

TESIS DOCTORAL



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud

Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría

Autor:

Malek Mecherques Carini

Directores:

Dr. D. Francisco Esparza Ros

Dra. Dña. Raquel Vaquero Cristóbal

Dr. D. Mario Demófilo Albaladejo Saura

Murcia, Marzo de 2025

TESIS DOCTORAL



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud

Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría

Autor:

Malek Mecherques Carini

Directores:

Dr. D. Francisco Esparza Ros

Dra. Dña. Raquel Vaquero Cristóbal

Dr. D. Mario Demófilo Albaladejo Saura

Murcia, Marzo de 2025

La presente Tesis Doctoral, titulada "Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría", adopta la modalidad de compendio de publicaciones, en conformidad con la normativa de la Universidad Católica de Murcia (UCAM). Este trabajo se centra en el análisis comparativo de métodos para la estimación de la adiposidad corporal, con especial énfasis en la antropometría, la bioimpedancia eléctrica (BIA) y la absorciometría de rayos X de energía dual (DXA). A través de la evaluación de la concordancia y la precisión de estos métodos, se busca aportar evidencia científica para su aplicación en el ámbito clínico y deportivo. El compendio de esta tesis está conformado por tres artículos científicos, cada uno de los cuales aborda diferentes aspectos de la evaluación de la adiposidad. A continuación, se presentan los detalles de cada artículo:

ARTÍCULO 1

Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population. *Applied Sciences*. 2022; 12(24):13043. <https://doi.org/10.3390/app122413043>

Factor de impacto: 2.7; Cuartil: Q2; Categoría: Engineering, Multidisciplinary; Posición de la revista: 42; Número de revistas en la categoría: 90.

ARTÍCULO 2

Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N and Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front. Nutr.* 2024; 11:1421950. doi: 10.3389/fnut.2024.1421950

Factor de impacto: 4.0; Cuartil: Q2; Categoría: Nutrition & Dietetics; Posición de la revista: 31; Número de revistas en la categoría: 114.

ARTÍCULO 3

Mecherques-Carini, M., Albaladejo-Saura, M., Esparza-Ros, F. et al. Validity between dual-energy x-ray absorptiometry and bioelectrical impedance for segmental fat analysis and a novel low-cost model developed using anthropometry in young adults. *J Transl Med* 23, 40 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-06062-1>

Factor de impacto: 6.1; Cuartil: Q1; Categoría: Medicine, Research & Experimental; Posición de la revista: 29; Número de revistas en la categoría: 189.

Los resultados de esta Tesis Doctoral también han sido presentados en varios foros y eventos científicos nacionales e internacionales. A continuación, se presenta una relación de las comunicaciones presentadas:

COMUNICACIONES ORALES:

- Mecherques-Carini, M.; Albaladejo-Saura, M.; Vaquero-Cristóbal, R.; Esparza-Ros, F. Validity and Agreement between Dual-energy X-ray Absorptiometry, Anthropometry and Bioelectrical Impedance in the estimation of fat mass in young female adults. 3rd Edition of the International Congress "Exercise, Biomechanics and Nutrition", 4-5 de junio de 2024, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal.
- Mecherques-Carini, M.; Albaladejo-Saura, M.; Vaquero-Cristóbal, R.; Baglietto, N.; Esparza-Ros, F. Agreement and differences between fat estimation formulas using kinanthropometry in a physically active female population. 2nd Edition of the International Congress "Exercise, Biomechanics and Nutrition", 10-11 de mayo de 2023, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal.
- Mecherques-Carini, M.; Esparza-Ros, F.; Albaladejo-Saura, M.; Vaquero-Cristóbal, R. Agreement in fat estimation formulae using kinanthropometry in a physically active population. ISAK 2024 XVIII World Conference on Kinanthropometry, 5-7 de agosto de 2024, St Mary's University, Londres, Reino Unido.
- Mecherques-Carini, M.; Vaquero-Cristóbal, R.; Albaladejo-Saura, M.; Esparza-Ros, F. Estimación de la adiposidad corporal a través del porcentaje graso en antropometría. VIII Jornadas de Investigación y Doctorado: Ética en la Investigación Científica, 24 de junio de 2022, Universidad Católica de Murcia, España.
- Mecherques-Carini, M.; Vaquero-Cristóbal, R.; Albaladejo-Saura, M.; Esparza-Ros, F. Concordancia y diferencias entre las fórmulas de estimación de la grasa mediante antropometría en una población masculina físicamente activa. IX Jornadas de Investigación y Doctorado: Impacto Social de la Ciencia, 23 de junio de 2023, Universidad Católica de Murcia, España.
- Mecherques-Carini, M. Estimación de la adiposidad corporal: fórmulas antropométricas y métodos alternativos. VII Jornadas de Investigación y Doctorado: ODS con Ciencia, 25 de junio de 2021, Universidad Católica de Murcia, España.

PRESENTACIÓN EN PÓSTER:

- Mecherques-Carini, M.; Esparza-Ros, F.; Albaladejo-Saura, M.; Vaquero-Cristóbal, R. Agreement in fat estimation formulae using kinanthropometry in a physically active population. ISAK 2024 XVIII World Conference on Kinanthropometry, 5-7 de agosto de 2024, St Mary's University, Londres, Reino Unido.

Además de su publicación en revistas indexadas y la presentación en congresos científicos, parte de los resultados de esta tesis doctoral han sido incluidos en un capítulo de libro. En este capítulo se abordan los hallazgos relacionados con la validez y concordancia entre distintos métodos para la estimación de la adiposidad corporal, proporcionando un enfoque aplicado en el contexto de la equidad de género en el deporte.

CAPÍTULO DE LIBRO:

- Mecherques-Carini, M., Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., Baglietto, N., & Esparza-Ros, F. (2025). Validez y concordancia entre la absorciometría de rayos X de doble energía, la antropometría y la impedancia bioeléctrica en la estimación de la masa grasa en mujeres adultas jóvenes. En M. D. Albaladejo-Saura (Coord.), *Women-up: Innovación, perspectivas y avances en la equidad de género en el deporte* (pp. 75-89). Editorial Dykinson. ISBN: 9791370060503 ; DOI: <https://doi.org/10.14679/3827>



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Francisco Esparza Ros, la Dra. Dña. Raquel Vaquero Cristóbal y el Dr. D. Mario Demófilo Albaladejo Saura como Directores⁽¹⁾ de la Tesis Doctoral titulada “Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría” realizada por D. Malek Mecherques Carini en el Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, en Murcia a 22 de Marzo de 2025.

Dr. D. Francisco Esparza Ros

Dra. Dña. Raquel Vaquero Cristóbal

Dr. D. Mario Demófilo Albaladejo Saura

⁽¹⁾ Si la Tesis está dirigida por más de un Director tienen que constar y firmar ambos.

RESUMEN

La adiposidad corporal desempeña un rol fundamental en salud, rendimiento deportivo y estética, siendo su evaluación cada vez más relevante en las últimas décadas. La acumulación excesiva de tejido adiposo se asocia con complicaciones metabólicas y cardiovasculares, destacando la obesidad como una de las principales causas de enfermedades crónicas, entre ellas diabetes tipo 2, hipertensión y dislipidemias. Además, la distribución de la grasa corporal influye significativamente en el rendimiento deportivo, ya que el exceso de tejido adiposo actúa como un lastre que compromete la eficiencia en disciplinas que requieren velocidad, agilidad y resistencia. En el ámbito estético, la adiposidad motiva a muchas personas a buscar estrategias de control de la composición corporal, haciendo de su evaluación una herramienta indispensable tanto para profesionales de la salud como para entrenadores, atletas y población en general que buscan mejorar su imagen y bienestar.

A lo largo de los años, se han desarrollado múltiples métodos para estimar la adiposidad corporal. La antropometría es uno de los métodos más antiguos y accesibles, utilizado ampliamente debido a su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, a pesar de su popularidad, la antropometría presenta limitaciones importantes en cuanto a su precisión y reproducibilidad, especialmente cuando se trata de evaluar de forma segmental la distribución de la grasa corporal. La necesidad de estimaciones más precisas ha impulsado el desarrollo de métodos avanzados como la absorciometría de rayos X de energía dual (DXA) y la bioimpedancia eléctrica (BIA), que permiten una evaluación a nivel total y segmental de la grasa corporal.

El DXA, por ejemplo, se ha convertido en el método de referencia para la medición de la composición corporal debido a su capacidad para diferenciar entre masa libre de grasa, masa grasa y contenido mineral óseo a nivel molecular. Sin embargo, a pesar de su alta precisión, este método presenta inconvenientes en términos de costo y accesibilidad, lo que limita su uso en estudios de campo o en grandes muestras poblacionales. Por otro lado, la BIA ha ganado popularidad en los últimos años gracias a su facilidad de uso, portabilidad y la capacidad de algunos dispositivos para ofrecer estimaciones segmentales de grasa y masa libre

de grasa. Sin embargo, su precisión puede verse comprometida cuando se utilizan dispositivos que no brindan los valores brutos como la resistencia y reactancia, que son fundamentales para mejorar la fiabilidad del método.

La comparación entre estos métodos ha sido objeto de múltiples estudios, que buscan determinar cuál ofrece una mayor precisión y validez en diferentes poblaciones. Estos estudios han revelado discrepancias importantes entre las estimaciones de grasa corporal global obtenidas por los diferentes métodos, aunque son necesarias investigaciones que aborden si esto pudiese depender de factores como la fórmula aplicada, el sexo, la hidratación o el IMC. Además, pocos estudios han analizado la comparabilidad en la valoración segmental, no siendo posible abordar esta cuestión desde la antropometría hasta el momento.

Por todo lo anterior, el primer estudio de esta tesis tuvo como objetivos: a) analizar las diferencias y el grado de concordancia entre las fórmulas más utilizadas para la estimación de lípidos entre sí y en comparación con la fórmula de adiposidad de Kerr una vez estimado su contenido lipídico; b) examinar la similitud entre los resultados reportados por las diferentes fórmulas en comparación con la fórmula de Kerr; y c) establecer la relación existente de las mismas con los diferentes sumatorios de pliegues y el IMC según el sexo.

El segundo estudio tuvo como objetivos: a) determinar la concordancia del DXA tanto con la BIA como con la antropometría para estimar la masa grasa corporal y analizar si el sexo y el estado de hidratación afectan estos resultados; y b) analizar la validez de la antropometría y la BIA frente al DXA para la estimación de la masa grasa, así como las diferentes fórmulas disponibles, y si el sexo y el estado de hidratación pueden influir en este aspecto.

Finalmente, el tercer estudio tuvo como objetivos: a) analizar las diferencias entre el DXA y la BIA en la medición de grasa segmental, y determinar la influencia del IMC, el estado de hidratación y el sexo en las diferencias entre métodos; y b) desarrollar fórmulas antropométricas a través de regresión lineal para predecir los kg de grasa en cada segmento corporal (miembros superiores derecho e izquierdo, tronco y miembros inferiores derecho e izquierdo), en comparación con el DXA.

En el primer estudio, 87 sujetos fueron evaluados mediante antropometría siguiendo el protocolo de la Sociedad Internacional para el Avance de la Cineantropometría (ISAK). Se calcularon los porcentajes de grasa utilizando 14

fórmulas para hombres y 12 para mujeres. Se encontraron diferencias significativas entre las fórmulas en ambos sexos (hombres: $8,90 \pm 2,17\%$ a $17,91 \pm 2,84\%$; $p < 0.001-0.016$; mujeres: $15,33 \pm 2,94\%$ a $28,79 \pm 3,30\%$; $p < 0.001-0.004$). Para los hombres, las fórmulas de Carter y Yuhasz, y las de Civar y Faulkner, mostraron una concordancia moderada entre sí ($CCC=0.910-0.915$), mientras que en mujeres se observó concordancia moderada entre las fórmulas de Carter y Yuhasz ($CCC=0.974$). El resto de las fórmulas mostró baja concordancia y ninguna fórmula reportó resultados similares a los de Kerr ($p > 0.05$). Estos hallazgos sugieren que las fórmulas utilizadas para la estimación de lípidos mediante antropometría producen resultados significativamente diferentes y no son comparables entre sí, descartando el IMC como indicador de adiposidad y proponiendo la suma de pliegues cutáneos como variable predictiva.

El segundo estudio incluyó a 265 adultos jóvenes (161 hombres y 104 mujeres) evaluados mediante DXA, BIA en posición de pie y antropometría. Se calcularon fórmulas de estimación de masa grasa para cada método: una fórmula de DXA, una de BIA y diez fórmulas de antropometría. Se encontraron diferencias significativas entre DXA, BIA y antropometría en la muestra total ($p < 0.001$), y al incluir la covariable sexo ($p < 0.001$), sin efecto significativo del estado de hidratación ($p=0.332-0.527$). Las pruebas de Bonferroni revelaron diferencias significativas respecto al DXA para la mayoría de las fórmulas tanto en kilogramos como en porcentaje de grasa ($p < 0.001$). El coeficiente de Lin indicó baja concordancia entre la mayoría de las fórmulas y métodos ($CCC=0.135-0.892$). En el análisis de Bland-Altman, solo la fórmula de Carter en kilogramos y porcentaje mostró acuerdo con el DXA en la muestra general ($p=0.136$; $p=0.929$), y la fórmula de Forsyth mostró concordancia en porcentaje ($p=0.365$). Al separar por sexo, se halló falta de acuerdo en hombres para todos los métodos frente al DXA ($p < 0.001$) y en mujeres todas las fórmulas, excepto la de Evans en porcentaje ($p=0.058$). Los resultados sugieren que las fórmulas de antropometría y BIA no son válidas respecto al DXA, salvo excepciones como la fórmula de Carter en la muestra general y la de Evans en mujeres.

En el tercer estudio, participaron 264 adultos jóvenes (161 hombres y 103 mujeres) a quienes se midió la grasa segmental mediante DXA y BIA, además de realizarse una evaluación antropométrica siguiendo el protocolo ISAK. Se encontraron diferencias significativas entre DXA y BIA para la grasa segmental en

las extremidades y el tronco ($p < 0.001$), con influencia del sexo ($p < 0.05$) pero sin efecto significativo del IMC ni del estado de hidratación. El análisis de Bland-Altman mostró diferencias significativas entre ambos métodos en la grasa de los miembros superiores e inferiores ($p < 0.001$). En el caso de la grasa del tronco, se observaron diferencias en la mayoría de los casos, salvo en la muestra general ($p = 0.0881$). A partir de las mediciones antropométricas, se desarrollaron modelos de regresión con alta precisión predictiva en ambos sexos (mujeres: $R^2 = 0.766-0.910$; hombres: $R^2 = 0.758-0.887$; $p < 0.001$). Los predictores claves incluyeron la masa corporal ($r = 0.606-0.867$; $p < 0.001$), el espesor de pliegues cutáneos ($r = 0.688-0.893$; $p < 0.001$) y el perímetro de cintura ($r = 0.883-0.810$; $p < 0.001$). Los modelos desarrollados se presentan como una alternativa práctica y precisa para la predicción de grasa segmental en contextos clínicos sin acceso a DXA.

En el primer estudio, se concluyó que existen diferencias entre los resultados reportados por las diferentes fórmulas para estimar los niveles de lípidos corporales mediante antropometría, y la mayoría muestra baja concordancia entre sí. Estos hallazgos evidencian que los resultados no son comparables entre fórmulas, lo que resalta la necesidad de utilizar la misma fórmula tanto al comparar con referencias como al evaluar el progreso en un mismo sujeto. En este contexto, la fórmula de Kerr se posiciona como la mejor alternativa debido a su validación en cadáveres, su inclusión de seis pliegues de diferentes segmentos corporales y su protocolo estandarizado, siendo actualmente la más utilizada a nivel mundial.

En el segundo estudio, se concluye que las fórmulas para la evaluación de la masa grasa mediante antropometría y BIA pueden no ser válidas respecto a los valores reportados por DXA, con excepción de las fórmulas de Carter y Forsyth en la muestra general y la fórmula de Evans en mujeres. La BIA también podría ser una alternativa para evaluar la masa grasa en mujeres como grupo.

En el tercer estudio, la BIA demostró una validez limitada para la estimación de la masa grasa segmental en comparación con el DXA. Los hallazgos actuales sugieren que ni el IMC ni el estado de hidratación influyeron significativamente en las diferencias entre BIA y DXA; sin embargo, el sexo se destacó como un factor crucial, subrayando la necesidad de enfoques específicos según el sexo tanto en contextos clínicos como de salud pública. Como consecuencia, este estudio destaca la importancia de desarrollar métodos accesibles y específicos por sexo para la evaluación de la masa grasa segmental. Los modelos de regresión antropométricos

desarrollados en esta investigación ofrecen una alternativa confiable y rentable para estimar la masa grasa en los miembros superiores, tronco y miembros inferiores, siendo especialmente útiles en iniciativas de salud pública que buscan mejorar la detección temprana y apoyar estrategias de atención individualizada en diversas comunidades.

En conjunto, los tres estudios ofrecen una perspectiva integral que combina análisis comparativos y desarrollos prácticos en la evaluación de la adiposidad corporal. Este trabajo no solo destaca las fortalezas y limitaciones de los métodos más utilizados actualmente, sino que también introduce soluciones innovadoras mediante modelos antropométricos adaptables a diferentes contextos. Al aportar evidencias claras sobre la accesibilidad, confiabilidad y aplicabilidad de estas herramientas, esta tesis contribuye de manera significativa al diseño de estrategias más precisas y consistentes para la valoración de la adiposidad tanto general como segmental, fomentando su integración en salud pública, práctica clínica y el ámbito deportivo.

PALABRAS CLAVE

Absorciometría de rayos X de energía dual; Adiposidad; Análisis de impedancia bioeléctrica; Antropometría; Cineantropometría; Composición corporal; Deporte; Estética; Lípidos; Masa grasa; Modelo molecular; Modelo tisular; Pliegues cutáneos; Rendimiento; Salud; Tejido adiposo.

ABSTRACT

Body fat plays a fundamental role in health, sports performance, and aesthetics, making its assessment increasingly relevant in recent decades. Excess adipose tissue accumulation is associated with metabolic and cardiovascular complications, highlighting obesity as one of the primary causes of chronic diseases, including type 2 diabetes, hypertension, and dislipemia. Furthermore, the distribution of body fat significantly influences sports performance, as excess adipose tissue acts as ballast, compromising efficiency in disciplines that require speed, agility, and endurance. In the aesthetic domain, adiposity motivates many individuals to seek strategies for body composition control, making its assessment an indispensable tool for health professionals, trainers, athletes, and the general population aiming to improve their appearance and well-being.

Over the years, multiple methods have been developed to estimate body fat. Anthropometry is one of the oldest and most accessible methods, widely used due to its simplicity and low cost. However, despite its popularity, anthropometry has significant limitations regarding its precision and reproducibility, especially when evaluating the segmental distribution of body fat. The need for more accurate estimates has driven the development of advanced methods such as dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) and bioelectrical impedance analysis (BIA), which allow for both total and segmental assessments of body fat.

DXA, for instance, has become the reference method for body composition measurement due to its ability to differentiate between fat-free mass, fat mass, and bone mineral content at the molecular level. However, despite its high precision, this method has drawbacks in terms of cost and accessibility, limiting its use in field studies or large population samples. On the other hand, BIA has gained popularity in recent years due to its ease of use, portability, and the capacity of some devices to provide segmental estimates of fat and fat-free mass. However, its precision can be compromised when using devices that do not provide raw values, such as resistance and reactance, which are fundamental to improving the reliability of the method.

Comparisons between these methods have been the subject of numerous studies aiming to determine which offers greater precision and validity in different populations. These studies have revealed significant discrepancies between the

global fat estimates obtained by different methods. However, further research is needed to determine whether these discrepancies depend on factors such as the applied formula, sex, hydration status, or BMI. Additionally, few studies have analyzed the comparability of segmental assessments, with anthropometry unable to address this issue to date.

For these reasons, the first study of this thesis aimed to: a) analyze the differences and degree of agreement between the most widely used formulas for lipid estimation compared to each other and to Kerr's adiposity formula, after estimating lipid content; b) examine the similarity between the results reported by different formulas in comparison to Kerr's formula; and c) establish the relationship between these formulas and various skinfold sums and BMI by sex.

The second study aimed to: a) determine the agreement of DXA with both BIA and anthropometry for estimating body fat mass and analyse whether sex and hydration status affect these results; and b) evaluate the validity of anthropometry and BIA compared to DXA for body fat estimation, as well as the different available formulas, and whether sex and hydration status influence these estimates.

Finally, the third study aimed to: a) analyse the differences between DXA and BIA in measuring segmental fat and determine the influence of BMI, hydration status, and sex on the differences between methods; and b) develop anthropometric formulas through linear regression to predict fat mass in each body segment (right and left upper limbs, trunk, and right and left lower limbs) compared to DXA.

In the first study, 87 subjects were evaluated using anthropometry following the protocol of the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK). Fat percentages were calculated using 14 formulas for men and 12 for women. Significant differences were found between the formulas for both sexes (men: $8.90 \pm 2.17\%$ to $17.91 \pm 2.84\%$; $p < 0.001-0.016$; women: $15.33 \pm 2.94\%$ to $28.79 \pm 3.30\%$; $p < 0.001-0.004$). For men, the formulas by Carter and Yuhasz, and those by Civar and Faulkner, showed moderate agreement among themselves ($CCC = 0.910-0.915$), while for women, moderate agreement was observed between Carter and Yuhasz ($CCC = 0.974$). The remaining formulas showed low agreement, and no formula reported similar results to Kerr's formula ($p > 0.05$). These findings suggest that the formulas used for lipid estimation through anthropometry yield significantly different results and are not comparable to each other, discarding BMI

as an adiposity indicator and proposing the sum of skinfolds as a predictive variable.

In the second study, 265 young adults (161 men and 104 women) were evaluated using DXA, standing BIA, and anthropometry. Fat mass estimation formulas were applied for each method: one formula for DXA, one for BIA, and ten formulas for anthropometry. Significant differences were found among DXA, BIA, and anthropometry in the total sample ($p < 0.001$), with sex included as a covariate ($p < 0.001$), and no significant effect of hydration status ($p = 0.332-0.527$). Bonferroni tests revealed significant differences from DXA for most formulas in both kilograms and fat percentage ($p < 0.001$). Lin's coefficient indicated low agreement between most formulas and methods ($CCC = 0.135-0.892$). Bland-Altman analysis showed that only Carter's formula, in both kilograms and percentage, agreed with DXA in the general sample ($p = 0.136$; $p = 0.929$), while Forsyth's formula showed agreement in percentage ($p = 0.365$). When separated by sex, no methods agreed with DXA for men ($p < 0.001$), while in women, all formulas failed to show agreement except Evans' formula in percentage ($p = 0.058$). These results suggest that anthropometry and BIA formulas are not valid compared to DXA, except for Carter's formula in the general sample and Evans' formula in women.

