G 2013 Localized bioimpedance to assess muscle injury *Physiol. Meas.* **34** 237–45
- Nescolarde L, Yanguas J, Lukaski H, Alomar X, Rosell-Ferrer J and Rodas G 2015 Effects of muscle injury severity on localized bioimpedance measurements *Physiol. Meas.* **36** 27–42
- Pedret C, Rodas G, Balias R, Capdevila L L, Bossy M, Vernooij R W M and Alomar X 2015 Return to play after soleus muscle injuries *Orthop. J. Sports Med.* **3**
- Reurink G, Brilman E G, de Vos R J, Maas M, Moen M H, Weir A, Goudswaard G J and Tol J L 2015 Magnetic resonance imaging in acute hamstring injury: can we provide a return to play prognosis? *Sports Med.* **45** 133–46
- Rutkove S, Pacheck A and Sanchez B 2017 Sensitivity distribution simulations of surface electrode configurations for electrical impedance myography *Muscle Nerve* (<https://doi.org/10.1002/mus.25561>)
- Sanchez B, Pacheck A and Rutkove S B 2016 Guidelines to electrode positioning for human and animal electrical impedance myography research *Sci. Rep.* **6** 32615
- Schneider-Kolsky M E *et al* 2006 A comparison between clinical assessment and magnetic resonance imaging of acute hamstring injuries *Am. J. Sports Med.* **34** 1008–15
- Slavotinek J P, Verrall G M and Fon G T 2002 Hamstring injury in athletes: using MR imaging measurements to compare extent of muscle injury with amount of time lost from competition *Am. J. Roentgenol.* **179** 1621–8
- Valle X *et al* 2016 Muscle injuries in sports: a new evidence-informed and expert consensus-based classification with clinical application *Sports Med.*
- Verrall G M, Slavotinek J P, Barnes P G, Fon G T and Esterman A 2006 Assessment of physical examination and magnetic resonance imaging findings of hamstring injury as predictors for recurrent injury *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **36** 215–24