In the third study, 264 young adults (161 men and 103 women) were evaluated for segmental fat using DXA and BIA, in addition to anthropometric assessments following the ISAK protocol. Significant differences were found between DXA and BIA for segmental fat in limbs and the trunk ($p < 0.001$), influenced by sex ($p < 0.05$) but not by BMI or hydration status. Bland-Altman analysis showed significant differences between the two methods for fat in upper and lower limbs ($p < 0.001$). For trunk fat, differences were observed in most cases except in the general sample ($p = 0.0881$). Anthropometric measurements were used to develop regression models with high predictive accuracy for both sexes (women: $R^2 = 0.766-0.910$; men: $R^2 = 0.758-0.887$; $p < 0.001$). Key predictors included body mass ($r = 0.606-0.867$; $p < 0.001$), skinfold thickness ($r = 0.688-0.893$; $p < 0.001$), and waist circumference ($r = 0.883-0.810$; $p < 0.001$). The developed models are presented as a practical and accurate alternative for segmental fat prediction in clinical settings without access to DXA.

In the first study, it was concluded that there are differences between the results reported by the different formulas for estimating body lipid levels by

anthropometry, and most of them show low agreement with each other. These findings show that the results are not comparable between formulas, which highlights the need to use the same formula both when comparing with references and when assessing progress in the same subject. In this context, Kerr's formula stands out as the best alternative due to its validation in cadavers, inclusion of six skinfolds from different body segments, and standardized protocol, making it the most widely used worldwide.

In the second study, it was concluded that anthropometry and BIA formulas for body fat evaluation may not be valid compared to DXA values, except for Carter's and Forsyth's formulas in the general sample and Evans' formula in women. BIA may also be a valid alternative for assessing fat mass in women as a group.

In the third study, BIA showed limited validity for segmental fat mass estimation compared to DXA. Current findings suggest that BMI and hydration status did not significantly influence the differences between BIA and DXA; however, sex emerged as a critical factor, highlighting the need for sex-specific approaches in both clinical and public health contexts. Consequently, this study underscores the importance of developing accessible and sex-specific methods for segmental fat evaluation. The anthropometric regression models developed in this research provide a reliable and cost-effective alternative for estimating fat mass in the upper limbs, trunk, and lower limbs, proving especially useful in public health initiatives aimed at early detection and supporting individualized care strategies in diverse communities.

Together, the three studies offer a comprehensive perspective that integrates comparative analyses and practical developments in the evaluation of body adiposity. This work not only highlights the strengths and limitations of the most commonly used methods but also introduces innovative solutions through anthropometric models adaptable to different contexts. By providing clear evidence on the accessibility, reliability, and applicability of these tools, this thesis significantly contributes to the design of more precise and consistent strategies for general and segmental adiposity evaluation, fostering their integration in public health, clinical practice, and the sports field.

KEYWORDS

Adiposity; Adipose Tissue; Aesthetics; Anthropometry; Bioelectrical Impedance Analysis; Body Composition; Body Fat; Dual-energy X-ray Absorptiometry; Health; Kinanthropometry; Lipids; Molecular Model; Performance; Skinfolds; Sport; Tissue Model.

AGRADECIMIENTOS

En este camino, muchas personas han sido parte fundamental, y quiero dedicar unas palabras a quienes hicieron posible esto.

En primer lugar, a mis directores de tesis doctoral, gracias por ser parte esencial de este camino y por ayudarme a llegar a este momento tan especial. Desde que llegué a un nuevo continente, lleno de incertidumbres, pero con una gran ilusión, confiaron en mí. Esa confianza, que comenzó con el Trabajo de Fin de Máster, marcó el inicio de algo mucho más grande, transformándose en esta tesis doctoral. Nunca olvidaré aquel almuerzo en el que, casi sin entender del todo la magnitud del reto, acepté su propuesta de tutorizarme. Hoy, miro hacia atrás y valoro profundamente esa oportunidad, la paciencia y el apoyo constante. Gracias por creer en mí y por enseñarme que el esfuerzo, guiado por pasión, siempre tiene su recompensa.

Al Dr. Francisco Esparza Ros, gracias por liderar este gran equipo de trabajo con tanta dedicación y por compartir sus historias y aventuras (sí, incluso las largas). En cada una de ellas siempre hay mensajes valiosos que dejan huella. Gracias por confiar en mí, por todas las gestiones que ha realizado y por estar siempre al pie del cañón. Pero sobre todo, gracias por crear un espacio donde todos podemos mejorarnos y crecer. Su liderazgo inspira, y me siento afortunado de haber tenido la oportunidad de caminar este camino con usted.

A la Dra. Raquel Vaquero Cristóbal, gracias por todo lo que me has enseñado, no solo profesionalmente, sino también a nivel personal. Tu exigencia me ha impulsado a dar lo mejor de mí en todo momento. Gracias por dedicar tanto de tu (escaso) tiempo a mis correcciones, por enseñarme con paciencia y por mostrarme, con tu increíble capacidad de trabajo, todo lo que se puede llegar a ser. Sos brillante, y tenerte como guía en este camino ha sido un verdadero privilegio. Aunque admito que a veces he temido tus comentarios en rojo en los borradores, siempre he sabido que detrás de cada corrección había una lección valiosa. ¡Gracias por todo, Raquel!

Al Dr. Mario Demófilo Albaladejo Saura, gracias por permitirme ser parte de tu propia tesis doctoral y por llevarme a medir y medir sin descanso. Con la

tranquilidad que te caracteriza, siempre has estado ahí para ayudarme, resolver mis dudas y aportar tus ideas. Gracias también por tu infinita paciencia con los números, la estadística y esas interminables tablas que tuvimos que preparar. Sin tu asistencia, la estadística de esta tesis habría sido, como mínimo, mucho más complicada. ¡Gracias por todo, Mario, ha sido un lujo compartir este camino contigo!

A los alumnos de prácticas que han participado en estas investigaciones, gracias por su esfuerzo, dedicación y por “ponerse la camiseta” en todo momento. Su compromiso ha sido clave para el éxito de este proyecto. ¡Gracias por formar parte de esto!

A la Universidad Católica de Murcia y a todo el personal del Hi-Tech por facilitarnos la tarea y permitirme llevar a cabo la tesis doctoral en la institución donde he tenido la suerte de formarme académicamente.

Al Sr. Nicolás Baglietto, ¿qué decirte querido narizotas? Gracias por compartir este camino conmigo. Hemos pasado por todo: enojándonos ante cada tropiezo, celebrando cada mail favorable y trabajando codo a codo para llegar juntos a este momento. Gracias por las incontables aventuras, por ayudarme a desconectar cuando era necesario, por conectarme cuando más lo necesitaba y, sobre todo, por tus horribles mates que nos han acompañado todos estos años. De tan feos, creo que hasta me han despertado buenas ideas. Sigamos construyendo, amigo, que todavía queda mucho por hacer.

A mis viejos, gracias por ser quienes son y por haberme dado todo lo que soy. Gracias por criarme con amor, por educarme con paciencia y por enseñarme el mundo. Por mostrarme siempre que el esfuerzo, la honestidad y el trabajo son la base de todo lo que vale la pena en la vida. Por bancarme en cada paso del camino, motivándome a ser mejor y recordándome, incluso en los momentos difíciles, que “siempre que llovió, paró”. Me enseñaron a soñar, pero también a trabajar por esos sueños. Este logro es tan mío como suyo. Gracias, de corazón, por ser mi ejemplo.

A mi abuelo Carlitos. ¡Llegó el día abuelo! Ahora sí, tu nieto es “doctor”. Estoy seguro de lo orgullo que estás donde quiera que estés.

A mi novia Carolina, gracias por estar a mi lado en estos años tan intensos. No puedo más que agradecerte por bancarme en todo momento: mis malhumores, los días difíciles, las interminables horas de trabajo y mis infinitos viajes de trabajo.

Has sido mi refugio y mi calma en medio de la tormenta, enseñándome todos los días. Gracias por aguantarlo todo Carito. Este logro también es tuyo, porque sin compartirlo con vos, este camino habría sido mucho más difícil.

Por último, gracias infinitas a cada una de las personas que se cruzaron en mi camino durante estos años: alumnos, investigadores, amigos, familia y todos aquellos que, de una forma u otra, les tocó lidiar con el "Malek doctorando". Cada uno de ustedes ha dejado su huella, ya sea con su apoyo, paciencia, enseñanzas o simplemente estando ahí. Gracias, de corazón, por ser parte de esta apasionante aventura con final feliz. ¡Seguimos!

"No es el logro en sí lo que nos define, sino la disciplina que desarrollamos en el camino." – Helen Keller (1880-1968).

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....9

I - INTRODUCCIÓN.....37

II - JUSTIFICACIÓN43

2.1. Primeras Investigaciones y Definiciones de Adiposidad.....45

2.1.1. Primeras Investigaciones y Percepciones antiguas de Adiposidad45

2.1.2. Introducción del concepto de tejido adiposo en la anatomía y fisiología46

2.2. Relevancia de la valoración de la grasa corporal47

2.2.1. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito de la salud47

2.2.2. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito de la estética50

2.2.3. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito del rendimiento deportivo51

2.3. Aproximación conceptual.....53

2.4. MODELO DE CINCO NIVELES DE WANG PARA EL ABORDAJE DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL54

2.5. MÉTODOS DE VALORACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL57

2.5.1. DXA para la estimación de la adiposidad57

2.5.2. BIA para la estimación de la adiposidad.....57

2.5.3. Antropometría para la estimación de la adiposidad58

2.6. COMPARABILIDAD ENTRE LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL.....59

III - OBJETIVOS63

3.1.	Objetivo General	65
3.2.	Objetivos Específicos	65
3.3.	General Objectives	66
3.4.	Specific Objectives	66
IV -	Hipótesis	69
4.1	Hipótesis General	71
4.2	Hipótesis específicas	71
4.3	General Hypothesis	72
4.4	Specific Hypothesis	72
V -	MATERIAL Y MÉTODO	73
VI -	COMPENDIO DE ARTÍCULOS	85
6.1.	Artículo 1	87
6.2.	Artículo 2	108
6.3.	Artículo 3	125
VII -	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	149
VIII -	CONCLUSIONES	159
IX -	APLICACIONES PRÁCTICAS	165
X -	LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	171
XI -	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177
XII -	ANEXOS	191

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ANTHR, antropometría

BIA, bioimpedancia eléctrica

CCC, coeficiente de concordancia

CI, intervalo de confianza

Cm, centímetros

DXA, absorciometría de rayos X de energía dual

F, femeninas

HDL, lipoproteína de alta densidad

HR, horas

IL6, interleucina 6

IMC, índice de masa corporal

IPAQ, cuestionario internacional de actividad física

ISAK, International Society for the Advancement of Kinanthropometry

Kg, kilogramos

kHz, kilohercios

M, masculinos

MAX, máximo

METs, unidad metabólica de reposo

MIN, mínimo

Mm, milímetros

OMS, Organización Mundial de la Salud

p, significancia

Q, precisión incluida

SD, desviación estándar

$\Sigma 6$, sumatorio de 6 pliegues

Sum, sumatorio

TEM, error técnico de medición

TNF- α , factor de necrosis tumoral alfa

UWW, pesaje hidrostático

°C, grados Celsius

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

ESTUDIO 2

Figura 1. Participant’s flow chart.....112

Figura 2. Point plot of the concordance between methods of fat mass in percentage reported by DXA in general sample.....115

Figura 3. Point plot of the concordance between methods of fat mass in kilograms reported by DXA in general sample.....115

Figura 4. Point plot of the concordance between methods of fat mass in kilograms reported by DXA in males.....116

Figura 5. Point plot of the concordance between methods of fat mass in percentage reported by DXA in males.....116

Figura 6. Point plot of the concordance between methods of fat mass in kg reported by DXA in females.....117

Figura 7. Point plot of the concordance between methods of fat mass in percentage reported by DXA in females.....117

Figura 8. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the fat mass in kg reported by DXA in the general sample.....118

Figura 9. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the percentage of fat mass reported by DXA in the general sample.118

Figura 10. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the fat mass in kg reported by DXA in males.119

Figura 11. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the percentage of fat mass reported by DXA in males.119

Figura 12. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the fat mass in kg reported by DXA in females.120

Figura 13. Bland–Altman analysis comparing all formulas and methods with the percentage of fat mass reported by DXA in females.120

ESTUDIO 3

Figura 1. Participant’s flow chart.128

ÍNDICE DE TABLAS

ESTUDIO 1

Tabla 1. Characteristics and information regarding the validation, variables and estimated component of the formulas used.....90

Tabla 2. Descriptive analysis of anthropometric variables and lipid percentages in men and women.....96

Tabla 3. Differences between lipid formulas in mean of percentages in men.....96

Tabla 4. Differences between lipid formulas in mean of percentages in women.....97

Tabla 5. Lin’s concordance correlation coefficient between the different formulas in men.....99

Tabla 6. Lin’s concordance correlation coefficient between the different formulas in women.....100

Tabla 7. Inter-formula comparison for lipid percentage estimation in men and women.....102

Tabla 8. Percentile relationships between BMI, skinfold sum and adiposity formulas in men.....103

Tabla 9. Percentile relationships between BMI, skinfold sum and adiposity formulas in women.....103

ESTUDIO 2

Tabla 1. Methods and equations for the estimation of fat mass included in the present study.113

Tabla 2. Descriptive analysis of fat mass in kilograms and percentages in the general sample and separated into male and female samples.....114

Tabla 3. Analysis of differences in fat mass (kg and percentage) between DXA, BIA, and anthropometry for the general sample and according to sex.....	114
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ESTUDIO 3

Tabla 1. Descriptive analysis of kg and percentages of fat mass by body segments estimated by DXA and BIA in the general sample and divided by sex.....	131
Tabla 2 Analysis of differences in fat mass (kg and percentage) by body segments between DXA and BIA for the general sample and divided by sex.....	132
Tabla 3. Bland–Altman results for the agreement between DXA and BIA for estimating kilograms of fat mass in each segment for the general sample and divided by sex.....	133
Tabla 4. Pearson and partial correlations between DXA segmental fat mass and anthropometric variables in the male sample, controlling for BMI and hydration status.....	134
Tabla 5. Pearson and partial correlations between DXA segmental fat mass and anthropometric variables in the female sample, controlling for BMI and hydration status.....	137
Tabla 6. Multivariate regression models using anthropometric variables in males.....	139
Tabla 7. Multivariate regression models using anthropometric variables in females.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. APROBACIÓN DEL COMITÉ DE ÉTICA.....	193
Anexo 2. CONSENTIMIENTO INFORMADO ADULTOS.....	195
Anexo 3. REVOCACIÓN CONSENTIMIENTO INFORMADO ADULTOS.....	196
Anexo 4. REVOCACIÓN CONSENTIMIENTO INFORMADO ADULTOS.....	197
Anexo 5. CUESTIONARIO DE DATOS PERSONALES DE LOS VOLUNTARIOS.....	198
Anexo 6. CUESTIONARIO DE ALIMENTACIÓN.....	199
Anexo 7 CUESTIONARIO DE CONSUMO DE SUPLEMENTOS.....	201
Anexo 8. CUESTIONARIO INTERNACIONAL DE ACTIVIDAD FÍSICA (IPAQ).....	203
Anexo 9. CUESTIONARIO DE EJERCICIO FÍSICO 48HS. PREVIAS.....	205
Anexo 10. INFORME EJEMPLO DE DXA.....	208
Anexo 11. INFORME EJEMPLO DE BIA GENERAL.....	212
Anexo 12. INFORME EJEMPLO DE BIA SEGMENTAL.....	215
Anexo 13. INFORME EJEMPLO DE BIA DATOS BRUTOS.....	217

I – INTRODUCCIÓN

I- INTRODUCCIÓN

La evaluación de la adiposidad corporal ha cobrado una relevancia creciente en múltiples ámbitos en los últimos años, abarcando el ámbito de la salud, el rendimiento deportivo, la estética o la vida cotidiana. No en vano, la acumulación excesiva de adiposidad da lugar a enfermedades crónicas como el sobrepeso y la obesidad, que son considerados en la actualidad problemas de salud pública a nivel global, afectando a más del 43% de los adultos según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1). Pero la adiposidad también está relacionada con otro tipo de enfermedades crónicas como la diabetes tipo 2, las enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (2,3). Sin embargo, más allá de las cifras que vinculan el exceso de grasa corporal con el desarrollo de enfermedades crónicas, la adiposidad tiene implicaciones directas sobre la funcionalidad, la movilidad y la calidad de vida en general (4).

En el ámbito deportivo, la cantidad de grasa corporal es un factor determinante en el rendimiento, especialmente en disciplinas donde el peso, y específicamente la grasa corporal, actúa como un "lastre" que el deportista debe mover, como los saltos o en los deportes cíclicos como las carreras de larga distancia o ciclismo; o en deportes estéticos, como la gimnasia (5). Así, el exceso de grasa puede disminuir la capacidad del deportista de mantener un esfuerzo prolongado en el tiempo o realizar acciones explosivas, ya que cada kilogramo adicional de grasa aumenta la demanda energética y reduce la eficiencia del movimiento (6). Como consecuencia de lo anterior, los deportistas de resistencia buscan minimizar la adiposidad para optimizar su rendimiento (7). En los deportes de combate, donde el peso corporal define categorías competitivas, una estimación errónea de la grasa puede comprometer tanto la preparación física como la estrategia del atleta para mantenerse en una categoría adecuada (8). En estos casos, la capacidad para medir con precisión la composición corporal es crucial para monitorear cambios sutiles en la grasa que pueden tener una gran influencia sobre el rendimiento deportivo (9).

El impacto de la adiposidad va más allá del deporte y su relación con la aparición de diferentes patologías, afectando también a la vida cotidiana (10,11). El exceso de grasa corporal puede reducir la funcionalidad para realizar tareas básicas

como caminar largas distancias, subir escaleras, o incluso estar de pie (12). En una persona con sobrepeso y obesidad, la energía necesaria para actividades tan rutinarias como correr para coger un autobús o cargar bolsas de compras puede verse comprometida, lo que repercute directamente en su calidad de vida (13). En este sentido, el balance entre grasa y masa muscular cobra vital importancia ya que, mientras que la masa muscular proporciona fuerza y movilidad, la grasa actúa como un lastre que, si es excesivo, limita la capacidad funcional de la persona (14).

La estética, por su parte, es otro de los grandes motivos por los cuales en la población en general se busca valorar la grasa corporal. Estudios previos muestran que una gran parte de las personas que inician programas de ejercicio o dietas lo hacen con el objetivo principal de perder grasa (15). En el contexto de una sociedad cada vez más preocupada por la imagen corporal, las herramientas que permitan cuantificar con precisión los cambios en la grasa corporal se han vuelto esenciales para guiar estos objetivos estéticos específicos (16). Los nutricionistas, los graduados en Ciencias del Deporte y otros profesionales del ámbito de la salud necesitan indicadores fiables para detectar progresos y ajustar estrategias (17). Sin una medición adecuada, los resultados reportados al sujeto podrían no ser exactos, lo que a menudo conduce a la frustración y al abandono de los planes de mejora estética (18).

Dada la importancia de medir la adiposidad de forma precisa, existen múltiples métodos en la actualidad, cada uno con sus fortalezas y debilidades (19). La antropometría, por ejemplo, es ampliamente utilizada debido a su accesibilidad y bajo costo (20). Las mediciones de pliegues cutáneos han sido empleadas por décadas para estimar el porcentaje de grasa corporal (21–23). Sin embargo, su precisión depende en gran medida de la habilidad del evaluador y de la fórmula utilizada (24). Además, estas mediciones asumen que la compresibilidad de la piel y la grasa subcutánea es constante entre individuos y en distintas regiones dentro de un mismo individuo (25), a pesar de que estudios previos realizados en cadáveres han demostrado que la compresibilidad varía según la región del cuerpo (26,27). Esta variabilidad introduce errores importantes en la estimación de la grasa corporal total cuando se limita la toma de pliegues a una región concreta (28).

Otro método comúnmente empleado es la BIA, que mide la resistencia del cuerpo al paso de una corriente eléctrica (29). Aunque es una técnica no invasiva y

relativamente rápida, su precisión puede verse afectada por factores como el estado de hidratación del sujeto, la temperatura ambiente y el tipo de dispositivo utilizado (30). La BIA tiende a subestimar la grasa corporal en sujetos con niveles elevados de adiposidad y a sobreestimarla en personas con poca grasa (31). Esto limita su aplicabilidad en individuos cuyo control preciso de la grasa es clave, como deportistas o aquellos con condiciones médicas que alteran la distribución de la grasa corporal (32). Sin embargo, presenta como ventaja la presentación de datos segmentales, es decir, diferenciando entre grasa en las extremidades superiores, inferiores y el tronco, lo cual es particularmente útil en el contexto deportivo y clínico (33).

Por su parte, el DXA es considerada el "método de referencia" para medir la composición corporal debido a su alta precisión (34). El DXA mide la composición corporal a través de la absorción diferencial de rayos X. Utiliza dos haces de rayos X de diferentes energías que interactúan con el cuerpo, midiendo cómo se atenúan al atravesarlo (35). La técnica se considera precisa y reproducible, aunque implica una pequeña dosis de radiación ionizante, lo que exige precauciones y protocolos de seguridad (36). El DXA ofrece también la ventaja de proporcionar estimaciones segmentales de la grasa corporal (33). No obstante, su elevado costo, la exposición a radiación y la disponibilidad limitada de este tipo de equipos lo convierten en una herramienta menos accesible para la mayoría de los profesionales y pacientes (37). Además, el DXA, al igual que otros métodos, también enfrenta desafíos relacionados con la precisión en ciertos tipos de poblaciones, como personas con gran altura o masa corporal (38).

A lo anterior se añade que, los pocos estudios previos que han analizado la comparabilidad entre los resultados reportados para la grasa corporal total y segmental entre los diferentes métodos o entre diferentes ecuaciones dentro del mismo método han reportado resultados significativamente diferentes, lo que podría deberse a que no se han estandarizado condiciones importantes de la medición como el estado de hidratación, no se ha medido una muestra suficientemente grande o no se ha respetado el protocolo antropométrico globalmente difundido como el protocolo ISAK en el caso de las mediciones (39). Estas limitaciones de base hacen necesario ampliar este campo de estudio.

Dado este panorama, la investigación comparativa de métodos y el desarrollo de modelos antropométricos de predicción más precisos son esenciales (40). Por lo

anterior, la presente tesis doctoral busca comparar los resultados reportados en la estimación de masa grasa total y segmental entre diferentes métodos y ecuaciones de valoración de la composición corporal, y también desarrollar modelos de regresión que permitan estimar la grasa segmental a partir de mediciones antropométricas (41). De esta forma, se busca ofrecer a los profesionales de la salud información sobre herramientas accesibles y precisas para evaluar la grasa corporal (42).

II – JUSTIFICACIÓN

II - JUSTIFICACIÓN

2.1. PRIMERAS INVESTIGACIONES Y DEFINICIONES DE ADIPOSIDAD

2.1.1. Primeras investigaciones y percepciones antiguas de adiposidad

Desde la antigüedad, la percepción de la grasa corporal ha estado ligada a diferentes valores culturales y contextos históricos. En civilizaciones como la egipcia y la mesopotámica, el exceso de grasa era visto como un símbolo de estatus y riqueza. Esto se reflejaba en las representaciones artísticas de figuras voluptuosas, lo que indicaba acceso a abundantes recursos alimenticios. En cambio, en otras culturas como la griega, se observaba una concepción diferente: mientras que la prosperidad podía ser vista como algo deseable, el exceso de grasa también se asociaba a la falta de control y autocuidado (Sanders, 2002).

Ya en el siglo V a.C., Hipócrates documentó observaciones sobre la obesidad en sus escritos médicos. Él consideraba la obesidad no solo como un problema estético, sino también como una condición que afectaba la salud y el bienestar general. Hipócrates advertía que la obesidad excesiva podía dificultar la respiración y reducir la esperanza de vida. Sus escritos establecieron una de las primeras conexiones entre la obesidad y la predisposición a enfermedades (Kondrashova et al., 2021). El corpus hipocrático también distingue entre distintos tipos de cuerpos y su relación con la salud, lo que puede considerarse como uno de los primeros intentos de categorización de la composición corporal.

Durante la época romana, Galeno, uno de los médicos más influyentes de su tiempo, retomó las ideas hipocráticas y expandió el conocimiento sobre los efectos de la obesidad en la salud. Galeno observó que los individuos con una mayor cantidad de grasa corporal eran más susceptibles a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y también defendió la necesidad de la moderación alimenticia y el ejercicio físico para controlar el peso corporal (Sanders, 2002). Esta perspectiva marcó un hito en la medicina antigua, vinculando explícitamente la salud y la adiposidad. Sin embargo, en la Edad Media, estas ideas fueron parcialmente desplazadas por interpretaciones religiosas, donde la glotonería era vista como un

pecado y la delgadez se asociaba con pureza y devoción (Smith, 2015). Por ejemplo, la obra "Canon de Medicina" de Avicena en el siglo XI incluye referencias sobre la importancia del equilibrio entre ingesta y gasto energético para evitar un exceso de grasa corporal. Aunque su enfoque era más filosófico que científico, Avicena sentó las bases para futuras investigaciones en composición corporal.

2.1.2. Introducción del concepto de tejido adiposo en la anatomía y fisiología

A partir del Renacimiento, los avances en anatomía y fisiología permitieron un análisis más detallado del tejido adiposo. Con el desarrollo de técnicas de disección por parte de científicos como Andreas Vesalio en el siglo XVI, el tejido adiposo comenzó a estudiarse como un componente estructural del cuerpo humano con funciones específicas. Vesalio y otros anatomistas observaron que la grasa no solo se distribuía de manera subcutánea, sino que también se encontraba alrededor de órganos internos, lo cual sugería un rol protector y estructural (Cortez et al., 2018).

El desarrollo del microscopio en el siglo XVII permitió a científicos como Antonie van Leeuwenhoek observar células individuales en el tejido adiposo. Esta tecnología posibilitó identificar que el tejido adiposo estaba compuesto de células especializadas en el almacenamiento de lípidos, lo que reveló la naturaleza multifuncional de este tejido. No solo se trataba de un simple depósito de energía, sino también de una estructura celular activa. Durante el siglo XIX, con los avances de la química y la fisiología, se identificó que el tejido adiposo jugaba un rol crucial en el metabolismo lipídico y energético, consolidando la idea de la adiposidad como un factor determinante en la salud general del individuo (Johnson et al., 2019). En esta misma época, Jean-Baptiste Dumas, un químico francés, contribuyó a la comprensión del metabolismo de las grasas y a la definición del tejido adiposo como un tipo de tejido especializado. Dumas describió las reacciones bioquímicas que permitían a las células adiposas almacenar lípidos, y su trabajo influyó en la definición moderna de tejido adiposo como un órgano metabólicamente activo (Johnson et al., 2019).

En el siglo XX, el tejido adiposo comenzó a ser estudiado también por sus propiedades endocrinas. En la década de 1950, investigaciones revelaron que el

tejido adiposo no solo almacenaba energía, sino que también producía hormonas y factores de señalización, como la leptina, que regulan el apetito y el metabolismo energético (Friedman y Halaas, 1998). Estos descubrimientos revolucionaron la visión del tejido adiposo, estableciéndolo como un órgano endocrino clave en la homeostasis energética y marcando un cambio de paradigma en el estudio de la adiposidad. El descubrimiento de la leptina en 1994 por Jeffrey Friedman demostró que el tejido adiposo produce esta hormona, la cual actúa sobre el hipotálamo para regular el apetito y el balance energético. Este hallazgo impulsó investigaciones sobre la obesidad y las disfunciones metabólicas, ya que se observó que alteraciones en los niveles de leptina estaban relacionadas con problemas de peso y enfermedades metabólicas (Friedman y Halaas, 1998).

Estos hitos históricos en la comprensión del tejido adiposo y su relación con la salud representan una evolución desde una visión estética y de estatus hasta un análisis científico y funcional, consolidando el rol de la adiposidad en la fisiología humana.

2.2. RELEVANCIA DE LA VALORACIÓN DE LA GRASA CORPORAL

2.2.1. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito de la salud

La medición de la grasa corporal ha cobrado un interés significativo en las últimas décadas debido a su relevancia en el ámbito de la salud pública y la prevención de enfermedades (43,44). El exceso de grasa corporal, especialmente la grasa visceral, está fuertemente vinculado con una serie de patologías crónicas como la obesidad, diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares (45,46). En esta línea, el aumento de la prevalencia mundial de la obesidad ha puesto de relieve la importancia de contar con métodos precisos para medir la grasa corporal y, en particular, diferenciar entre regiones. Esto es crucial, ya que no solo el exceso de grasa, sino también su distribución, tiene implicaciones en la salud (47,48).

La grasa visceral se diferencia de la grasa subcutánea en su proximidad a los órganos vitales, lo que la convierte en un marcador importante del riesgo de morbilidad metabólica (11). Los individuos con mayores depósitos de grasa visceral tienen un riesgo significativamente elevado de desarrollar resistencia a la

insulina y disfunción endotelial, factores clave en el desarrollo de enfermedades metabólicas (49). Además, un metaanálisis demostró que la distribución central de la grasa, medida como circunferencia de cintura o relación cintura-cadera, está más fuertemente asociada con eventos cardiovasculares adversos que la obesidad global evaluada por el índice de masa corporal (IMC) (43).

El análisis de la masa grasa en los miembros superiores e inferiores también cobra especial relevancia en el ámbito de la salud debido a su estrecha relación con el riesgo metabólico y cardiovascular (49). Estudios previos a través métodos como la BIA y el DXA han demostrado que la distribución de grasa corporal no es homogénea, y su localización segmental puede influir de manera diferencial en el desarrollo de patologías metabólicas (50,51). Mientras que la acumulación de grasa en los miembros superiores suele estar asociada con un mayor riesgo de resistencia a la insulina, diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares, la grasa localizada en los miembros inferiores, como en la región glúteo-femoral, podría actuar como un factor protector (52). Por lo tanto, cuantificar la grasa segmental permite una evaluación más precisa del riesgo cardiometabólico y facilita la implementación de estrategias de prevención más focalizadas y eficaces (53).

Además, en el contexto de las amputaciones, la evaluación de la grasa segmental adquiere una dimensión crítica para la planificación de la rehabilitación (54). La pérdida de una extremidad puede inducir una redistribución compensatoria de la masa grasa y tejido muscular en las extremidades restantes, afectando la funcionalidad y el equilibrio corporal (54). Cuantificar estos cambios permite personalizar los programas de rehabilitación y prevenir complicaciones derivadas del aumento de la carga en los miembros no afectados. Este enfoque contribuye a una recuperación más eficiente, evitando problemas secundarios como la sobrecarga articular (55).

Finalmente, en patologías que afectan la movilidad, como la sarcopenia u obesidad, la masa grasa segmental tiene un impacto directo en la funcionalidad y el rendimiento físico (12). Un exceso de grasa en los miembros inferiores puede comprometer la estabilidad y la capacidad de desplazamiento, mientras que la grasa excesiva en los miembros superiores puede limitar la destreza y generar restricciones funcionales. Evaluar la grasa segmental permite individualizar las intervenciones terapéuticas, optimizando la movilidad y la calidad de vida de los pacientes. Así, la cuantificación segmental de la grasa no solo resulta relevante en

el ámbito clínico, sino que también abre la puerta a intervenciones más precisas en el ámbito de la rehabilitación y la mejora del rendimiento funcional.

La acumulación de grasa corporal no solo afecta el sistema cardiovascular y metabólico, sino que también tiene un impacto significativo en la inflamación crónica de bajo grado, otro factor de riesgo para múltiples enfermedades crónicas (56). El tejido adiposo, particularmente el visceral, es metabólicamente activo y secreta una variedad de adipocinas y citocinas inflamatorias, como el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α) y la interleucina-6 (IL-6), que contribuyen a la inflamación sistémica (57). Este proceso inflamatorio crónico está asociado con un mayor riesgo de desarrollar resistencia a la insulina y dislipidemias, así como con un empeoramiento de las enfermedades cardiovasculares (57).

Además, la grasa corporal juega un papel crucial en el balance energético y la homeostasis metabólica (58). La capacidad de almacenar energía en forma de triglicéridos es una función clave del tejido adiposo, pero cuando esta capacidad es superada, se produce una acumulación de lípidos en otros tejidos como el hígado, el músculo esquelético y el páncreas, lo que contribuye a la lipotoxicidad y la disfunción metabólica (59). Este fenómeno se ha observado tanto en personas con obesidad como en individuos con un peso aparentemente normal, pero con exceso de grasa visceral, fenómeno conocido como persona metabólicamente obesa pero normopeso (60). La medición precisa de la grasa corporal, por tanto, puede ayudar a identificar a estos individuos que no son reconocidos por los métodos tradicionales de clasificación de la masa corporal.

El tejido adiposo también está implicado en la regulación del metabolismo lipídico, y su exceso está relacionado con alteraciones en el perfil lipídico plasmático, que incluyen un aumento de los triglicéridos y una disminución del colesterol de lipoproteínas de alta densidad (HDL) (61). Estos cambios son características del síndrome metabólico, un conjunto de factores de riesgo que aumentan la probabilidad de desarrollar enfermedades crónicas, incluyendo patologías cardíacas y accidentes cerebrovasculares (62). De esta forma, es importante realizar una detección temprana de los individuos que se encuentran en riesgo de desarrollar o ya han desarrollado el síndrome metabólico antes de que aparezcan otras morbilidades.

La importancia de la medición de la grasa corporal también se manifiesta en su relación con el cáncer (63). El exceso de grasa corporal, especialmente la grasa visceral, ha sido vinculado a un mayor riesgo de desarrollar varios tipos de cáncer, incluidos los de colon, mama y próstata (63). Estudios previos han demostrado que los niveles elevados de grasa corporal incrementan el riesgo de cáncer, probablemente debido a la producción excesiva de hormonas, como el estrógeno, y el estado inflamatorio crónico característico de las personas con sobrepeso y obesidad (64).

Finalmente, la medición precisa de la grasa corporal no solo permite una mejor evaluación del riesgo de enfermedades, sino que también proporciona una base para las intervenciones clínicas, tales como programas de pérdida de peso, y para evaluar la efectividad de dichas intervenciones. La evidencia muestra que las personas con un seguimiento riguroso de la composición corporal durante los programas de pérdida de peso experimentan mejores resultados en términos de reducción de grasa visceral y mejoras en los marcadores de riesgo cardiometabólico que aquellos pacientes que no cuenta con este seguimiento.

2.2.2. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito de la estética

La medición de la grasa corporal tiene también una importancia central en el ámbito estético debido a la fuerte asociación entre la adiposidad y la percepción de la imagen corporal, especialmente en contextos donde la apariencia física es un objetivo primordial (65). En la sociedad actual, los estándares estéticos impuestos por los medios de comunicación y las redes sociales han fomentado la búsqueda de cuerpos esbeltos, definidos y musculosos. Es clara la relación entre la percepción corporal y la grasa corporal, con un impacto significativo de este parámetro sobre la autoestima y el bienestar psicológico de los individuos, independientemente del sexo (65).

Como consecuencia de lo anterior, la reducción de grasa corporal se ha convertido en un objetivo estético común, particularmente en sectores como el modelaje, la actuación y la industria de la moda, donde se premia la apariencia de cuerpos delgados y tonificados (66). Las mediciones precisas de la grasa corporal permiten a las personas monitorear sus progresos y ajustar sus dietas y rutinas de

ejercicio para alcanzar las metas. Así, el DXA, la BIA y los pliegues cutáneos se han convertido en herramientas esenciales para estas evaluaciones, ya que permiten diferenciar entre la pérdida de masa grasa y la pérdida de masa muscular, algo que no es posible con métodos como el IMC.

2.2.3. Relevancia de la valoración de la grasa corporal en el ámbito del rendimiento deportivo

En el ámbito del rendimiento deportivo, la medición precisa de la grasa corporal es crucial para optimizar el desempeño físico (67,68). La adiposidad, especialmente en exceso, actúa como un lastre que puede limitar la eficiencia en diversas actividades deportivas (69). Los deportistas con altos niveles de grasa corporal, en comparación con aquellos que mantienen un porcentaje más bajo, suelen experimentar una mayor resistencia durante los movimientos, lo que disminuye su capacidad para generar velocidad y potencia (70).

La reducción de la masa grasa en deportistas de deportes de resistencia puede mejorar el rendimiento aeróbico al disminuir la carga energética necesaria para desplazarse, lo que resulta en un uso más eficiente de los sustratos energéticos. En este sentido, el efecto de la grasa corporal como lastre es particularmente evidente en deportes donde el peso corporal debe ser transportado durante largos periodos de tiempo, como en el atletismo de fondo o el ciclismo (7). En estos deportes, un exceso de grasa no funcional puede resultar en una disminución de la velocidad, la agilidad y la capacidad de recuperación, afectando negativamente la eficiencia biomecánica. Los deportistas con mayor porcentaje de grasa corporal mostraron una mayor demanda energética durante pruebas de resistencia, lo que compromete su capacidad para mantener el rendimiento a lo largo del tiempo.

Asimismo, la grasa corporal excesiva puede tener un impacto negativo en el rendimiento de deportes que requieren fuerza relativa, es decir, la cantidad de fuerza que un atleta puede generar en relación a su peso corporal (9). En disciplinas como la gimnasia, la escalada o los saltos, donde los atletas deben mover su propio cuerpo de manera explosiva o mantenerlo suspendido, un mayor peso graso puede comprometer significativamente el rendimiento competitivo (71). La medición precisa de la grasa corporal, por lo tanto, se vuelve esencial para optimizar la

composición corporal de los atletas, permitiéndoles reducir la masa grasa, lo que se traduce en una mayor fuerza relativa y un mejor rendimiento general.

Además, en deportes de velocidad como el sprint, el exceso de grasa corporal puede actuar como una resistencia adicional que debe ser superada durante el movimiento (69). Esta resistencia no solo reduce la aceleración y velocidad máxima que un atleta puede alcanzar, sino que también aumenta el gasto energético requerido para mantener estas velocidades (72). De esta forma, los sprinters con menores porcentajes de grasa corporal obtienen tiempos significativamente más rápidos en pruebas de velocidad en comparación con aquellos con niveles más altos de adiposidad (72).

La medición precisa de la grasa corporal también es fundamental en deportes donde el peso corporal está directamente relacionado con el rendimiento debido a la categorización por peso, como en el boxeo, la lucha, el levantamiento de pesas o los deportes de combate (73). En estas disciplinas, los atletas buscan maximizar la masa muscular y reducir la grasa corporal para competir en categorías de peso inferiores, sin comprometer su fuerza o potencia (73). Sin embargo, una mala planificación en la reducción de la grasa corporal puede llevar a una pérdida de masa libre de grasa y afectar negativamente el rendimiento. Por ello, los métodos de evaluación de la composición corporal se utilizan para monitorear los cambios en este ámbito de manera precisa y evitar una pérdida no deseada de masa libre de grasa.

Este mismo fenómeno sucede en los deportes estéticos, como el culturismo, donde el objetivo no es solo la hipertrofia muscular, sino también la reducción al mínimo de la grasa corporal para resaltar la definición muscular (74). La importancia de esto radica en que el aspecto estético de los culturistas es el principal criterio de evaluación en las competiciones, lo que hace que cada pequeño cambio en la cantidad de grasa corporal sea significativo en su rendimiento. Un menor porcentaje de grasa puede contribuir a una mejor definición muscular y vascularización, aspectos que son altamente valorados por los jueces (74). Así, en estos contextos, la medición de la grasa resulta de gran relevancia. No en vano, los culturistas suelen competir con niveles extremadamente bajos de grasa corporal, a menudo entre el 4% y el 5% en hombres y entre el 10% y 12% en mujeres, lo cual es crucial para el éxito en competiciones donde la apariencia física es evaluada en detalle (75). Los culturistas utilizan diferentes métodos de evaluación de la

composición corporal para medir progresos en su grasa corporal con precisión y planificar su régimen de entrenamiento y nutrición durante las fases de definición. Además, la precisión de las mediciones es crucial no solo para el seguimiento del progreso, sino también para la planificación de las fases de corte (cutting) y aumento de masa (bulking) que caracterizan el ciclo anual de los culturistas (76). Durante las fases de "cutting", el objetivo es reducir la grasa corporal mientras se mantiene la masa muscular, lo cual es un desafío metabólico que requiere un control riguroso del balance energético y de la valoración de la composición corporal. En otros deportes estéticos como la gimnasia rítmica, la danza o la natación sincronizada también se ha encontrado valores muy bajos de adiposidad, que facilitan la coordinación, el equilibrio y los movimientos a nivel biomecánico que involucra la disciplina (71).

Además, en deportes colectivos con esfuerzos rápidos y discontinuos, como el fútbol, un exceso de grasa corporal puede limitar la capacidad de los deportistas para realizar movimientos repetitivos de alta intensidad, como sprints o saltos, lo que impacta negativamente en su rendimiento general (77,78). Este aspecto es especialmente importante en estos deportes por los deportistas deben equilibrar la resistencia con la capacidad para realizar esfuerzos explosivos.

En conclusión, la grasa corporal no solo influye en el rendimiento aeróbico y anaeróbico, sino que también actúa como un factor limitante en la eficiencia biomecánica y el uso energético durante el ejercicio. La medición precisa de la grasa corporal permite a los deportistas y cuerpo técnico optimizar la composición corporal, reduciendo el peso no funcional y maximizando la masa muscular, lo que se traduce en un mejor desempeño en una amplia variedad de disciplinas deportivas.

2.3. APROXIMACIÓN CONCEPTUAL

Dado que la medición de la grasa corporal es esencial en diversos ámbitos, como la salud, la estética y el rendimiento deportivo, es fundamental comprender con precisión los diferentes términos y conceptos asociados a la composición corporal (79). A menudo, términos como masa grasa, masa lipídica y tejido adiposo se utilizan de manera indistinta, lo cual puede generar confusión tanto en la

interpretación de los resultados como en su aplicación (80,81). Sin embargo, es crucial destacar las diferencias entre estos conceptos para garantizar una evaluación más rigurosa y detallada.

El tejido adiposo hace referencia al conjunto total de las células adiposas, que incluyen no solo grasa, sino también otros componentes importantes como agua y minerales (82). Aproximadamente un 10% de la masa de las células adiposas está formada por agua, proteínas y minerales, lo que significa que el término "tejido adiposo" engloba más componentes que solo los lípidos (82). De este modo, no puede ser utilizado como sinónimo de masa grasa.

La masa grasa se refiere principalmente a los triglicéridos almacenados en el cuerpo, que constituyen alrededor del 90% del contenido total de la célula adiposa (82). A su vez, los triglicéridos están formados por lípidos (83%) y glicerol (16%), lo que subraya que, incluso al hablar de masa grasa, este término no se está refiriendo exclusivamente a lípidos (24,82).

La masa lipídica, como subcomponente de la masa grasa, hace referencia únicamente a los lípidos presentes en los adipocitos (82). Este componente representa alrededor del 75% de la masa adiposa (27). Por lo tanto, cuando se mide la masa lipídica, se está evaluando únicamente la fracción de lípidos, excluyendo otros elementos presentes en el tejido adiposo como el glicerol, el agua y los minerales.

A nivel conceptual, es crucial distinguir estos conceptos, ya que la masa lipídica solo engloba los lípidos presentes en los adipocitos, mientras que el tejido adiposo incluye tanto la grasa como las estructuras que lo componen, lo que lo convierte en un tejido multifuncional con implicaciones metabólicas y endocrinas. Entender esta diferenciación conduce a un análisis más profundo de cómo se organiza la composición corporal desde distintas perspectivas y niveles de complejidad.

2.4. MODELO DE CINCO NIVELES DE WANG PARA EL ABORDAJE DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL

El modelo de los cinco niveles propuesto por Wang cobra relevancia, proporcionando una visión estructurada para abordar la composición corporal, desde la organización atómica hasta el análisis del cuerpo entero (40).

Desde la perspectiva del nivel atómico, se entiende que el cuerpo humano está compuesto por átomos y elementos, como el oxígeno, carbono, hidrógeno y nitrógeno, que constituyen más del 98% del peso corporal (40). Estos elementos son la base de todo lo que compone el cuerpo, incluidos los lípidos que forman parte de los triglicéridos almacenados en el tejido adiposo (40).

A medida que se asciende al nivel molecular, se encuentra que estos átomos se organizan en moléculas, como el agua, los lípidos, las proteínas, los minerales y el glucógeno (40). En este nivel, conceptos como la masa grasa cobran relevancia, ya que los triglicéridos (compuestos de lípidos y glicerol) son el principal componente molecular que forma parte de la grasa corporal (40). Realizan una aproximación desde la perspectiva molecular a la composición corporal tecnologías como el DXA y la BIA (83). El DXA cuantifica la masa grasa diferenciando entre los componentes moleculares del cuerpo, separando lípidos, masa magra y contenido mineral óseo mediante la absorción de los rayos X (83). La BIA, por otro lado, mide la composición molecular del cuerpo a través de la resistencia y reactancia, estimando componentes como agua corporal y masa lipídica al interpretar la conductividad de los tejidos (84). La antropometría, por su parte, llega a estimaciones a nivel molecular, a excepción del modelo de Kerr (24). A nivel molecular, la antropometría utiliza el análisis de la densidad corporal, que se calcula mediante la medición de pliegues cutáneos, y se aplica a ecuaciones como las de Siri o Brozek (20,85). Estas ecuaciones presumen que la densidad de la masa magra es de aproximadamente 1.100 g/cm^3 , mientras que la densidad de la grasa corporal se estima en 0.900 g/cm^3 (85). Al obtener la densidad corporal global, se pueden extrapolar los porcentajes de grasa y masa magra del cuerpo. A través de este enfoque basado en presunciones de densidad, la antropometría ofrece una estimación de la composición corporal a nivel molecular. Sin embargo, es importante considerar que las bases que involucra este proceso han sido cuestionadas por diferentes autores (26,28).

El nivel celular es donde los componentes moleculares se agrupan para formar células (40). En el contexto de la grasa corporal, permite la cuantificación de la masa de los adipocitos, la célula que almacena lípidos en forma de triglicéridos (82). Las células adiposas contienen tanto lípidos como agua y proteínas, y es en este nivel donde se producen funciones clave como la regulación del

almacenamiento y movilización de energía. Así, es importante destacar que el nivel celular no da lugar a la masa adiposa como un todo, sino que se centra en el análisis de las células individuales, como los adipocitos en este caso.

Así, se ha de progresar al nivel tisular, donde las células se organizan en tejidos, como el tejido adiposo (40). Aquí es donde el concepto de masa adiposa adquiere su definición, ya que se refiere al conjunto de adipocitos y otros componentes no grasos, como fibras de colágeno y elastina, que forman el tejido adiposo. El tejido adiposo no solo almacena grasa, sino que también tiene funciones endocrinas importantes (86). Este nivel es con el que la estrategia antropométrica de Kerr aborda la composición corporal, proporcionando un análisis del tejido adiposo a nivel tisular (87). Este modelo se basa en la medición de pliegues cutáneos para estimar el tejido adiposo subcutáneo y extrapolarlo al contenido total de tejido adiposo en el cuerpo. El modelo de Kerr tiene la ventaja de ofrecer una visión más específica del tejido adiposo subcutáneo y evitando las presunciones de densidad corporal de naturaleza cuestionable (26). Al considerar el tejido adiposo como una entidad anatómica, la antropometría mediante Kerr proporciona una aproximación directa al tejido, lo que resulta esencial en el análisis de la adiposidad corporal en relación con la salud, el rendimiento y el riesgo de enfermedades (87,88). También otros métodos de evaluación por imagen, como la resonancia magnética, la ecografía o la tomografía computarizada utilizan este enfoque tisular (89). Este abordaje es especialmente relevante cuando se pretende analizar la distribución y función de la grasa en diferentes zonas corporales, algo crucial en ámbitos como la salud, la estética y el rendimiento (90–92).

Finalmente, en el nivel del cuerpo entero, se integran todos los componentes descritos en los niveles anteriores para analizar el cuerpo humano en su totalidad por segmentos (40). Sin embargo, este modelo presenta dificultades pues no es capaz de diferenciar los componentes a nivel molecular o tisular, por lo que se pierden parte de las ventajas que ofrece la composición corporal en su aplicación a los ámbitos de la salud, la estética y el rendimiento.

La aproximación de estos métodos a los diferentes niveles refuerza la necesidad de entender la composición corporal no solo como un conjunto de mediciones aisladas, sino como un sistema organizado en el que los resultados obtenidos varían según el modelo que utilice el sistema elegido para la valoración de la composición corporal.

2.5. MÉTODOS DE VALORACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL

En el análisis de la composición corporal, existen múltiples técnicas disponibles, cada una con sus ventajas y limitaciones (89). Sin embargo, las metodologías más ampliamente utilizadas en la investigación y la práctica deportiva y clínica son: el DXA, la BIA y la antropometría. Estas técnicas se destacan por su accesibilidad, validez comprobada en diversos contextos, y su capacidad para proporcionar mediciones segmentales de la composición corporal, lo que las convierte en herramientas clave tanto para el análisis molecular como tisular del cuerpo humano. Su uso extenso en estudios poblacionales, deportivos y clínicos las posiciona como las principales opciones en la evaluación de la adiposidad.

2.5.1. DXA para la estimación de la adiposidad

El DXA es considerada clásicamente como el método de referencia en la evaluación de la composición corporal. Funciona mediante la emisión de dos haces de rayos X con diferentes energías que atraviesan el cuerpo, midiendo la cantidad de rayos que se absorben en diferentes tejidos como hueso, masa magra y lipídica. Su precisión es destacable, proporcionando no solo la cantidad total de masa grasa, sino también su distribución segmental, lo que la convierte en una herramienta clave en estudios de composición corporal y salud y composición corporal y deporte. Además, la DXA puede medir la grasa visceral, un indicador clave de riesgo metabólico, lo que la distingue de otros métodos. A pesar de sus ventajas, tiene limitaciones, como el costo elevado, la exposición a una dosis mínima de radiación y la necesidad de personal altamente capacitado para su uso. Estos factores restringen su accesibilidad en entornos con menos recursos y en poblaciones vulnerables, como infantes o mujeres embarazadas.

2.5.2. BIA para la estimación de la adiposidad

La BIA se basa en el paso de una corriente eléctrica de baja intensidad a través del cuerpo, lo que permite medir la resistencia y reactancia de los tejidos. El tejido magro, rico en agua y electrolitos, conduce mejor la corriente, mientras que el tejido

adiposo genera más resistencia. Así, se estima la composición corporal, diferenciando entre masa magra y masa grasa. Este método es rápido, no invasivo y accesible, lo que lo convierte en una opción popular para la evaluación de la composición corporal en poblaciones grandes o con recursos limitados. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, siendo el estado de hidratación del individuo un factor determinante en la precisión de los resultados. Más concretamente, el estado de hidratación es un factor crítico que influye significativamente en los resultados de la BIA, dado que los líquidos corporales afectan la resistencia eléctrica del cuerpo. Cuando una persona está deshidratada, la resistencia aumenta, lo que puede llevar a una sobreestimación de la grasa corporal, mientras que una sobrehidratación podría reducir las estimaciones de grasa al disminuir la resistencia (1). Para controlar este factor en estudios, es crucial estandarizar el estado de hidratación de los sujetos, asegurándose de que estén en un estado de euhidratación antes de la medición, y preferiblemente en ayunas. Además, es necesario ajustar los resultados basándose en la variabilidad del estado hídrico, sobre todo en deportistas que pueden experimentar fluctuaciones rápidas en su balance de agua debido a entrenamientos o competiciones intensas (2); o personas con enfermedades crónicas.

2.5.3. Antropometría para la estimación de la adiposidad

La antropometría, ampliamente utilizada para la evaluación de la composición corporal, cuenta con una gran variedad de fórmulas diseñadas para estimar la grasa corporal y el tejido adiposo a partir de mediciones básicas. Estas fórmulas varían considerablemente en su diseño y aplicación, adaptándose a las características de distintas poblaciones y necesidades específicas, desde contextos deportivos hasta clínicos y estudios epidemiológicos. La cantidad de fórmulas disponibles refleja el esfuerzo científico por capturar la complejidad de la composición corporal y responder a las limitaciones inherentes a cada método. Algunas fórmulas están específicamente diseñadas para atletas y se centran en pliegues cutáneos de áreas corporales relacionadas con el rendimiento deportivo, mientras que otras, como las utilizadas en poblaciones con mayor adiposidad, integran perímetros y otros indicadores corporales para reflejar mejor la variabilidad individual. Esta diversidad metodológica en la antropometría permite una evaluación versátil y accesible en diferentes escenarios, aunque la precisión y

comparabilidad de las estimaciones dependen del contexto de aplicación y de la adherencia a protocolos estandarizados.

Aunque cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y limitaciones, su elección depende del contexto y del propósito de la evaluación. La DXA es ideal cuando se busca una evaluación detallada y precisa de la composición corporal, aunque su costo y necesidad de personal especializado la limitan a ciertos contextos clínicos o de investigación. Por otro lado, la BIA puede ser útil para un seguimiento rápido y accesible de la composición corporal, pero la precisión de sus resultados puede verse afectada en situaciones donde no se controlan factores como la hidratación. La antropometría, pese a sus limitaciones, sigue siendo una herramienta valiosa, especialmente en estudios poblacionales, cuando se quiere valorar a un individuo y no se tiene un control adecuado de las variables contaminantes, y en entornos donde no se dispone de tecnología avanzada. En conjunto, estas herramientas ofrecen una gama de opciones que pueden adaptarse a las necesidades y limitaciones de cada escenario.

2.6. COMPARABILIDAD ENTRE LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL

En cuanto a la comparación entre métodos como la BIA, DXA y la antropometría, hay pocos estudios que hayan abordado esta temática. Más concretamente, investigaciones previas han comparado los resultados de la masa grasa obtenidos mediante DXA, BIA y antropometría; DXA y BIA; BIA y antropometría han reportado diferencias en los resultados, lo que hace que estos no sean directamente comparables.

Sin embargo, en la mayoría de estos estudios se han comparado los resultados reportados por los diferentes métodos, sin tener en consideración la necesidad de ajustar los resultados de los distintos métodos a un mismo modelo de abordaje de la composición corporal para poder compararlos de manera adecuada. Más concretamente, en una investigación realizada con 32 jóvenes (19 hombres y 13 mujeres) se compararon los resultados obtenidos por DXA, pletismografía por desplazamiento de aire, pesaje hidrostático (UWW) y BIA. Tras ajustar todos los

resultados para que fueran comparables, se observó que las diferencias entre los métodos desaparecieron en su mayoría una vez que se ajustaron al mismo modelo.

Las diferencias también ocurren dentro de un mismo método como la antropometría. La concordancia entre las distintas fórmulas antropométricas utilizadas para estimar el porcentaje de grasa corporal ha sido objeto de múltiples estudios, los cuales han demostrado que los resultados pueden variar significativamente en función de la fórmula empleada. Estudios previos indican que las fórmulas diseñadas para poblaciones específicas ofrecen una mayor precisión cuando se aplican en dichos grupos, mientras que las fórmulas más generales tienden a ser menos precisas al aplicarse en individuos que distan de las características de la población general en la cuál ha sido validada. En esta línea, en un estudio comparativo entre diferentes fórmulas, se encontró que algunas subestiman o sobreestiman la grasa corporal. En otro estudio, con 87 sujetos, se compararon diferentes fórmulas antropométricas para la estimación de la "masa grasa", ajustando el tejido adiposo a la masa grasa, y se encontró que incluso después del ajuste, existían diferencias significativas entre los resultados reportados por las diferentes fórmulas.

Por otro lado, las diferencias biológicas entre hombres y mujeres también afectan la precisión, comparabilidad y la interpretación de las mediciones de la composición corporal. En general, las mujeres tienden a tener una mayor proporción de grasa subcutánea, especialmente en áreas como las caderas y los muslos, debido a factores hormonales y reproductivos, mientras que los hombres presentan una mayor masa magra y tienden a almacenar más grasa visceral (3). Estas diferencias de distribución de grasa pueden afectar la comparabilidad de los resultados reportados por los diferentes métodos. Por ejemplo, los pliegues cutáneos o la BIA, que dependen de mediciones superficiales o subcutáneas, podrían ser menos precisos en la evaluación de la grasa visceral, que es más prevalente en los hombres. En cambio, las metodologías como la DXA, que permiten diferenciar entre grasa subcutánea y visceral, pueden proporcionar un análisis más detallado de la distribución corporal de la grasa.

Las diferencias sexuales también influyen en la variabilidad de los resultados obtenidos mediante BIA. Los estudios muestran que los hombres y mujeres tienen diferentes niveles de agua corporal debido a sus composiciones de masa magra y grasa. Como la BIA utiliza el agua corporal total para estimar la masa magra, los

hombres, que tienen un mayor porcentaje de agua corporal, pueden tener una estimación más precisa de la composición corporal en comparación con las mujeres (5). Estas diferencias deben tenerse en cuenta en estudios comparativos, y algunos algoritmos de BIA ya ajustan estos parámetros basados en el sexo para mejorar la precisión de los resultados. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de BIA que permiten una valoración del sujeto en bipedestación, los cuales son los más habituales, no reportan los valores de conductividad eléctrica, sino que reportan directamente el resultado final, no permitiendo realizar este ajuste en caso de ser necesario.

En resumen, tanto el estado de hidratación como el sexo influyen de manera considerable en los resultados de las evaluaciones de la composición corporal. Es fundamental ajustar los resultados y seleccionar las metodologías más adecuadas para minimizar el impacto de estos condicionantes. De esta forma, se garantiza una interpretación más precisa y significativa de los datos de composición corporal. A pesar de esto, hasta la fecha, no se ha realizado una investigación que aborde este problema incluyendo los tres métodos más populares utilizados actualmente para estimar la adiposidad: DXA, antropometría y BIA.

III – OBJETIVOS

III - OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la concordancia y las diferencias entre DXA, BIA y las fórmulas de antropometría en la estimación de la masa grasa corporal tanto general como segmental, explorando la validez de estas metodologías y su sensibilidad ante factores como el sexo, el estado de hidratación y el IMC, y desarrollando fórmulas antropométricas que permitan estimar la grasa segmental en comparación con DXA.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar las diferencias y el grado de concordancia entre las fórmulas más utilizadas para la estimación de la adiposidad general, en comparación con la fórmula de Kerr tras estimar el contenido lipídico.
2. Evaluar la similitud entre los resultados obtenidos por las diferentes fórmulas en relación con la fórmula de Kerr.
3. Establecer la relación existente entre las diferentes fórmulas de estimación de adiposidad general con las sumas de pliegues cutáneos y el IMC, según el sexo.
4. Determinar la concordancia entre DXA y tanto BIA como antropometría en la estimación de la masa grasa general.
5. Analizar si el sexo, IMC y el estado de hidratación influyen en la concordancia de DXA con BIA y antropometría para estimar la masa grasa general.
6. Validar la antropometría y la BIA frente a DXA para la estimación de masa grasa general.

7. Evaluar las diferentes fórmulas de antropometría y BIA disponibles para la estimación de masa grasa general y analizar si el sexo y la hidratación pueden afectar los resultados.
8. Analizar las diferencias entre DXA y BIA en la medición de grasa segmental.
9. Determinar la influencia del IMC, estado de hidratación y sexo en las diferencias entre los métodos DXA y BIA para estimar grasa segmental.
10. Desarrollar fórmulas antropométricas mediante regresión lineal para predecir los kg de grasa en cada segmento corporal (extremidades superiores derecha e izquierda, tronco y extremidades inferiores derecha e izquierda) en comparación con DXA.

3.3. GENERAL OBJECTIVES

To analyse the agreement and differences between DXA, BIA, and anthropometric formulas in the estimation of both general and segmental body fat mass, exploring the validity of these methodologies and their sensitivity to factors such as sex, hydration status, and BMI, and developing anthropometric formulas to estimate segmental fat in comparison with DXA.

3.4. SPECIFIC OBJECTIVES

1. To analyse the differences and degree of agreement between the most commonly used formulas for general adiposity estimation, in comparison with Kerr's formula after estimating lipid content.
2. To evaluate the similarity between the results obtained by different formulas in relation to Kerr's formula.
3. To establish the relationship between different general adiposity estimation formulas with skinfold sums and BMI, according to sex.
4. To determine the agreement between DXA, BIA, and anthropometry in estimating general fat mass.

5. To analyse whether sex, BMI, and hydration status influence the agreement of DXA with BIA and anthropometry in estimating general fat mass.
6. To validate anthropometry and BIA against DXA for the estimation of general fat mass.
7. To evaluate the different available anthropometry and BIA formulas for estimating general fat mass and to analyse whether sex and hydration can affect the results.
8. To analyse the differences between DXA and BIA in segmental fat measurement.
9. To determine the influence of BMI, hydration status, and sex on the differences between DXA and BIA methods for segmental fat estimation.
10. To develop anthropometric formulas using linear regression to predict the kilograms of fat in each body segment (right and left upper limbs, trunk, and right and left lower limbs) in comparison with DXA.

IV - HIPÓTESIS

IV -HIPÓTESIS

4.1 HIPÓTESIS GENERAL

Se espera que la concordancia entre DXA, BIA y las fórmulas de antropometría en la estimación de la masa grasa tanto general como segmental no sean consistentes en ningún caso, y que factores como el sexo, estado de hidratación y IMC influyan de manera significativa en las estimaciones de grasa entre estos métodos. Además, se prevé que ciertas variables antropométricas, como los pliegues cutáneos, posean un alto poder predictivo para desarrollar ecuaciones precisas de estimación de grasa segmental.

4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

1. Las fórmulas más utilizadas para la estimación de la adiposidad muestran diferencias significativas en sus resultados respecto a la fórmula de Kerr.
2. Las distintas fórmulas de estimación de adiposidad general no ofrecen resultados equivalentes al compararse directamente con la fórmula de Kerr.
3. Las relaciones entre las fórmulas de estimación de adiposidad, las sumas de pliegues cutáneos y el IMC difieren en función del sexo, con asociaciones significativas en cada caso.
4. La concordancia entre DXA y los métodos de BIA y antropometría en la estimación de la masa grasa general presenta diferencias relevantes, sugiriendo que no son intercambiables.
5. El sexo, el IMC y el estado de hidratación modifican de forma significativa la concordancia entre DXA, BIA y antropometría para la estimación de masa grasa general.
6. La antropometría y BIA presentan limitaciones de validez en comparación con DXA para la estimación de masa grasa general.

7. Las fórmulas disponibles para BIA y antropometría ofrecen estimaciones de masa grasa general que varían según el sexo y el estado de hidratación.
8. Las mediciones de grasa segmental entre DXA y BIA difieren, observándose variaciones importantes que reflejan discrepancias entre ambos métodos.
9. El IMC, el estado de hidratación y el sexo influyen significativamente en las diferencias observadas entre DXA y BIA en la medición de grasa segmental.
10. Los modelos de regresión desarrollados a partir de medidas antropométricas predicen con precisión la grasa en segmentos corporales específicos y muestran buena concordancia con las estimaciones de DXA.

4.3 GENERAL HYPOTHESIS

It is expected that the agreement between DXA, BIA, and anthropometric formulas in the estimation of both general and segmental fat mass will not be consistent in any case, and that factors such as sex, hydration status, and BMI will significantly influence fat estimations across these methods. Additionally, it is anticipated that certain anthropometric variables, such as skinfold thickness, will have a high predictive power for developing accurate equations for segmental fat estimation.

4.4 SPECIFIC HYPOTHESIS

1. The most commonly used formulas for adiposity estimation show significant differences in their results compared to Kerr's formula.
2. Different formulas for general adiposity estimation do not provide equivalent results when directly compared to Kerr's formula.
3. The relationships between adiposity estimation formulas, skinfold sums, and BMI differ depending on sex, with significant associations in each case.
4. The agreement between DXA and the methods of BIA and anthropometry in estimating general fat mass shows relevant differences, suggesting they are not interchangeable.

5. Sex, BMI, and hydration status significantly modify the agreement between DXA, BIA, and anthropometry for estimating general fat mass.
6. Anthropometry and BIA show validity limitations compared to DXA in the estimation of general fat mass.
7. The available formulas for BIA and anthropometry provide general fat mass estimates that vary according to sex and hydration status.
8. Segmental fat measurements between DXA and BIA differ, with important variations reflecting discrepancies between both methods.
9. BMI, hydration status, and sex significantly influence the differences observed between DXA and BIA in segmental fat measurement.
10. Regression models developed from anthropometric measurements accurately predict fat in specific body segments and show good agreement with DXA estimates.

V – MATERIAL Y MÉTODO

V - MATERIAL Y MÉTODO

El método, los resultados y la discusión de la presente tesis doctoral se componen de tres artículos científicos aceptados. A continuación, se detallan las referencias de los artículos ya publicados:

Artículo 1

Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population. *Applied Sciences*. 2022; 12(24):13043. <https://doi.org/10.3390/app122413043>

Factor de impacto: 2.7; Cuartil: Q2; Categoría: Engineering, Multidisciplinary; Posición de la revista: 42; Número de revistas en la categoría: 90.

Artículo 2

Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N and Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front. Nutr.* 2024; 11:1421950. doi: 10.3389/fnut.2024.1421950

Factor de impacto: 4.0; Cuartil: Q2; Categoría: Nutrition & Dietetics; Posición de la revista: 31; Número de revistas en la categoría: 114.

Artículo 3

Mecherques-Carini, M., Albaladejo-Saura, M., Esparza-Ros, F. et al. Validity between dual-energy x-ray absorptiometry and bioelectrical impedance for segmental fat analysis and a novel low-cost model developed using anthropometry in young adults. *J Transl Med* 23, 40 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-06062-1>

Factor de impacto: 6.1; Cuartil: Q1; Categoría: Medicine, Research & Experimental; Posición de la revista: 29; Número de revistas en la categoría: 189.

Para la realización de la presente tesis doctoral, se han analizado tres muestras poblacionales distintas, cada una correspondiente a los estudios publicados que conforman este trabajo. Cada una de estas muestras fue evaluada utilizando métodos de estimación de la composición corporal con el objetivo de analizar la concordancia y precisión de diversas técnicas, incluyendo antropometría, BIA y DXA.

El diseño metodológico de esta tesis se basó en un enfoque comparativo, evaluando la estimación de la adiposidad a través de diferentes ecuaciones antropométricas, así como su relación con BIA y DXA en la cuantificación de la masa grasa total y segmentaria. Cada muestra fue seleccionada atendiendo a criterios específicos de inclusión y exclusión, garantizando la adecuada representación de la población objetivo en cada uno de los estudios.

El primer estudio se centró en la comparación entre distintas ecuaciones antropométricas utilizadas para la estimación de la adiposidad corporal, analizando su grado de concordancia y sus diferencias con la ecuación de Kerr ajustada al contenido lipídico. Para ello, se evaluó una muestra compuesta por adultos jóvenes físicamente activos.

El segundo estudio examinó la validez y la concordancia entre DXA, BIA y antropometría para la estimación de la masa grasa total, considerando además la influencia del sexo, el índice de masa corporal (IMC) y el estado de hidratación en las discrepancias observadas entre los métodos.

Finalmente, el tercer estudio abordó la estimación de la grasa segmental mediante DXA y BIA, evaluando las diferencias entre ambos métodos y desarrollando ecuaciones de regresión basadas en mediciones antropométricas para predecir la masa grasa en miembros superiores, tronco y miembros inferiores.

A continuación, se detallan los procedimientos metodológicos específicos empleados en cada uno de los estudios, describiendo las características de las muestras, los criterios de inclusión y exclusión, las técnicas de medición utilizadas y los procedimientos estadísticos aplicados para el análisis de los datos.

Para el desarrollo de la primera fase de este estudio, se trabajó con una muestra de adultos jóvenes físicamente activos, con el objetivo de comparar la concordancia y diferencias entre diversas fórmulas de estimación de adiposidad mediante antropometría. Se llevó a cabo un diseño transversal en el que se

analizaron distintos modelos matemáticos empleados para estimar la adiposidad corporal y su grado de concordancia entre sí y con la ecuación de Kerr.

La selección de los participantes se realizó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, siguiendo criterios de inclusión y exclusión estrictos. Se consideraron elegibles aquellos individuos con edades comprendidas entre 18 y 40 años, físicamente activos según el cuestionario IPAQ, con un índice de masa corporal (IMC) dentro del rango normativo de la Organización Mundial de la Salud (18.5–24.9 kg/m²) y sin antecedentes de patologías que pudieran afectar la composición corporal. Se excluyeron aquellos que hubieran realizado ejercicio vigoroso en las 24 horas previas, consumido alimentos con efecto diurético, o que presentaran condiciones médicas que alteraran la distribución de la grasa corporal.

Las mediciones antropométricas fueron realizadas siguiendo los estándares de la International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK) por un antropometrista certificado de nivel 3. Se tomaron mediciones de la masa corporal, talla y pliegues cutáneos del tríceps, subescapular, bíceps, cresta ilíaca, supraespinal, abdominal, muslo y pierna, utilizando equipamiento calibrado para garantizar la fiabilidad de los datos. Para cada variable, se realizaron dos mediciones, y en caso de discrepancias mayores al 5% en pliegues o al 1% en otras medidas, se efectuó una tercera medición, tomando la mediana como valor final.

El cálculo de la masa grasa se realizó mediante 14 ecuaciones para hombres y 12 ecuaciones para mujeres, todas validadas en poblaciones con características similares. Adicionalmente, se utilizó la ecuación de Kerr, ajustando su contenido lipídico mediante regresión lineal para facilitar su comparación con el resto de fórmulas. Como variables complementarias, se calcularon el IMC y la suma de pliegues cutáneos en distintas combinaciones ($\Sigma 4$, $\Sigma 6$ y $\Sigma 8$).

Para el análisis estadístico, se emplearon pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianza (Levene). Se utilizaron pruebas ANOVA de medidas repetidas para evaluar diferencias entre fórmulas, aplicando correcciones de Bonferroni para comparaciones múltiples. Se determinó la concordancia entre ecuaciones mediante el coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC) y pruebas de Bland-Altman, considerando rangos establecidos en estudios previos para la interpretación de la fuerza de concordancia. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con un nivel de significación de $p \leq 0.05$.

En el segundo estudio se evaluó la validez y concordancia entre distintos métodos de estimación de la masa grasa, comparando la antropometría, la BIA y DXA. El diseño fue de tipo transversal y descriptivo, con la finalidad de analizar en qué medida los valores de adiposidad obtenidos mediante antropometría y BIA coinciden con los proporcionados por DXA, así como evaluar la influencia del sexo y del estado de hidratación en la precisión de estas mediciones.

La muestra estuvo compuesta por 265 adultos jóvenes (161 hombres y 104 mujeres), reclutados de manera no probabilística por conveniencia. Los criterios de inclusión fueron: tener entre 18 y 35 años, no haber ingerido alimentos ni líquidos desde la noche anterior a la evaluación y no presentar patologías que pudieran afectar la composición corporal. Se excluyeron aquellos que hubieran realizado ejercicio vigoroso en las 24 horas previas a la medición, consumido diuréticos, presentado lesiones o padecido enfermedades que alteraran la distribución de la grasa corporal. Además, en las mujeres se consideró la fase del ciclo menstrual como criterio de control.

El protocolo de evaluación incluyó mediciones en ayuno, en un rango horario de 08:00 a 10:00 horas, con control de la hidratación mediante gravedad específica de la orina, determinada a partir de una muestra analizada con un refractómetro calibrado. Posteriormente, se realizó la medición de la composición corporal a través de DXA (Hologic Horizon, Hologic Inc., Bedford, MA, EE.UU.), siguiendo las recomendaciones del fabricante. Los participantes fueron posicionados en decúbito supino, con manos en posición neutral y pies en leve rotación interna. Para minimizar interferencias, se retiraron objetos metálicos antes de la evaluación. Las mediciones por BIA se realizaron con el modelo TANITA MC-780-MA (Tanita Corporation, Tokio, Japón), con tecnología de multifrecuencia segmental (5 kHz, 50 kHz y 250 kHz). Se tomaron mediciones en posición de bipedestación siguiendo los protocolos estandarizados del fabricante, asegurando que los participantes hubieran orinado en los 30 minutos previos para reducir la influencia de la retención de líquidos. El análisis antropométrico siguió el protocolo de la ISAK, siendo realizado por un antropometrista certificado de nivel 3. Se midieron masa corporal, talla y pliegues del tríceps, subescapular, bíceps, cresta ilíaca, supraespinal, abdominal, muslo y pierna. Los valores de masa grasa se estimaron

a partir de diez ecuaciones de antropometría, seleccionadas por su uso frecuente en poblaciones similares y su validación en estudios previos.

Para el análisis estadístico, se aplicaron pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianza (Levene). Se emplearon ANOVA de medidas repetidas y ANCOVA, considerando el sexo y el estado de hidratación como covariables. Se utilizó la corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples y se analizó la concordancia entre métodos mediante el coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC) y los gráficos de Bland-Altman. Se consideró un nivel de significación de $p \leq 0.05$ para todas las pruebas.

El tercer estudio de esta tesis se centró en la comparación entre DXA y BIA para la estimación de la grasa segmental, con el propósito de determinar su nivel de concordancia y explorar el impacto del sexo, el IMC y el estado de hidratación en las diferencias observadas. Además, se desarrollaron modelos de regresión utilizando antropometría como alternativa accesible para estimar la grasa en segmentos corporales específicos. Este diseño permitió no solo analizar la precisión de BIA en la estimación de grasa segmental, sino también validar modelos antropométricos como alternativa de bajo costo para la evaluación de la adiposidad corporal segmental.

Para ello, se llevó a cabo un estudio transversal en el que participaron 264 adultos jóvenes, de los cuales 161 eran hombres (edad media = 23.04 ± 5.61 años) y 103 eran mujeres (edad media = 22.29 ± 5.98 años). Los criterios de inclusión requerían que los participantes fueran estudiantes universitarios de disciplinas afines a la composición corporal, que tuvieran entre 18 y 35 años, y se presentaran en ayunas de al menos 8 horas antes de la evaluación. Como criterios de exclusión se estableció la prohibición de actividad física intensa en las 24 horas previas, el consumo de diuréticos o comidas copiosas en el mismo período, la presencia de patologías metabólicas que afectaran la distribución de la grasa corporal, el uso reciente de corticoides o tratamientos hormonales (salvo regulación menstrual) y la falta de adherencia a las condiciones experimentales.

Las mediciones se realizaron en una única sesión bajo condiciones controladas, asegurando una temperatura ambiente estable y minimizando factores externos que pudieran influir en los resultados. La evaluación del estado

de hidratación se llevó a cabo mediante gravedad específica de la orina (USG) utilizando un refractómetro portátil, clasificando a los participantes en tres niveles de hidratación: bien hidratados (USG ≤ 1.020), moderadamente deshidratados (USG 1.021-1.024) y significativamente deshidratados (USG > 1.024).

El análisis de grasa segmental se realizó con DXA y BIA, empleando un escáner Hologic Horizon (Hologic Inc., Bedford, MA, EE.UU.) y una balanza TANITA MC-780-MA (Tanita Corporation, Tokio, Japón), respectivamente. Se aplicaron los protocolos estándar de calibración y posicionamiento para garantizar la fiabilidad de las mediciones. DXA se utilizó como método de referencia para determinar la grasa en los segmentos corporales, mientras que BIA proporcionó una estimación alternativa basada en impedancia bioeléctrica a diferentes frecuencias.

Finalmente, se realizaron mediciones antropométricas siguiendo los protocolos de ISAK, con un evaluador nivel 3. Se registraron medidas básicas, pliegues cutáneos, perímetros, longitudes y alturas y diámetros óseos bilaterales, asegurando una alta repetibilidad mediante mediciones duplicadas o triplicadas en caso de discrepancias superiores a los umbrales establecidos. A partir de estos datos, se desarrollaron modelos de regresión para estimar la masa grasa segmental, evaluando su validez frente a DXA.

El análisis estadístico se realizó utilizando el software SPSS v.23 (IBM, Endicott, NY, USA) y MedCalc Statistical Software v.20.106 (Mariakerke, Bélgica). Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, junto con el análisis de curtosis y asimetría, mientras que la homogeneidad de las varianzas se verificó mediante la prueba de Levene. Dado que las variables presentaron una distribución normal y varianzas homogéneas, se emplearon pruebas paramétricas. Se calcularon estadísticas descriptivas para las variables analizadas y se compararon las estimaciones de masa grasa segmentaria entre DXA y BIA mediante un ANOVA de medidas repetidas, complementado con un ANCOVA para evaluar la influencia del índice de masa corporal (IMC), el estado de hidratación y el sexo. El tamaño del efecto se calculó mediante el eta cuadrado parcial (η^2p), y se determinaron intervalos de confianza del 95% (IC 95%) para garantizar la robustez de los resultados. La validez del análisis segmentario de BIA en comparación con DXA se evaluó mediante el método de Bland-Altman, identificando tendencias sistemáticas de sobreestimación o subestimación.

Además, se desarrollaron modelos de regresión multivariante por pasos para predecir la masa grasa segmentaria a partir de variables antropométricas, asegurando la ausencia de colinealidad mediante el factor de inflación de la varianza ($VIF \leq 5$). Se estableció un nivel de significación de $p \leq 0.05$ para todas las pruebas.

Los procedimientos estadísticos utilizados en este estudio permitieron evaluar de manera detallada la relación entre los diferentes métodos de estimación de la masa grasa segmentaria, identificando no solo las diferencias cuantitativas, sino también los factores que pueden influir en la concordancia entre técnicas. La integración de modelos de regresión multivariante proporciona una herramienta adicional para estimar la composición corporal de manera más precisa, considerando variables antropométricas y de estado fisiológico. Estos análisis constituyen una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la cineantropometría y refuerzan la importancia de seleccionar metodologías adecuadas para la valoración de la adiposidad, especialmente en poblaciones con características específicas como atletas o individuos con perfiles clínicos particulares.





VI - COMPENDIO DE ARTÍCULOS

Artículo 1

Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population. *Applied Sciences*. 2022; 12(24):13043. <https://doi.org/10.3390/app122413043>

Article

Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population

Malek Mecherques-Carini ¹ , Francisco Esparza-Ros ¹ , Mario Albaladejo-Saura ^{1,*} 
and Raquel Vaquero-Cristóbal ^{1,2} 

¹ Cátedra Internacional de Cineantropometría, UCAM Universidad Católica de Murcia, Av. de los Jerónimos 135, 30107 Murcia, Spain

² Facultad de Deporte, UCAM Universidad Católica de Murcia, Av. de los Jerónimos 135, 30107 Murcia, Spain

* Correspondence: mdalbaladejosaura@ucam.edu; Tel.: +34-968-27-86-02

Abstract: The importance of fat mass estimation in multiple areas related to health and sports has led to the emergence of a large number of methods and formulas for its estimation. The aim of the present study was to compare the agreement and differences between different formulas for estimating fat mass by anthropometry. Eighty-seven subjects underwent an anthropometric assessment following the protocol from the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK). The fat percentage was calculated with 14 different formulas for men and with 12 different formulas for women. In the case of men, they were proposed by Durnin-Womersley, Yuhasz, Faulkner, Carter, Peterson, Katch-McArdle, Sloan, Wilmore, Evans, Lean, Reilly, Civar, Hastuti, and Kerr. In the case of women, the equations used were those proposed by Durnin-Womersley, Yuhasz, Faulkner, Carter, Peterson, Katch-McArdle, Sloan, Wilmore, Evans, Lean, Thorland, and Kerr. Significant differences were found between the formulas in both men ($8.90 \pm 2.17\%$ to $17.91 \pm 2.84\%$; $p < 0.001$ – 0.016) and women ($15.33 \pm 2.94\%$ to $28.79 \pm 3.30\%$; $p < 0.001$ – 0.004). It was observed that in the case of men, the Carter and Yuhasz formulas and the Civar and Faulkner formulas showed moderate agreement with each other (CCC = 0.910–0.915). In the case of women, it was observed that the Carter and Yuhasz formulas showed moderate agreement with each other (CCC = 0.974). In conclusion, the formulas used for the estimation of lipid mass in anthropometry reported significantly different results between them and were therefore not comparable.

Keywords: adipose tissue; body fat; body weight; fat tissue; sports; health; kinanthropometry; performance; skinfolds



Citation: Mecherques-Carini, M.; Esparza-Ros, F.; Albaladejo-Saura, M.; Vaquero-Cristóbal, R. Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 13043. <https://doi.org/10.3390/app122413043>

Academic Editors: Jesús García Pallarés and René Schwesig

Received: 15 November 2022

Accepted: 15 December 2022

Published: 19 December 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The importance of body fat in multiple areas such as health, due to its association with various pathologies and their comorbidities, or sports, due to its relationship with the optimization of physical performance, has led the scientific community to look for different ways to quantify it [1–3]. However, in the classical approach to fat mass estimation, one of the main problems in estimating body composition, and more specifically its adipose component, has been the confusion in using the terms fat, lipids, and adiposity as synonyms, when they are not [4,5]. In this respect, body composition, regardless of the method used, can be approached based on five levels of increasing complexity [6–8]. Model 1, at the atomic level, considers body mass as the sum of the amount of hydrogen; carbon; oxygen; nitrogen, calcium, phosphorus, and other atoms. Model 2, at the molecular level, considers body mass as the sum of lipid mass and lipid-free mass, including water, proteins, carbohydrates, and minerals. Model 3, at the cellular level, considers body mass as the sum of fat mass, intracellular water, intracellular solids, extracellular water, and extracellular solids. Model 4, at the tissue level, considers body mass as the sum of adipose tissue, skeletal muscular mass, bone mass, and lean soft tissue, which includes connective tissue,

and residual mass. Finally, Model 5 is based on a whole-body level of complexity, in which body mass is the sum of different body segments, such as the head, trunk, and limbs [7,8]. In this respect, it is important to differentiate that the adipose mass considers the totality of the adipocyte's components, 90% of which is fat and the remaining 10% water, minerals, proteins, etc. Of this fat component, 16% corresponds to glycerol and the remaining 83% corresponds to the lipid component inside the fat cell [7,8]. However, these three concepts have classically been used as homonyms in the estimation of body composition, inducing errors around 8–10% in the approach to the adipose component [9].

Considering the impossibility of measuring body composition directly, for which *in vivo* dissection would be necessary [10], previous studies have described a large number of methods to determine the adipose component of a subject, among which dual X-ray absorptiometry (DXA), bioimpedance (BIA) and anthropometry stand out as the most widely used [6]. DXA is based on absorptiometry through which the attenuation of emitted photons is detected [11]. This method estimates adipose mass using a tissue model approach (model 4) [6,7]. The most important advantages of this method are its ease of application, safety, and non-invasive nature [10]. However, it also has important disadvantages, such as the variability between devices, the difficulty in evaluating subjects taller than 190 cm, and its low accessibility [12]. On the other hand, BIA is a method based on the electrical conductivity properties of the different tissues of the human body [13]. This method performs lipid mass estimation using a molecular model approach (model 2) [7]. It is a fast, easy-to-apply, and non-invasive method, but it has limitations that affect its reliability and validity, calling into question not only the final lipid mass values given, but also the impedance value obtained from which the estimates are made [14]. More specifically, any context where total body water is affected will have a direct impact on impedance and therefore on the estimated lipid component [6,7,15]. As a consequence of the above, although it is a relatively inexpensive method, it is only a valid method for assessing populations, but not individuals in particular [14], and its use in clinical practice is also limited because it is not reliable when evaluating the evolution of patients or athletes [16].

In the case of anthropometry, this technique makes it possible to estimate body adiposity by measuring skinfold, as the most commonly anthropometric used variable for this, as well as height, waist girth, and other abdominal girths in a simple, safe, and low-cost way measurements [10,17]. Its main advantage is that the results of the anthropometric assessment are not affected by total body water content or pre-measurement intakes, which facilitates its replicability [18]. Given the simplicity of the technique, and the speed and frequency of implementation that it allows due to its innocuousness, it is one of the fat mass estimation techniques with the best cost/benefit ratio [6]. In turn, when seeking to evaluate changes in adiposity levels over time, skinfold measurements has been proposed as the best tool, especially considering that other methods are affected by factors that are difficult to control and standardize, especially in the clinical setting, such as food intake, hydration levels or daily physical activity [6,18].

From an anthropometric point of view, it is possible to approach adiposity using molecular and tissue models [6,19]. More specifically, anthropometry allows the estimation of lipid mass following the molecular model (Model 2) by means of different equations validated [20–33], being this a double indirect method of estimating body composition since it uses a series of skinfolds to estimate body density through a regression equation; from the data obtained, another formula is used to estimate fat mass [8]. However, in this approach to lipid mass, it should be taken into consideration that lipid estimation formulas have been validated for a specific population with specific socio-demographic characteristics (sex, age, race, sports practice, pathologies, etc.) and should only be applied when the characteristics of the population to be analyzed have exactly the same characteristics [9]. However, the difficulty of doing this and the absence of formulas to assess some subjects whose characteristics do not fit with any of the specified validation populations has meant that classically the formulas are applied even when the population is not the same, and the results of these formulas have been compared as if they were interchangeable, in some

cases not specifying the formula with which a subject or population have been evaluated in both scientific and clinical settings [34–36]. More specifically, in the assessment of adiposity in the active adult population, many formulas have been used [19–33] without taking into consideration, as can be seen in Table 1, the very specific populations for which they were validated. In addition, most of them have been validated using indirect methods as the gold standard, with few formulas being validated in comparison with the direct method such as cadaveric dissection [20,22,30,33].

Table 1. Characteristics and information regarding the validation, variables and estimated component of the formulas used.

Formula	Population Characteristics	Variables Included	Estimated Component	Method of Validation
Dumin-Womersley	Moderately sedentary male and female populations (students, professionals, patients from an obesity clinic, sports clubs, and ballet dancers; four age groups)	Body mass; triceps, biceps, subscapular and supraspinale skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Yuhasz	Elite male and female athletes (Olympic games)	Body mass; triceps, subscapular, supraspinale, abdominal, thigh, and calf skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Faulkner	Male and female swimmers	Body mass; triceps, subscapular, supraspinale, abdominal skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Carter	Elite male and female athletes (Olympic games)	Body mass; triceps, subscapular, supraspinale, abdominal, thigh, and calf skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Peterson	Healthy white male and female adults	Body mass; triceps, subscapular, supraspinale, and thigh skinfolds	Lipid mass	DXA
Katch-McArdle	Physical education activity male and female students from New York (USA)	M = body mass; triceps, subscapular and abdominal skinfolds F = body mass; triceps, subscapular and thigh skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Sloan	White, healthy, South African medicine male and female students (18 to 26 years old)	Body mass; subscapular and thigh skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry and ultrasound

Table 1. Cont.

Formula	Population Characteristics	Variables Included	Estimated Component	Method of Validation
Wilmore	Healthy male and female students from California University (USA)	M = body mass; abdominal and thigh skinfolds F = body mass; triceps, subscapular and thigh skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Evans	White and Afro-American male and female collegiate athletes (football, basketball, volleyball, gymnastics, swimming and track and field)	Body mass; triceps, abdominal and thigh skinfolds	Lipid mass	DXA
Lean	White and healthy male and female from Glasgow (Scotland)	Body mass; triceps, biceps, subscapular and iliac crest skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Reilly	Professional male soccer players from Premier League clubs (UK)	Body mass; triceps, abdominal, thigh, and calf skinfolds	Lipid mass	DXA
Civar	Male university athletes	Body mass; triceps, biceps, and abdominal skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Hastuti	Healthy male adults from Indonesia	Body mass; triceps, biceps, subscapular, and iliac crest skinfolds	Lipid mass	Deuterium oxide dilution
Thorland	Female athletes from USA national championships (track and field, gymnastics, diving, and wrestling)	Body mass; triceps, subscapular, and iliac crest skinfolds	Lipid mass	Hydrodensitometry
Kerr	Male and female population (6 to 77 years old; cyclists, Canadian elders, children and adolescents from the Coquitlam Growth Study, professional bodybuilders, Montreal Olympic Games athletes and Pan-American Games rowers)	Height; triceps, subscapular, supraespinale, abdominal, thigh, and calf skinfolds	Adipose tissue	Cadaver dissection

M: male; F: female.

While most anthropometric formulas have sought to estimate body lipid mass, Kerr's mathematical model for estimating body composition estimates subcutaneous adipose tissue (model 4) (Table 1), which considers adipose tissue as a whole [19], including in its estimation of other non-lipid components that are part of adipocytes, such as water and proteins, as it is a method of anatomical tissue fractionation [37], the same approach used by DXA, which has classically been considered the gold standard for body composition assessment [6,7]. One of the strongest points of the Kerr formula is that it includes the

person's height in the analysis of adiposity. This allows the three-dimensionality of mass and limb length to be considered [19]. Moreover, its validation on cadavers' objective data from the dissection study carried out in Brussels [19] and its validation on populations with very heterogeneous characteristics makes it a reference value against which to compare adiposity, as has been done in previous studies where it has been used as the best formula for addressing adiposity in anthropometry [5,8,9]. In addition, Kerr's formula is a mathematical model that does not require the estimation of body density, so it is not a double indirect model but an indirect model, being on the same level in this sense as other methods such as DXA, air displacement plethysmography or hydrodensitometry or hydrostatic weighing [6,7]. All these characteristics are why the Kerr method has been considered by many anthropometrists to be the gold standard equation within anthropometry for body composition assessment [5,8,9].

A recent study found that the variability in the results obtained with four different anthropometric "fat" estimation formulas (really lipid or adipose mass) was high [5,38]. However, this study did not analyze the differences between the fat estimation formulas according to sex, despite the large differences in the distribution of adiposity between men and women [39], and the influence of biological variability on the validity of this type of formula [38]. Another limitation of this study was that it included formulas for estimating adipose mass and lipid mass, comparing them without making any adjustment, which is not conceptually correct as they are estimating different components, inducing errors around 8–10% [9].

For all the above reasons, a study comparing different "fat" estimation formulas in similar populations, that does not mix formulas where different approaches to body composition are taken [9], and differentiating the results between sexes [39], is therefore necessary in order to find out whether the results obtained by these classically used formulae are comparable or not [9]. Therefore, the aim of the present study was to analyze the differences and the degree of agreement between the most commonly used formulas for lipid estimation, among themselves and in comparison with Kerr's adiposity formula, once their lipid content was estimated; the similarity between the results reported by the different formulas in comparison with Kerr's formula as it is considered the gold standard in anthropometry; as well as to establish their existing relationship with the different sums of skinfolds and BMI according to sex.

2. Materials and Methods

2.1. Design

The present research followed a descriptive, cross-sectional design. The sample recruitment was non-probabilistic by convenience. The calculation to establish the sample size was performed with Rstudio 3.15.0 software (Rstudio Inc., Boston, MA, USA) [40]. The significance level was set at $\alpha = 0.05$. The standard deviation (SD) for total sample was set based on previous studies on the variables lipid percentage (SD = 5.25) and $\Sigma 6$ skinfolds (SD = 28.55) [8]. Click or tap here to enter text. With an estimated error of (d) 1.05% for lipid percentage and 5.9 mm for $\Sigma 6$ skinfolds, a sample of 90 subjects for the total group was required. In addition, the sample size for each sex was calculated based on previous research in men ($\Sigma 6$ skinfolds: SD = 17.89; and lipid percentage: SD = 1.73) [41] and in women ($\Sigma 6$ skinfolds: SD = 17.66; and lipid percentage: SD = 2.80) [42]. Click or tap here to enter text. With an estimated error of (d) 0.55 and 0.90% for lipid percentage and 5.8 and 5.7 mm for $\Sigma 6$ skinfolds, a sample of 37 men and women was required, respectively.

2.2. Participants

A total of 91 volunteers from the province of Buenos Aires (Argentina) were included, and their selection was non-probabilistic by convenience. Of these, 37 were male; and 54 were female. The inclusion criteria were: (1) being aged between 18 and 40 years; (2) being physically active, for which the IPAQ questionnaire was used to assess the physical activity level of the volunteers, with the World Health Organization (WHO) Global Physical Activity

Recommendations for Health used as criteria, (3) having a body mass index (BMI) in the normal range according to the WHO (18.5–24.9 kg/m²) and (4) having neither any disease that could affect body fat nor undergone hormonal or corticosteroid treatment in the three months prior to the evaluation. The exclusion criteria were as follows: (1) within the 24 h prior to the measurement session, they had performed vigorous physical exercise, or 12 h in case of moderate exercise, or any kind of physical exercise on the same day; (2) within the 24 h prior to the measurement session, they consumed products with diuretic properties, or ate a heavy meal; (3) having any injury or pathology that conditioned the taking of measurements; and (4) for female participants, being between the 8th and 21st days of their menstrual cycle.

2.3. Procedure

The Ethics Committee from Catholic University San Antonio of Murcia (Murcia, Spain) reviewed and authorized the protocol designed for data collection, considering the World Medical Association Code (CE062103). All points of the Declaration of Helsinki were followed throughout the process. Participants were informed about the procedure and signed a consent form prior to starting the study. The protocol was registered at ClinicalTrials.gov (ClinicalTrials.gov Identifier: NCT04429581).

First, the participants were asked to complete an ad hoc questionnaire to provide information on basic demographics (sex and age), diseases that could affect body fat (illnesses and injuries in the last six months, chronic illness and surgeries), medication taken regularly, hormonal or corticosteroid treatment (daily or occasional treatment in the last six months), last menstrual period for women, and food intake (24 h dietary recall—24HR) and sports practice (24 h exercise recall) in the last 24 h, based on previous studies [8,42].

They also self-completed the IPAQ questionnaire, previously validated in Spanish, with a good reliability ($r = 0.82$) and an acceptable validity [43]. In this study, the last 7 days self-administered long form of the IPAQ was used. The questionnaire evaluates physical activity at work, for transportation, during leisure time, and at home. The frequency (per week) and time spent on vigorous- and moderate-intensity activities and the time spent walking are registered for each category, together with the time spent sitting during a workday and on a weekend day. Explanations and practical examples for vigorous and moderate physical activities are given. To be registered, an activity must last at least 10 min, following the methodology of previous studies [43]. For data analysis, moderate intensity was defined as 4 METs (metabolic equivalent task) and vigorous intensity as more than 8 METs [44]. Walking activity was defined as 3.3 METs. One MET is the energy expended at rest and is defined as $3.5 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$. Active subjects were considered to be those who had a weekly metabolic expenditure above 600 METs [45].

Second, all the measurements were performed in a single session in a room with a standardized temperature of 24 °C, between 8:30 am and 1:30 pm. The anthropometric variables were taken following the protocol from the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK) [46]. Basic measurements such as body mass and height, together with triceps, subscapular, biceps, iliac crest, supraspinal, abdominal, thigh, and leg skinfolds were taken by an ISAK level 3 certified anthropometrist. To measure the body mass, the subject stood with minimal clothing in the center of the scale without support and with the weight distributed evenly on both feet. Regarding height, it was measured after having positioned its head in the Frankfort plane during a deep breath. All skinfold measurements followed the same technique. The nearer edge of the contact faces of the caliper was applied 1 cm away from the skinfold landmark done before and at the same depth that the digits that hold the fold were located. Measurements were recorded two seconds after the full pressure of the caliper was applied. A SECA 862 weighing scale (SECA, Hamburg, Germany) with an accuracy of 100 g was used for body mass, a SECA 213 portable stadiometer (SECA, Hamburg, Germany) with an accuracy of 0.1 mm was used for height measurement, and a Harpenden calliper (Harpenden, London, UK) with an accuracy of 0.2 mm was used for skinfolds. Each measurement was taken twice. If

Recommendations for Health used as criteria, (3) having a body mass index (BMI) in the normal range according to the WHO ($18.5\text{--}24.9\text{ kg/m}^2$) and (4) having neither any disease that could affect body fat nor undergone hormonal or corticosteroid treatment in the three months prior to the evaluation. The exclusion criteria were as follows: (1) within the 24 h prior to the measurement session, they had performed vigorous physical exercise, or 12 h in case of moderate exercise, or any kind of physical exercise on the same day; (2) within the 24 h prior to the measurement session, they consumed products with diuretic properties, or ate a heavy meal; (3) having any injury or pathology that conditioned the taking of measurements; and (4) for female participants, being between the 8th and 21st days of their menstrual cycle.

2.3. Procedure

The Ethics Committee from Catholic University San Antonio of Murcia (Murcia, Spain) reviewed and authorized the protocol designed for data collection, considering the World Medical Association Code (CE062103). All points of the Declaration of Helsinki were followed throughout the process. Participants were informed about the procedure and signed a consent form prior to starting the study. The protocol was registered at ClinicalTrials.gov (ClinicalTrials.gov Identifier: NCT04429581).

First, the participants were asked to complete an ad hoc questionnaire to provide information on basic demographics (sex and age), diseases that could affect body fat (illnesses and injuries in the last six months, chronic illness and surgeries), medication taken regularly, hormonal or corticosteroid treatment (daily or occasional treatment in the last six months), last menstrual period for women, and food intake (24 h dietary recall—24HR) and sports practice (24 h exercise recall) in the last 24 h, based on previous studies [8,42].

They also self-completed the IPAQ questionnaire, previously validated in Spanish, with a good reliability ($r = 0.82$) and an acceptable validity [43]. In this study, the last 7 days self-administered long form of the IPAQ was used. The questionnaire evaluates physical activity at work, for transportation, during leisure time, and at home. The frequency (per week) and time spent on vigorous- and moderate-intensity activities and the time spent walking are registered for each category, together with the time spent sitting during a workday and on a weekend day. Explanations and practical examples for vigorous and moderate physical activities are given. To be registered, an activity must last at least 10 min, following the methodology of previous studies [43]. For data analysis, moderate intensity was defined as 4 METs (metabolic equivalent task) and vigorous intensity as more than 8 METs [44]. Walking activity was defined as 3.3 METs. One MET is the energy expended at rest and is defined as $3.5\text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$. Active subjects were considered to be those who had a weekly metabolic expenditure above 600 METs [45].

Second, all the measurements were performed in a single session in a room with a standardized temperature of $24\text{ }^\circ\text{C}$, between 8:30 am and 1:30 pm. The anthropometric variables were taken following the protocol from the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK) [46]. Basic measurements such as body mass and height, together with triceps, subscapular, biceps, iliac crest, supraspinal, abdominal, thigh, and leg skinfolds were taken by an ISAK level 3 certified anthropometrist. To measure the body mass, the subject stood with minimal clothing in the center of the scale without support and with the weight distributed evenly on both feet. Regarding height, it was measured after having positioned its head in the Frankfort plane during a deep breath. All skinfold measurements followed the same technique. The nearer edge of the contact faces of the caliper was applied 1 cm away from the skinfold landmark done before and at the same depth that the digits that hold the fold were located. Measurements were recorded two seconds after the full pressure of the caliper was applied. A SECA 862 weighing scale (SECA, Hamburg, Germany) with an accuracy of 100 g was used for body mass, a SECA 213 portable stadiometer (SECA, Hamburg, Germany) with an accuracy of 0.1 mm was used for height measurement, and a Harpenden calliper (Harpenden, London, UK) with an accuracy of 0.2 mm was used for skinfolds. Each measurement was taken twice. If

the difference between them was greater than 1% for the basic measurements or greater than 5% for the skinfolds, a third measurement was taken. The final value considered for data analysis was the mean if two measurements were taken or the median if three measurements were taken. The intra-evaluator technical error of measurement (TEM) was 0.01% for basic measurements and 1.12% for skinfolds.

For the estimation of lipid mass and its percentages in men, all the equations that had been validated in a young population were used: they were proposed by Durnin-Womersley [20], Yuhasz [21], Faulkner [22], Carter [23], Peterson [24], Katch-McArdle [25], Sloan [26], Wilmore [27], Evans [28], Lean [29], Reilly [32], Civar [31], and Hastuti [33]. In the case of women, the equations used were those proposed by Durnin-Womersley [20], Yuhasz [21], Faulkner [22], Carter [23], Peterson [24], Katch-McArdle [25], Sloan [26], Wilmore [27], Evans [28], Lean [29], and Thorland [30]. In both cases, the formula proposed by Kerr was also included, although as it is a formula that estimates adiposity, its lipid content was calculated by linear regression assuming a minimum percentage error with Martin's formula [19,47].

Body mass index (BMI) (body mass in kg/height in m²), the sum of four skinfolds (triceps, subscapular, biceps, and supraspinal), the sum of six skinfolds (triceps, subscapular, supraspinal, abdominal, thigh and leg), and the sum of eight skinfolds (triceps, subscapular, biceps, iliac crest, supraspinal, abdominal, thigh, and leg), were also calculated.

2.4. Statistical Analysis

The distribution (Kolmogorov–Smirnov test), kurtosis, and asymmetry of the variables were calculated. Levene's test was used to assess the homogeneity of the variables. The analysis of skewness and kurtosis showed a platykurtic distribution for all variables. As a normal and homogeneous distribution of the variables was found, parametric tests were performed. Descriptive statistics were performed for the variables analyzed. Differences between adiposity equations were analyzed by a one-way analysis of variance (ANOVA) for repeated measurements. The Bonferroni post hoc adjustment was used to analyze differences between groups when these differences were significant. The effect size for the pairwise comparisons was calculated with Cohen's D. The confidence interval (CI) of the differences (95% CI) was included. Threshold values for effect size were set as ≥ 0.2 (small), ≥ 0.5 (moderate), and ≥ 0.8 (large). Percentile analysis of the different variables was also included. The software used in the statistical analysis was SPSS (v.23, IBM, Endicott, NY, USA). Agreement between equations was determined using Lin's concordance correlation coefficient (CCC), including precision (ρ) and accuracy (Cb) indexes, and by McBride's strength concordance (almost perfect > 0.99 ; substantial > 0.95 to 0.99 ; moderate = 0.90 – 0.95 ; and poor < 0.90), following previous research [48,49]. A Pearson's correlation test and a Bland–Altman test were used to determine the agreement and interchangeability between the different equations. For Pearson's correlation, the following ranges were established: $r < 0.5$ for low correlation, 0.5 – 0.7 for moderate correlation, and > 0.7 for high correlation [50]. The software used to perform Lin's concordance correlation, Pearson's correlation, and the Bland–Altman test was MedCalc Statistical Software v.20.106 (Mariakerke, Belgium). For all the statistical tests, the significance level was set a priori at $p \leq 0.05$.

3. Results

Socio-demographic characteristics were mean age: 26.3 ± 6.25 years old; mean body mass: 70.83 ± 6.13 kg; men height: 175.30 ± 6.42 cm for men; and mean age: 26.53 ± 5.39 years old; mean body mass: 58.02 ± 6.70 kg; mean height: 161.87 ± 5.57 cm for women.

3.1. Descriptive Analysis and Differences between Lipid Mass Estimation Formulas

Descriptive analysis of BMI, sum of 4, 6, and 8 skinfolds and lipid percentages estimated by the different formulas for males and females are shown in Table 2. Differences between lipid percentage formulas were significant for both men (mean diff = -9.88 – 9.03 ; $p < 0.001$ – 0.016 ;

ES = 0.05–0.70; 95%CI = –11.57–10.33) and women (mean diff = –12.01–13.46; $p < 0.001$ –0.010; ES = 0.00–5.37; 95%CI = –12.79–14.27). Therefore, a pairwise comparison of the formulas was performed, the results of which are shown in Tables 3 and 4 for males and females, respectively. Significant differences were found in the pairwise comparison for most of the formulas for both males and females.

Table 2. Descriptive analysis of anthropometric variables and lipid percentages in men and women.

Variable	Men ($n = 37$)		Women ($n = 54$)	
	Mean \pm SD	Max.–Min.	Mean \pm SD	Max.–Min.
BMI	23.03 \pm 1.39	24.48–19.35	22.07 \pm 1.54	24.50–18.50
$\Sigma 4$ skinfolds (mm)	35.50 \pm 11.71	63.50–19.75	46.60 \pm 14.22	80.10–22.25
$\Sigma 6$ skinfolds (mm)	60.14 \pm 20.64	120.25–36.25	85.26 \pm 21.61	133.75–42.50
$\Sigma 8$ skinfolds (mm)	78.30 \pm 27.35	153.25–44.75	106.83 \pm 28.28	170.25–51.25
% Carter	8.90 \pm 2.17	15.21–6.38	16.77 \pm 3.34	24.28–10.15
% Civar	12.40 \pm 2.65	20.22–9.35	-	-
% Durnin	12.95 \pm 3.76	21.63–7.21	23.38 \pm 5.07	35.72–13.03
% Evans	17.72 \pm 3.17	27.24–13.92	15.33 \pm 2.94	21.88–8.81
% Faulkner	12.11 \pm 2.15	18.02–9.49	18.90 \pm 3.56	27.98–13.11
% Hastuti	17.91 \pm 2.84	24.84–14.17	-	-
% Katch	10.71 \pm 3.04	19.17–6.81	18.37 \pm 2.93	25.63–13.02
% Kerr	16.04 \pm 4.89	33.39–10.47	22.73 \pm 5.41	39.71–10.57
% Lean	14.50 \pm 4.59	24.84–7.25	26.31 \pm 4.11	35.51–17.56
% Peterson	18.78 \pm 4.30	29.56–12.00	28.79 \pm 3.30	33.88–21.88
% Reilly	11.45 \pm 2.33	18.10–8.84	-	-
% Sloan	9.73 \pm 3.67	21.01–5.48	21.46 \pm 3.54	29.06–14.94
% Thorland	-	-	20.03 \pm 5.55	33.20–10.67
% Wilmore	14.03 \pm 3.10	23.48–10.06	23.92 \pm 2.03	28.43–20.51
% Yuhasz	8.90 \pm 2.17	15.22–6.39	16.77 \pm 3.34	24.28–10.15

BMI: body mass index; %: percentage of fat mass.

Table 3. Differences between lipid formulas in mean of percentages in men.

Formulas	Mean Differences \pm Standard Error	95%CI (Lower; Upper)	p Value	Cohen's d
% Carter–% Peterson	–9.887 \pm 0.398	–11.570; –8.205	$p < 0.001$	2.90
% Carter–% Katch	–1.814 \pm 0.179	–2.572; –1.056	$p < 0.001$	0.69
% Carter–% Sloan	–0.831 \pm 0.304	–2.117; 0.454	$p = 1.000$	0.28
% Carter–% Wilmore	–5.135 \pm 0.213	–6.036; –4.234	$p < 0.001$	1.92
% Carter–% Evans	–8.829 \pm 0.182	–9.598; –8.059	$p < 0.001$	3.25
% Carter–% Lean	–5.607 \pm 0.492	–7.687; –3.526	$p < 0.001$	1.56
% Carter–% Reilly	–2.551 \pm 0.70	–2.848; –2.254	$p < 0.001$	1.13
% Carter–% Civar	–3.503 \pm 0.140	–4.093; –2.912	$p < 0.001$	1.45
% Carter–% Hastuti	–9.018 \pm 0.189	–9.819; –8.217	$p < 0.001$	3.57
% Civar–% Hastuti	–5.515 \pm 0.176	–6.259; –4.770	$p < 0.001$	2.49
% Durnin–% Yuhasz	4.054 \pm 0.385	2.417; 5.673	$p < 0.001$	1.32
% Durnin–% Faulkner	0.833 \pm 0.366	–0.716; 2.383	$p = 1.000$	0.27
% Durnin–% Carter	4.050 \pm 0.385	2.422; 5.678	$p < 0.001$	1.32
% Durnin–% Peterson	–5.837 \pm 0.348	–7.310; –4.364	$p < 0.001$	1.44
% Durnin–% Katch	2.236 \pm 0.311	0.919; 3.553	$p < 0.001$	0.66
% Durnin–% Sloan	3.219 \pm 0.460	1.274; 5.163	$p < 0.001$	0.87
% Durnin–% Wilmore	–1.085 \pm 0.403	–2.788; 0.618	$p = 1.000$	0.31
% Durnin–% Evans	–4.779 \pm 0.397	–6.458; –3.099	$p < 0.001$	1.37
% Durnin–% Lean	–1.557 \pm 0.268	–2.690; –0.424	$p < 0.001$	0.37
% Durnin–% Reilly	1.499 \pm 0.406	–0.218; 3.216	$p < 0.001$	0.48
% Durnin–% Civar	0.547 \pm 0.358	–0.968; 2.062	$p = 1.000$	0.17

Table 3. Cont.

Formulas	Mean Differences ± Standard Error	95%CI (Lower; Upper)	p Value	Cohen's d
% Wilmore-% Reilly	2.584 ± 0.230	1.610;3.557	p < 0.001	0.94
% Wilmore-% Civar	1.632 ± 0.233	0.646;2.618	p < 0.001	0.57
% Wilmore-% Hastuti	-3.883 ± 0.265	-5.004;-2.762	p < 0.001	1.31
% Yuhasz-% Faulkner	-3.212 ± 0.120	-3.717;-2.706	p < 0.001	1.49
% Yuhasz-% Carter	0.005 ± 0.000	0.005;0.005	p < 0.001	0.00
% Yuhasz-% Peterson	-9.882 ± 0.398	-11.565;-8.20	p < 0.001	2.90
% Yuhasz-% Katch	-1.809 ± 0.179	-2.567;-1.051	p < 0.001	0.69
% Yuhasz-% Sloan	-0.826 ± 0.304	-2.112;0.459	p = 1.000	0.28
% Yuhasz-% Wilmore	-5.130 ± 0.213	-6.031;-4.229	p < 0.001	1.92
% Yuhasz-% Evans	-8.824 ± 0.182	-9.593;-8.054	p < 0.001	3.25
% Yuhasz-% Lean	-5.602 ± 0.492	-7.682;-3.521	p < 0.001	1.56
% Yuhasz-% Reilly	-2.546 ± 0.70	-2.843;-2.249	p < 0.001	1.13
% Yuhasz-% Civar	-3.498 ± 0.140	-4.088;-2.907	p < 0.001	1.45
% Yuhasz-% Hastuti	-9.013 ± 0.189	-9.814;-8.212	p < 0.001	3.57

NOTE: displayed with a grey background when the pairwise comparison is sig.

Table 4. Differences between lipid formulas in mean of percentages in women.

Formulas	Mean Differences ± Standard Error	95%CI (Lower; Upper)	p Value	Cohen's d
% Carter-% Peterson	-12.018 ± 0.191	-12.796;-11.240	p < 0.001	3.62
% Carter-% Katch	-1.594 ± 0.331	-2.942;-0.247	p = 0.004	0.51
% Carter-% Sloan	-4.689 ± 0.190	-5.463;-3.914	p < 0.001	1.36
% Carter-% Thorland	-3.252 ± 0.380	-4.802;-1.703	p < 0.001	2.59
% Carter-% Wilmore	-7.147 ± 0.220	-8.046;-6.249	p < 0.001	0.46
% Carter-% Evans	1.444 ± 0.138	0.883;2.005	p < 0.001	2.55
% Carter-% Lean	-9.534 ± 0.264	-10.609;-8.458	p < 0.001	0.71
% Durmin-% Yuhasz	6.610 ± 0.303	5.375;7.846	p < 0.001	1.33
% Durmin-% Faulkner	4.487 ± 0.273	3.375;5.599	p < 0.001	0.88
% Durmin-% Carter	6.610 ± 0.303	5.375;7.846	p < 0.001	1.33
% Durmin-% Peterson	-5.408 ± 0.352	-6.843;-3.972	p < 0.001	1.13
% Durmin-% Katch	5.015 ± 0.532	2.847;7.185	p < 0.001	1.03
% Durmin-% Sloan	1.922 ± 0.317	0.631;3.213	p < 0.001	0.37
% Durmin-%Thorland	3.358 ± 0.281	2.213;4.504	p < 0.001	0.14
% Durmin-% Wilmore	-0.537 ± 0.450	-2.371;1.297	p = 1.000	1.67
% Durmin-% Evans	8.054 ± 0.382	6.498;9.610	p < 0.001	0.58
% Durmin-% Lean	-2.923 ± 0.288	-4.097;-1.750	p < 0.001	0.56
% Evans-% Lean	-10.978 ± 0.302	-12.209;-9.747	p < 0.001	1.29
% Faulkner-% Carter	2.124 ± 0.150	1.511;2.736	p < 0.001	0.62
%Faulkner-%Peterson	-9.894 ± 0.253	-10.927;-8.862	p < 0.001	2.88
% Faulkner-% Katch	0.529 ± 0.370	-0.979;2.038	p = 1.000	0.16
% Faulkner-% Sloan	-2.565 ± 0.250	-3.401;-1.728	p < 0.001	0.72
%Faulkner-%Thorland	-1.128 ± 0.336	-2.499;0.242	p = 0.476	1.73
%Faulkner-%Wilmore	-5.024 ± 0.254	-6.058;-3.989	p < 0.001	1.09
% Faulkner-% Evans	3.567 ± 0.239	2.594;4.541	p < 0.001	1.93
% Faulkner-% Lean	-7.410 ± 0.267	-8.499;-6.321	p < 0.001	0.24
% Katch-% Sloan	-3.094 ± 0.404	-4.743;-1.445	p < 0.001	0.95
% Katch-% Thorland	-1.658 ± 0.537	-3.847;0.532	p = 1.000	2.20
% Katch-% Wilmore	-5.553 ± 0.230	-6.490;-4.615	p < 0.001	1.04
% Katch-% Evans	3.038 ± 0.363	1.558;4.518	p < 0.001	2.22
% Katch-% Lean	-7.939 ± 0.424	-9.668;-6.211	p < 0.001	0.37
%Kerr-%Carter	6.107 ± 0.343	4.882;7.333	p < 0.001	1.33
%Kerr-%Durnin	-0.465 ± 0.396	-1.880;0.949	p = 1.000	0.10

Table 4. Cont.

Formulas	Mean Differences \pm Standard Error	95%CI (Lower; Upper)	p Value	Cohen's d
% Kerr-% Evans	7.325 \pm 0.436	5.769;8.881	$p < 0.001$	0.75
%Kerr-%Faulkner	3.933 \pm 0.392	2.534;5.332	$p < 0.001$	0.84
% Kerr-% Katch	4.331 \pm 0.554	2.352;6.309	$p < 0.001$	1.00
% Kerr-% Lean	-3.611 \pm 0.454	-5.233;-1.990	$p < 0.001$	0.49
%Kerr-% Peterson	-6.085 \pm 0.464	-7.743;-4.427	$p < 0.001$	1.35
% Kerr-% Sloan	1.247 \pm 0.415	-0.233;2.728	$p = 0.262$	0.28
%Kerr-%Thorland	2.601 \pm 0.440	1.028;4.173	$p < 0.001$	0.29
%Kerr-%Wilmore	-1.188 \pm 0.512	-3.016;0.640	$p = 1.000$	1.70
% Kerr-% Yuhasz	5.999 \pm 0.340	4.784;7.214	$p < 0.001$	1.33
% Peterson-% Katch	10.424 \pm 0.318	9.126;11.721	$p < 0.001$	3.34
% Peterson-% Sloan	7.330 \pm 0.190	6.553;8.106	$p < 0.001$	2.14
% Peterson-%Thorland	8.766 \pm 0.389	7.181;10.351	$p < 0.001$	1.78
%Peterson-%Wilmore	4.871 \pm 0.229	3.937;5.805	$p < 0.001$	4.31
% Peterson-% Evans	13.462 \pm 0.198	12.656;14.268	$p < 0.001$	0.67
% Peterson-% Lean	2.484 \pm 0.240	1.504;3.464	$p < 0.001$	1.92
% Sloan-% Thorland	1.436 \pm 0.315	0.152;2.721	$p = 0.010$	0.85
% Sloan-% Wilmore	-2.459 \pm 0.262	-3.527;-1.390	$p < 0.001$	1.88
% Sloan-% Evans	6.132 \pm 0.196	5.334;6.931	$p < 0.001$	1.26
% Sloan-% Lean	-4.845 \pm 0.236	-5.807;-3.883	$p < 0.001$	0.31
% Thorland-%Wilmore	-3.895 \pm 0.497	-5.920;-1.870	$p < 0.001$	3.40
% Thorland-% Evans	4.696 \pm 0.460	2.821;6.571	$p < 0.001$	0.74
% Thorland-% Lean	-6.282 \pm 0.327	-7.615;-4.948	$p < 0.001$	0.93
% Wilmore-% Evans	8.591 \pm 0.214	7.719;9.463	$p < 0.001$	3.07
% Wilmore-% Lean	-2.387 \pm 0.339	-3.770;-1.003	$p < 0.001$	1.06
%Yuhasz-%Faulkner	-2.124 \pm 0.150	-2.736;-1.511	$p < 0.001$	0.62
% Yuhasz-% Carter	0.000 \pm 0.000	0.000;0.000	$p < 0.001$	0.00
%Yuhasz-% Peterson	-12.018 \pm 0.191	-12.796;-11.240	$p < 0.001$	3.62
% Yuhasz-% Katch	-1.594 \pm 0.331	-2.942;-0.247	$p = 0.004$	0.51
% Yuhasz-% Sloan	-4.689 \pm 0.190	-5.463;-3.914	$p < 0.001$	1.36
%Yuhasz-% Thorland	-3.252 \pm 0.380	-4.802;-1.703	$p < 0.001$	2.59
%Yuhasz-% Wilmore	-7.147 \pm 0.220	-8.046;-6.249	$p < 0.001$	0.46
% Yuhasz-% Evans	1.444 \pm 0.138	0.883;2.005	$p < 0.001$	2.55
% Yuhasz-% Lean	-9.534 \pm 0.264	-10.609;-8.458	$p < 0.001$	0.71

NOTE: Displayed with a grey background when the pairwise comparison is sig.

3.2. Agreement and Concordance between Lipid Mass Estimation Formulas

Tables 5 and 6 show Lin's CCC between formulas. It can be observed that in the case of men, the Carter and Yuhasz formulas and the Civar and Faulkner formulas showed a moderate agreement with each other (CCC = 0.910–0.915). In the case of females, the Carter and Yuhasz formulas showed a moderate agreement with each other (CCC = 0.974). The rest of the formulas showed poor agreement. Table 7 presents the results corresponding to the Bland–Altman test for men and women, comparing the results found in the different formulas with those found with the Kerr formula after converting the result of the Kerr formula into lipid mass. Differences were observed between all formulas in males, and also in females, with the exception of the Kerr formula with the Durin formula ($p = 0.245$). For men, the Yuhasz, Carter, and Sloan formulas showed the highest lipid underestimation as compared to Kerr, while the Peterson, Hastuti, and Evans formulas showed an overestimation. In women, the Yuhasz, Carter, and Evans formulas were underestimated relative to Kerr, while the Peterson and Lean formulas showed an overestimation.

Table 5. Lin’s concordance correlation coefficient between the different formulas in men.

Variable	Lin’s Concordance Correlation Coefficient			
	CCC	ρ	Cb	
% Civar	% Carter	0.496	0.916	0.541
	% Durnin	0.700	0.838	0.836
	% Evans	0.318	0.932	0.341
	% Faulkner	0.915	0.919	0.996
	% Hastuti	0.287	0.930	0.308
	% Katch	0.801	0.966	0.830
	% Kerr	0.467	0.843	0.554
	% Lean	0.607	0.843	0.720
	% Peterson	0.467	0.843	0.554
	% Reilly	0.850	0.932	0.911
	% Sloan	0.558	0.823	0.678
	% Wilmore	0.753	0.912	0.826
% Yuhasz	0.440	0.958	0.459	
% Carter	% Durnin	0.532	0.907	0.586
	% Evans	0.159	0.917	0.173
	% Faulkner	0.626	0.979	0.639
	% Hastuti	0.140	0.892	0.157
	% Katch	0.774	0.915	0.846
	% Kerr	0.271	0.850	0.319
	% Lean	0.323	0.778	0.415
	% Peterson	0.163	0.883	0.184
	% Reilly	0.607	0.916	0.662
	% Sloan	0.839	0.892	0.941
	% Wilmore	0.328	0.842	0.389
	% Yuhasz	0.910	0.935	0.973
% Durnin	% Evans	0.417	0.768	0.542
	% Faulkner	0.819	0.924	0.886
	% Hastuti	0.451	0.909	0.496
	% Katch	0.652	0.862	0.757
	% Kerr	0.579	0.695	0.833
	% Lean	0.856	0.894	0.958
	% Peterson	0.466	0.865	0.539
	% Reilly	0.535	0.767	0.698
	% Sloan	0.520	0.744	0.698
	% Wilmore	0.662	0.722	0.918
	% Yuhasz	0.355	0.816	0.435
	% Evans	% Faulkner	0.311	0.864
% Hastuti		0.875	0.880	0.994
% Katch		0.249	0.940	0.265
% Kerr		0.788	0.952	0.828
% Lean		0.552	0.807	0.684
% Peterson		0.824	0.910	0.905
% Reilly		0.240	0.993	0.242
% Sloan		0.228	0.932	0.245
% Wilmore		0.553	0.954	0.580
% Yuhasz		0.136	0.984	0.138
% Faulkner	% Hastuti	0.295	0.904	0.326
	% Katch	0.800	0.935	0.855
	% Kerr	0.450	0.767	0.587
	% Lean	0.597	0.790	0.756
	% Peterson	0.289	0.847	0.341
	% Reilly	0.772	0.850	0.908
	% Sloan	0.228	0.932	0.245
	% Wilmore	0.713	0.846	0.844
% Yuhasz	0.434	0.901	0.482	

Table 5. Cont.

Variable	Lin's Concordance Correlation Coefficient			
	CCC	ρ	Cb	
% Hastuti	% Katch	0.229	0.952	0.240
	% Kerr	0.632	0.808	0.782
	% Lean	0.607	0.959	0.633
	% Peterson	0.864	0.959	0.901
	% Reilly	0.193	0.881	0.219
	% Sloan	0.187	0.840	0.222
	% Wilmore	0.454	0.855	0.531
	% Yuhasz	0.116	0.927	0.125
% Katch	% Kerr	0.401	0.858	0.468
	% Lean	0.540	0.884	0.611
	% Peterson	0.247	0.918	0.269
	% Reilly	0.856	0.932	0.918
	% Sloan	0.786	0.836	0.940
	% Wilmore	0.582	0.944	0.616
% Kerr	% Yuhasz	0.730	0.967	0.756
	% Lean	0.695	0.736	0.944
	% Peterson	0.632	0.941	0.671
	% Reilly	0.399	0.957	0.417
	% Sloan	0.407	0.922	0.442
	% Wilmore	0.718	0.893	0.804
% Lean	% Yuhasz	0.240	0.938	0.255
	% Peterson	0.632	0.941	0.671
	% Reilly	0.454	0.809	0.561
	% Sloan	0.435	0.771	0.564
	% Wilmore	0.731	0.791	0.924
% Peterson	% Yuhasz	0.283	0.843	0.336
	% Reilly	0.215	0.915	0.235
	% Sloan	0.234	0.903	0.260
	% Wilmore	0.437	0.841	0.520
% Reilly	% Yuhasz	0.136	0.927	0.146
	% Sloan	0.711	0.935	0.760
	% Wilmore	0.583	0.931	0.626
% Sloan	% Yuhasz	0.580	0.986	0.588
	% Wilmore	0.434	0.826	0.526
% Wilmore	% Yuhasz	0.785	0.924	0.850
% Wilmore	% Yuhasz	0.301	0.948	0.318

Table 6. Lin's concordance correlation coefficient between the different formulas in women.

Variable	Lin's Concordance Correlation Coefficient			
	CCC	ρ	Cb	
% Carter	% Durnin	0.460	0.958	0.480
	% Evans	0.808	0.888	0.910
	% Faulkner	0.823	0.959	0.858
	% Katch	0.578	0.677	0.854
	% Kerr	0.443	0.922	0.480
	% Lean	0.198	0.851	0.233
	% Peterson	0.120	0.886	0.136
	% Sloan	0.453	0.886	0.511
	% Thorland	0.610	0.866	0.704
	% Wilmore	0.185	0.910	0.203
	% Yuhasz	0.974	0.974	1.000

Table 6. Cont.

Variable	Lin's Concordance Correlation Coefficient			
	CCC	ρ	Cb	
% Durmin	% Evans	0.257	0.834	0.308
	% Faulkner	0.645	0.963	0.669
	% Katch	0.324	0.625	0.519
	% Kerr	0.847	0.850	0.996
	% Lean	0.707	0.891	0.793
	% Peterson	0.438	0.881	0.498
	% Sloan	0.768	0.892	0.860
	% Thorland	0.762	0.886	0.860
	% Wilmore	0.594	0.905	0.656
% Yuhasz	0.419	0.932	0.450	
% Evans	% Faulkner	0.521	0.830	0.628
	% Katch	0.372	0.576	0.647
	% Kerr	0.293	0.875	0.335
	% Lean	0.133	0.832	0.160
	% Peterson	0.081	0.860	0.094
	% Sloan	0.313	0.903	0.346
	% Thorland	0.433	0.844	0.513
	% Wilmore	0.114	0.846	0.135
% Yuhasz	0.806	0.897	0.899	
% Faulkner	% Katch	0.636	0.657	0.969
	% Kerr	0.587	0.864	0.680
	% Lean	0.298	0.867	0.344
	% Peterson	0.166	0.853	0.194
	% Sloan	0.700	0.898	0.780
	% Thorland	0.812	0.917	0.885
	% Wilmore	0.309	0.915	0.337
	% Yuhasz	0.808	0.944	0.856
% Katch	% Kerr	0.370	0.661	0.559
	% Lean	0.180	0.664	0.271
	% Peterson	0.111	0.732	0.152
	% Sloan	0.406	0.602	0.675
	% Thorland	0.568	0.739	0.768
	% Wilmore	0.226	0.828	0.273
	% Yuhasz	0.613	0.707	0.868
% Kerr	% Lean	0.587	0.783	0.750
	% Peterson	0.367	0.790	0.464
	% Sloan	0.746	0.845	0.884
	% Thorland	0.738	0.823	0.897
	% Wilmore	0.546	0.864	0.631
	% Yuhasz	0.451	0.927	0.487
% Lean	% Peterson	0.731	0.911	0.802
	% Sloan	0.497	0.910	0.546
	% Thorland	0.484	0.919	0.527
	% Wilmore	0.546	0.884	0.618
	% Yuhasz	0.208	0.880	0.236
% Peterson	% Sloan	0.278	0.919	0.303
	% Thorland	0.286	0.911	0.313
	% Wilmore	0.311	0.906	0.343
	% Yuhasz	0.126	0.916	0.137

Table 6. Cont.

Variable		Lin's Concordance Correlation Coefficient		
		CCC	ρ	Cb
% Sloan	% Thorland	0.839	0.965	0.870
	% Wilmore	0.571	0.900	0.634
	% Yuhasz	0.126	0.916	0.137
% Thorland	% Wilmore	0.433	0.951	0.456
	% Yuhasz	0.642	0.903	0.711
% Wilmore	% Yuhasz	0.191	0.920	0.207

Table 7. Inter-formula comparison for lipid percentage estimation in men and women.

Equation	Variable (Mean \pm SD)	Pearson's r (p)	Kerr—Equation				p
			Mean Diff	95% CI	95% Limits of Agreement		
					Lower Limit	Upper Limit	
Men							
Durnin	2.862 \pm 0.601	0.695	2.86	1.64 to 4.08	-4.30	10.03	0.000
Yuhasz	7.162 \pm 0.492	0.938	7.16	6.16 to 8.16	1.29	13.03	0.000
Faulkner	3.731 \pm 0.542	0.767	3.73	2.63 to 4.83	-2.73	10.19	0.000
Carter	7.002 \pm 0.491	0.850	7.00	6.01 to 8.00	1.15	12.86	0.000
Peterson	-2.717 \pm 0.439	0.838	-2.72	-3.61 to -1.83	-7.95	2.52	0.000
Hastuti	-1.875 \pm 0.507	0.808	-1.88	-2.90 to -0.85	-7.92	4.17	0.001
Katch	5.359 \pm 0.459	0.858	5.36	4.43 to 6.29	-0.11	10.83	0.000
Sloan	6.368 \pm 0.351	0.922	6.37	5.66 to 7.08	2.19	10.55	0.000
Wilmore	2.013 \pm 0.418	0.892	2.01	1.17 to 2.86	-2.97	7.00	0.000
Evans	-1.625 \pm 0.363	0.952	-1.62	-2.36 to -0.89	-5.95	2.70	0.000
Reilly	4.658 \pm 0.473	0.957	4.66	3.70 to 5.62	-0.99	10.30	0.000
Civar	3.697 \pm 0.508	0.843	3.70	2.67 to 4.73	-2.35	9.75	0.000
Lean	1.563 \pm 0.566	0.736	1.56	0.41 to 2.71	-5.19	8.32	0.009
Women							
Carter	6.107 \pm 0.343	0.922	6.11	5.42 to 6.80	1.12	11.10	0.000
Durnin	-0.465 \pm 0.396	0.850	-0.47	-1.26 to 0.33	-6.22	5.29	0.245
Evans	7.325 \pm 0.436	0.875	7.33	6.45 to 8.20	0.99	13.66	0.000
Faulkner	3.933 \pm 0.392	0.864	3.93	3.15 to 4.72	-1.76	9.63	0.000
Katch	4.331 \pm 0.554	0.661	4.33	3.22 to 5.44	-3.72	12.39	0.000
Lean	-3.611 \pm 0.454	0.783	-3.61	-4.52 to -2.70	-10.21	2.99	0.000
Peterson	-6.085 \pm 0.464	0.790	-6.08	-7.02 to -5.15	-12.83	0.67	0.000
Sloan	1.247 \pm 0.415	0.845	1.25	0.42 to 2.08	-4.78	7.27	0.004
Thorland	2.601 \pm 0.440	0.823	2.60	1.72 to 3.48	-3.80	9.00	0.000
Wilmore	-1.188 \pm 0.512	0.864	-1.19	-2.21 to -0.16	-8.63	6.25	0.024
Yuhasz	5.999 \pm 0.340	0.927	6.00	5.32 to 6.68	1.05	10.94	0.000

Percentile relationships between BMI, skinfold sum, and adiposity formulas in men and women, respectively, can be found in Tables 8 and 9.

Table 8. Percentile relationships between BMI, skinfold sum, and adiposity formulas in men.

Percentile	BMI (kg/m ²)	∑8 Skin-folds (mm)	∑6 Skin-folds (mm)	∑4 Skin-folds (mm)	% Kerr	% Durnin	% Yuhasz	% Faulkner	% Carter	% Peterson	% Katch	% Sloan	% Wilmore	% Evans	% Lean	% Reilly	% Civar	% Hastuti
10	21.04	51.90	41.65	23.3	19.59	8.47	6.96	9.88	6.95	13.79	7.56	6.39	10.68	14.42	8.88	9.12	9.94	14.94
20	21.43	56.91	44.19	25.15	21.20	9.07	7.22	10.44	7.22	14.83	8.41	7.16	11.12	15.16	9.93	9.72	10.36	15.35
30	22.59	61.10	47.10	28.00	22.27	10.73	7.53	10.77	7.53	16.18	8.77	7.71	11.94	15.90	11.11	9.94	10.54	15.97
40	23.10	64.40	50.10	29.85	22.64	11.19	7.85	10.95	7.84	16.95	9.33	8.30	12.95	16.16	12.78	10.19	10.94	16.90
50	23.21	69.50	53.50	33.25	23.67	12.32	8.20	11.48	8.20	18.00	9.81	8.85	13.27	16.88	14.37	10.85	11.32	17.33
60	23.54	77.50	59.59	35.85	24.57	13.26	8.84	11.87	8.84	18.86	10.26	9.24	14.23	17.77	14.64	11.37	12.37	17.75
70	23.97	83.46	63.55	39.92	25.53	15.00	9.26	13.03	9.25	20.41	11.88	9.69	15.04	18.79	16.76	11.79	13.22	19.04
80	24.34	92.55	71.75	42.29	28.62	16.96	10.12	13.40	10.12	22.06	12.71	11.61	16.58	19.74	19.65	13.18	14.05	20.05
90	24.62	135.33	100.66	58.42	32.39	18.42	13.16	15.57	13.15	25.68	15.30	15.49	18.55	22.54	21.56	14.93	16.97	22.98

BMI: body mass index; %: percentage of fat mass.

Table 9. Percentile relationships between BMI, skinfold sum, and adiposity formulas in women.

Percentile	BMI (kg/m ²)	∑8 Skin-folds (mm)	∑6 Skin-folds (mm)	∑4 Skin-folds (mm)	% Kerr	% Durnin	% Yuhasz	% Faulkner	% Carter	% Peterson	% Katch	% Sloan	% Wilmore	% Evans	% Lean	% Thorland
10	20.13	70.37	57.87	28.50	24.64	15.68	12.53	14.76	12.53	23.93	14.60	16.75	21.08	11.16	20.46	13.15
20	20.73	77.75	63.00	32.25	27.32	18.68	13.33	15.46	13.33	25.27	15.56	17.88	21.99	12.51	22.10	13.74
30	21.33	89.62	72.62	36.12	28.76	20.20	14.82	16.68	14.82	27.14	16.64	19.18	22.35	13.62	24.67	16.06
40	21.71	98.00	79.50	42.00	29.74	22.76	15.88	17.88	15.88	28.03	17.29	20.12	23.65	15.08	25.89	17.89
50	22.02	111.05	89.25	47.75	32.31	23.44	17.39	18.49	17.39	29.20	18.31	21.87	23.75	15.84	26.79	20.76
60	22.29	115.75	92.00	52.30	33.65	24.93	17.82	19.61	17.82	30.27	19.39	22.40	24.48	16.70	27.93	21.93
70	22.96	123.37	95.37	53.62	34.37	26.29	18.34	20.54	18.34	31.26	20.14	23.44	25.32	17.04	28.88	22.96
80	23.58	128.50	102.70	57.50	35.68	27.80	19.47	21.90	19.47	32.05	20.59	24.45	25.82	17.49	29.29	25.09
90	24.36	140.25	113.87	65.32	36.91	29.66	21.20	23.55	21.20	32.95	21.83	26.55	26.33	18.34	30.82	26.52

BMI: body mass index; %: percentage of fat mass.

4. Discussion

The main objective of the present investigation was to analyze the differences and agreement between the most commonly used formulas for lipid estimation between themselves and in comparison with Kerr's adiposity formula, once its lipid content was estimated, and to compare the results reported by the different formulas with those found with Kerr's formula. This is important because the present research is the first to take into consideration that, while most anthropometric equations estimate lipid mass by addressing body composition from a molecular fractionation point of view, the only exception is the Kerr formula, which seeks to estimate adipose mass from the tissular model. As the estimation of these formulae is not comparable, the lipid content of the Kerr formula was calculated from the Martin's formula [49], formulated by linear regression on cadavers and therefore with a very high validation power.

The results indicated that there were significant differences between most of the formulas, ranging from $8.90 \pm 2.17\%$ to $17.91 \pm 2.84\%$ for men, and from $15.33 \pm 2.94\%$ to $28.79 \pm 3.30\%$ for women. In the same vein, most of the formulas showed poor concordance ($CCC < 0.900$). In fact, the Bland-Altman test also showed differences in the results reported in most equations with respect to Kerr's formula. These results agree with those found in the literature, supporting the idea that there are differences when using different skinfold-based equations for lipid mass estimation in active adults [5]. These differences could be due to the heterogeneity of the samples with which the equations were validated (Table 1), as very different inclusion and exclusion criteria were used in the design [19–33].

Another possible reason is that all formulas, with the exception of Kerr, performed a linear regression analysis to estimate lipid percentage from anthropometry [21,23,24,26,27,31]. This is the estimation of the body density from the skinfolds included a process carried out by regression considering the skinfolds and the density given in the validation sample of each formula [9]. From this density value, the lipid mass present is estimated. This statistical strategy makes each formula specific to the study population included. The formulas only consider lipid levels and bodies similar to those included during their validation [9]. This could explain why the Yuhasz and Carter formulas, validated on elite athletes, showed the lowest mean values in this research [21,23].

Moreover, the method of validation of these formulas was not uniform, which could affect the equations reported by the different formulas (Table 1). In this regard, while Kerr's formula was validated by dissection of cadavers [19], most of the others used an indirect method such as hydrodensitometry for their validation [20–22,25–27]. Hydrodensitometry is an indirect method for estimating body composition that has several limitations, such as not being validated on cadavers [9]. Another of its limitations is that, as different densities are involved in the lipid estimation by this method, the estimation is influenced by the total body water. Thus, we find contaminating factors for the estimation of body composition by hydrodensitometry factors, such as renal and hepatic pathologies, but also diet, exercise, or the consumption of certain supplements such as creatine [6,7]. In turn, hydrodensitometry requires the assignment of constant values for fat mass (0.900 g/cm^3) and fat-free mass (1.100 g/cm^3) [6,7]. However, cadaveric studies have shown that fat-free mass density varies widely between subjects, as it encompasses a wide variety of tissues with very different characteristics [51]. These limitations were evident in previous studies, where American football players were analyzed by hydrodensitometry, and some of them, being very lean and African-American, yielded negative body lipid values [9]. Taking into account the importance of the selection of the validation method for the reliability of the formula, and the problems presented by hydrodensitometry as a method for estimating body composition [6,7], this could be one of the main reasons for the differences found between the different formulas. Regarding the validation of the formula, the case of Peterson's formula is curious, as it was validated on the basis of the results from Durnin's anthropometric formula [24], thus being a dual indirect method of estimating body composition. There are only three formulas included in the study that were validated with DXA [28,32]. Although DXA has been scientifically considered the gold standard method

3. Pletcher, E.R.; Lovalekar, M.; Coleman, L.C.; Beals, K.; Nindl, B.C.; Allison, K.F. Decreased Percent Body Fat but Not Body Mass is Associated with Better Performance on Combat Fitness Test in Male and Female Marines. *J. Strength Cond. Res.* **2022**, *24*, Online ahead of print. [\[CrossRef\]](#)
4. Doran, D.A.; Mc Geever, S.; Collins, K.D.; Quinn, C.; McElhone, R.; Scott, M. The Validity of Commonly Used Adipose Tissue Body Composition Equations Relative to Dual Energy X-ray Absorptiometry (DXA) in Gaelic Games Players. *Int. J. Sports Med.* **2014**, *35*, 95–100. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Vaquero-Cristóbal, R.; Albaladejo-Saura, M.; Luna-Badachi, A.E.; Esparza-Ros, F. Differences in Fat Mass Estimation Formulas in Physically Active Adult Population and Relationship with Sums of Skinfolds. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 7777. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Kasper, A.M.; Langan-Evans, C.; Hudson, J.F.; Brownlee, T.E.; Harper, L.D.; Naughton, R.J.; Morton, J.P.; Close, G.L. Come Back Skinfolds, All Is Forgiven: A Narrative Review of the Efficacy of Common Body Composition Methods in Applied Sports Practice. *Nutrients* **2021**, *13*, 1075. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Campa, F.; Toselli, S.; Mazzilli, M.; Gobbo, L.A.; Coratella, G. Assessment of Body Composition in Athletes: A Narrative Review of Available Methods with Special Reference to Quantitative and Qualitative Bioimpedance Analysis. *Nutrients* **2021**, *13*, 1620. [\[CrossRef\]](#)
8. Esparza-Ros, F.; Moreira, A.C.; Vaquero-Cristóbal, R.; Barrigas, C.; Albaladejo-Saura, M.; Vieira, F. Differences between Four Skinfold Calipers in the Assessment of Adipose Tissue in Young Adult Healthy Population. *Nutrients* **2022**, *14*, 2085. [\[CrossRef\]](#)
9. Holway, F.; Boulosa, M.; Peniche, Z. Composición Corporal En Nutrición Deportiva. In *Nutrición Aplicada al Deporte*; Boulosa, M.B., Peniche, Z.C., Eds.; McGraw Hill: Madrid, Spain, 2011; pp. 195–218, ISBN 9786071505705.
10. Moreira, O.C.; Alonso-Aubin, D.A.; de Oliveira, C.E.P.; Candia-Luján, R.; De Paz, J.A. Métodos de Evaluación de La Composición Corporal: Una Revisión Actualizada de Descripción, Aplicación, Ventajas y Desventajas. *Arch. Med. Deport.* **2015**, *32*, 387–394.
11. Duren, D.L.; Sherwood, R.J.; Czerwinski, S.A.; Lee, M.; Choh, A.C.; Siervogel, R.M.; Chumlea, W.C. Body Composition Methods: Comparisons and Interpretation. *J. Diabetes Sci. Technol.* **2008**, *2*, 1139–1146. [\[CrossRef\]](#)
12. Silva, A.M.; Heymsfield, S.B.; Sardinha, L.B. Assessing body composition in taller or broader individuals using dual-energy X-ray absorptiometry: A systematic review. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2013**, *67*, 1012–1021. [\[CrossRef\]](#)
13. Khalil, S.F.; Mohhtar, M.S.; Ibrahim, F. The Theory and Fundamentals of Bioimpedance Analysis in Clinical Status Monitoring and Diagnosis of Diseases. *Sensors* **2014**, *14*, 10895–10928. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Nickerson, B.S.; Snarr, R.L.; Ryan, G.A. Validity of Foot-To-Foot Bioelectrical Impedance for Estimating Body Composition in NCAA Division I Male Athletes: A 3-Compartment Model Comparison. *J. Strength Cond. Res.* **2019**, *33*, 3361–3366. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Tinsley, G.M.; Morales, E.; Fosse, J.S.; Grandjean, P.W. Impact of Acute Dietary Manipulations on DXA and BIA Body Composition Estimates. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2017**, *49*, 823–832. [\[CrossRef\]](#)
16. Coppini, L.Z.; Waitzberg, D.L.; Campos, A.C.L. Limitations and validation of bioelectrical impedance analysis in morbidly obese patients. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* **2005**, *8*, 329–332. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Alvero Cruz, J.R.; Cabañas Armesilla, M.D.; Herrero deLucas, A.; Martínez Riaza, L.; Moreno Pascual, C.; Porta Manzanido, J.; Sillero Quintana, M.; Sirvent Belando, J.E. Protocolo de Valoración de La Composición Corporal Para El Reconocimiento Médico-Deportivo. Documento de Consenso Del Grupo Español de Cineantropometría de La Federación Española de Medicina Del Deporte. *Arch. Med. Deporte* **2009**, *26*, 166–179.
18. Kerr, A.; Slater, G.J.; Byrne, N. Impact of food and fluid intake on technical and biological measurement error in body composition assessment methods in athletes. *Br. J. Nutr.* **2017**, *117*, 591–601. [\[CrossRef\]](#)
19. Ross, W.D.; Kerr, D.A. Fraccionamiento de La Masa Corporal: Un Nuevo Método Para Utilizar En Nutrición Clínica y Medicina Deportiva. *Apunts* **1991**, *18*, 175–187.
20. Durnin, J.V.G.A.; Womersley, J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: Measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 Years. *Br. J. Nutr.* **1974**, *32*, 77–97. [\[CrossRef\]](#)
21. Yuhasz, M. *Physical Fitness Manual*; University of Western Ontario: London, ON, Canada, 1974.
22. Faulkner, J.A. Physiology of Swimming. *Res. Q. Am. Assoc. Health Phys. Educ. Recreat.* **1966**, *37*, 41–54. [\[CrossRef\]](#)
23. Carter, J.E.L. *Physical Structure of Olympic Athletes: Part I: The Montreal Olympic Games Anthropological Project*; S Karger Ag: Basel, Switzerland, 1982.
24. Peterson, M.J.; Czerwinski, S.A.; Siervogel, R.M. Development and validation of skinfold-thickness prediction equations with a 4-compartment model. *Am. J. Clin. Nutr.* **2003**, *77*, 1186–1191. [\[CrossRef\]](#)
25. Katch, F.I.; McArdle, W.D. Validity of body composition prediction equations for college men and women. *Am. J. Clin. Nutr.* **1975**, *28*, 105–109. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Sloan, A.W. Estimation of body fat in young men. *J. Appl. Physiol.* **1967**, *23*, 311–315. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Wilmore, J.H.; Behnke, A.R. An anthropometric estimation of body density and lean body weight in young men. *J. Appl. Physiol.* **1969**, *27*, 25–31. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Evans, E.M.; Rowe, D.A.; Mistic, M.M.; Prior, B.M.; Arngrimsson, S. Skinfold Prediction Equation for Athletes Developed Using a Four-Component Model. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2005**, *37*, 2006–2011. [\[CrossRef\]](#)
29. Lean, M.E.; Han, T.S.; Deurenberg, P. Predicting body composition by densitometry from simple anthropometric measurements. *Am. J. Clin. Nutr.* **1996**, *63*, 4–14. [\[CrossRef\]](#)

30. Thorland, W.G.; Johnson, G.O.; Tharp, G.D.; Housh, T.J.; Cisar, C.J. Estimation of body density in adolescent athletes. *Hum. Biol.* **1984**, *56*, 439–448.
31. Civar, S.; Aktop, A.; Tercan, E.; Ozdol, Y.; Ozer, K. Validity of Leg-to-Leg Bioelectrical Impedance Measurement in Highly Active Women. *J. Strength Cond. Res.* **2006**, *20*, 359–365. [[CrossRef](#)]
32. Reilly, T.; George, K.; Marfell-Jones, M.; Scott, M.; Sutton, L.; Wallace, J. How Well do Skinfold Equations Predict Percent Body Fat in Elite Soccer Players? *Int. J. Sports Med.* **2009**, *30*, 607–613. [[CrossRef](#)]
33. Hastuti, J.; Kagawa, M.; Byrne, N.M.; Hills, A.P. Development and validation of anthropometric prediction equations for estimation of body fat in Indonesian men. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* **2013**, *22*, 522–529. [[CrossRef](#)]
34. Sansone, P.; Makivic, B.; Csapo, R.; Hume, P.; Martínez-Rodríguez, A.; Bauer, P. Body Fat of Basketball Players: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med. Open* **2022**, *8*, 26. [[CrossRef](#)]
35. Petri, C.; Campa, F.; Teixeira, V.H.; Izzicupo, P.; Galanti, G.; Pizzi, A.; Badicu, G.; Mascherini, G. Body Fat Assessment in International Elite Soccer Referees. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* **2020**, *5*, 38. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. López-Taylor, J.R.; González-Mendoza, R.G.; Gaytan-Gonzalez, A.; Jiménez-Alvarado, J.A.; Villegas-Balcazar, M.; Jáuregui-Ulloa, E.E.; Torres-Naranjo, F. Accuracy of Anthropometric Equations for Estimating Body Fat in Professional Male Soccer Players Compared with DXA. *J. Sports Med.* **2018**, *2018*, 1–7. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Wang, Z.-M.; Ma, R.; Pierson, R.N.; Heymsfield, S.B. Five-Level Model: Reconstruction of Body Weight at Atomic, Molecular, Cellular, and Tissue-System Levels from Neutron Activation Analysis. In *Human Body Composition*; Ellis, K.J., Eastman, J.D., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 1993; Volume 60, pp. 125–128. [[CrossRef](#)]
38. Martin, A.D.; Ross, W.D.; Drinkwater, D.T.; Clarys, J.P. Prediction of body fat by skinfold caliper: Assumptions and cadaver evidence. *Int. J. Obes.* **1985**, *9*, 31–39.
39. Karastergiou, K.; Smith, S.R.; Greenberg, A.S.; Fried, S.K. Sex differences in human adipose tissues—the biology of pear shape. *Biol. Sex Differ.* **2012**, *3*, 13. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Almecija, A.M.; García, J.M.; Acosta, A.P. *Tamaño de Muestra y Precisión Estadística*; Universidad de Almería: Almería, Spain, 2004; Volume 23.
41. Vaquero-Cristóbal, R.; Alacid, F.; Esparza-Ros, F.; López-Plaza, D.; Muyor, J.M.; López-Miñarro, P.A. The effects of a reformer Pilates program on body composition and morphological characteristics in active women after a detraining period. *Women Health* **2016**, *56*, 784–806. [[CrossRef](#)]
42. Vaquero-Cristóbal, R.; García-Roca, J.A.; Albaladejo, M.; Fernández-Alarcón, M.; Esparza-Ros, F. Evolution in anthropometric variables related to training and nutritional parameters in ultra-endurance mountain runners. *Nutr. Hosp.* **2019**, *36*, 706–713. [[CrossRef](#)]
43. Roman-Viñas, B.; Serra-Majem, L.; Hagstromer, M.; Ribas-Barba, L.; Sjöström, M.; Segura-Cardona, R. International Physical Activity Questionnaire: Reliability and validity in a Spanish population. *Eur. J. Sport Sci.* **2010**, *10*, 297–304. [[CrossRef](#)]
44. Craig, C.L.; Marshall, A.L.; Sjöström, M.; Bauman, A.E.; Booth, M.L.; Ainsworth, B.E.; Pratt, M.; Ekelund, U.L.; Yngve, A.; Sallis, J.F.; et al. International Physical Activity Questionnaire: 12-Country Reliability and Validity. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2003**, *35*, 1381–1395. [[CrossRef](#)]
45. Crespo-Salgado, J.J.; Delgado-Martín, J.L.; Blanco-Iglesias, O.; Aldecoa-Landesa, S. Guía básica de detección del sedentarismo y recomendaciones de actividad física en atención primaria. *Aten. Prim.* **2014**, *47*, 175–183. [[CrossRef](#)]
46. Esparza-Ros, F.; Vaquero-Cristóbal, R.; Marfell-Jones, M. *International Standards for Anthropometric Assessment*; UCAM Universidad Católica de Murcia, Ed.; International Society for the Advancement of Kinanthropometry: Murcia, Spain, 2019.
47. Martin, A.D.; Daniel, M.Z.; Drinkwater, D.T.; Clarys, J.P. Adipose tissue density, estimated adipose lipid fraction and whole body adiposity in male cadavers. *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.* **1994**, *18*, 79–83. [[CrossRef](#)]
48. McBride, G. *Statistical Calculators*; NIWA: Auckland, New Zealand, 2007.
49. Coratella, G.; Campa, F.; Matias, C.N.; Toselli, S.; Koury, J.C.; Andreoli, A.; Sardinha, L.B.; Silva, A.M. Generalized bioelectric impedance-based equations underestimate body fluids in athletes. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2021**, *31*, 2123–2132. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
50. Marcos-Pardo, P.J.; González-Gálvez, N.; López-Vivancos, A.; Espeso-García, A.; Manuel Martínez-Aranda, L.; María Gea-García, G.; Orquín-Castrillón, F.J.; Carbonell-Baeza, A.; Daniel Jiménez-García, J.; Velázquez-Díaz, D.; et al. Sarcopenia, Diet, Physical Activity and Obesity in European Middle-Aged and Older Adults: The LifeAge Study. *Nutrients* **2020**, *13*, 8. [[CrossRef](#)]
51. Wang, Z.; Heshka, S.; Wang, J.; Wielopolski, L.; Heymsfield, S.B. Magnitude and Variation of Fat-Free Mass Density: A Cellular-Level Body Composition Modeling Study. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **2003**, *284*, E267–E273. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Mohammad, A.; De Lucia Rolfe, E.; Sleight, A.; Kivisild, T.; Behbehani, K.; Wareham, N.J.; Brage, S.; Mohammad, T. Validity of visceral adiposity estimates from DXA against MRI in Kuwaiti men and women. *Nutr. Diabetes* **2017**, *7*, e238. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Zamora Salas, J.D.; Murray Laclé, A. Evaluación Antropométrica y Composición Corporal Por medio de Óxido de Deuterio En Escolares Costarricenses. *Arch. Latinoam. Nutr.* **2018**, *68*, 313–320. Available online: <http://www.alanrevista.org/ediciones/2018/4/art-4/> (accessed on 17 August 2022).
54. Clarys, J.P.; Martin, A.D.; Drinkwater, D.T.; Marfell-Jones, M.J. The skinfold: Myth and reality. *J. Sports Sci.* **1987**, *5*, 3–33. [[CrossRef](#)]

55. Aldosky, H.Y.Y.; Yildiz, A.; Hussein, H.A. Regional body fat distribution assessment by bioelectrical impedance analysis and its correlation with anthropometric indices. *Phys. Med.* **2018**, *5*, 15–19. [[CrossRef](#)]
56. Owen, O.E.; Smalley, K.J.; D'alessio, D.A.; Mozzoli, M.A.; Knerr, A.N.; Kendrick, Z.V.; Kavle, E.C.; Donohoe, M.; Tappy, L.; Boden, G. Resting Metabolic Rate and Body Composition of Achondroplastic Dwarfs. *Medicine* **1990**, *69*, 56–67. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
57. Ross, W.D.; Wilson, N.C. A stratagem for proportional growth assessment. *Acta Paediatr. Belg.* **1974**, *28*, 169–182.
58. Weiner, J.; Lourie, J. *Human Biology, A Guide to Field Methods*; Blackwell Scientific: Oxford, UK, 1969; p. 621.
59. Olson, A.L.; Edelstein, E. Spot Reduction of Subcutaneous Adipose Tissue. *Res. Q. Am. Assoc. Health Phys. Educ. Recreat.* **1968**, *39*, 647–652. [[CrossRef](#)]
60. Di Palumbo, A.S.; Guerra, E.; Orlandi, C.; Bazzucchi, I.; Sacchetti, M. Effect of combined resistance and endurance exercise training on regional fat loss. *J. Sports Med. Phys. Fit.* **2017**, *57*, 794–801. [[CrossRef](#)]
61. Norton, K.I. Standards for Anthropometry Assessment. In *Kinanthropometry and Exercise Physiology*; Routledge: Oxfordshire, UK, 2018; pp. 68–137, ISBN 9781315385662.

Artículo 2

Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N and Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front. Nutr.* 2024; 11:1421950. doi: 10.3389/fnut.2024.1421950



OPEN ACCESS

EDITED BY
Roberto Cannataro,
University of Calabria, ItalyREVIEWED BY
Francesco Campa,
University of Padua, Italy
Kyle David Flack,
University of Kentucky, United States*CORRESPONDENCE
Mario Albaladejo-Saura
✉ mdalaladejosaura@ucam.edu
Raquel Vaquero-Cristóbal
✉ raquel.vaquero@um.esRECEIVED 23 April 2024
ACCEPTED 24 May 2024
PUBLISHED 11 June 2024CITATION
Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M,
Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N and
Esparza-Ros F (2024) Validity and agreement
between dual-energy X-ray absorptiometry,
anthropometry and bioelectrical impedance
in the estimation of fat mass in young adults.
Front. Nutr. 11:1421950.
doi: 10.3389/fnut.2024.1421950COPYRIGHT
© 2024 Mecherques-Carini, Albaladejo-Saura,
Vaquero-Cristóbal, Baglietto and
Esparza-Ros. This is an open-access article
distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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.

Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults

Malek Mecherques-Carini¹, Mario Albaladejo-Saura^{2*},
Raquel Vaquero-Cristóbal^{2*}, Nicolás Baglietto¹ and
Francisco Esparza-Ros¹¹International Kinanthropometry Chair, UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia, Murcia, Spain, ²Department of Physical Activity and Sport Sciences, Faculty of Sport Sciences, University of Murcia, San Javier, Spain**Introduction:** Assessment of fat mass has historically employed various methods like Dual-energy X-ray Absorptiometry (DXA), and bioelectrical impedance (BIA), and anthropometry with its set of formulas. However, doubts persist regarding their validity and interchangeability to evaluate fat mass. This research aimed to determine the validity of anthropometry, and BIA in estimating fat mass Vs DXA, considering the influence of sex and hydration status.**Methods:** A descriptive, cross-sectional study included 265 young adults (161 males and 104 females), assessed through DXA, BIA in a standing position, and anthropometry. A fat mass estimation formula with DXA, a fat mass estimation formula with BIA and 10 fat mass estimation formulas with anthropometry were calculated.**Results:** Significant differences were found across DXA, BIA and anthropometry in both kilograms and percentages for the overall sample ($p < 0.001$), and when the covariable sex was included ($p < 0.001$), with no significant effect of hydration status ($p = 0.332 - 0.527$). Bonferroni-adjusted analyses revealed significant differences from DXA with anthropometry and BIA in most cases for the overall sample ($p < 0.001$), as well as when stratified by sex ($p < 0.001 - 0.016$). Lin's coefficient indicated poor agreement between most of the formulas and methods both in percentage and kilograms of fat mass (CCC = 0.135–0.892). In the Bland-Altman analysis, using the DXA fat mass values as a reference, lack of agreement was found in the general sample ($p < 0.001 - 0.007$), except for Carter's formula in kilograms ($p = 0.136$) and percentage ($p = 0.929$) and Forsyth for percentage ($p = 0.365$). When separating the sample by sex, lack of agreement was found in males for all methods when compared with both percentage and kilograms calculated by DXA ($p < 0.001$). In the female sample, all methods and formulas showed lack of agreement ($p < 0.001 - 0.020$), except for Evans's in percentage ($p = 0.058$).**Conclusion:** The formulas for fat mass assessment with anthropometry and BIA may not be valid with respect to the values reported with DXA, with the exception of Carter's anthropometry formula for general sample and Evans's anthropometry formula for female sample. BIA could also be an alternative if what is needed is to assess fat mass in women as a group.

KEYWORDS

body composition, fat mass, anthropometry, bioelectrical impedance analysis, dual-energy X-ray absorptiometry

1 Introduction

The importance of fat mass in different areas is clear (1–3). In the health field, fat levels have been associated with different pathologies and comorbidities, both due to the risk of developing them and the loss of daily functionality resulting from an excess of fat mass (4). Additionally, estimating fat mass has garnered significant interest in the field of sports, due to its association with performance (5, 6). Adiposity, acting as a burden, leads to most sports requiring low levels of body fat to enhance movements and achieve greater efficiency, and consequently, better outcomes (7, 8).

Different methods have been employed to accurately estimate fat mass, all of them with advantages and disadvantages (9–11). Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) is considered by the scientific community as the criterion method, but the high-cost leaves DXA body composition assessments for very high-resource institutions (12). On the other hand, anthropometry and bioimpedance (BIA) are the most popular methods due to their low-moderate cost (12). Also, their “portability” has made them the most widely used in both sports and clinical practice (13).

In relation to anthropometry, it stands out as a low-cost method compared to other methods. In addition, it is transportable, which is very useful for measuring athletes and in the clinical field (1, 8, 12). Furthermore, it is a method that allows replicability by other trained researchers who follow a standardised method, such as the ISAK protocol (14, 15).

In relation to BIA, it is important to mention that it can be conducted using four different technologies (e.g., leg-to-leg, hand-to-hand, foot-to-hand, and standing position) (16) and with the subject in different measurement positions (i.e., standing, supine, or sitting). This is relevant given that the fat mass results reported by the BIA may depend on these factors, although these aspects in relation to the technology and position are often not taken into account to assess their accuracy and validity (17). While the supine position is the most commonly used position in research (18), the standing position is more commonly used in the clinical field, being the position chosen for assessment by the majority of BIA devices (19). However, standing BIA in most cases does not provide electrical conductivity data, i.e., raw bioimpedance parameters (20). Therefore, the equations that applies this type of device to estimate fat mass and the reference values it uses are exclusively those included in the software of the specific BIA model being used (16, 21).

It is important to note that while all these methods of fat mass estimation call the estimated adiposity as “fat mass” in the different reports and software, they are taking different approaches to estimate adiposity and, therefore, measuring different things (12, 22). More specifically, regardless of the method used, body composition can be approached based on five levels of increasing complexity (23). Most popular are model 2, which takes a molecular approach to body composition, considers body mass as the sum of fat mass and fat-free mass, including water, proteins, carbohydrates, and minerals; and model 4, which takes a tissue approach to body composition, considers body mass as the sum of adipose tissue, skeletal muscle tissue, bone tissue, skin tissue, and residual tissue (23). Accordingly, depending on the approximation model used by the technique chosen for the estimation of body composition, fat mass values are obtained if a molecular approach is used (model 2); or adipose tissue, if a tissue approach is used (model 4) (8, 22). And although both terms are classically lumped together under the heading “fat

mass” (22), adipose tissue encompasses all components of the adipocyte (adipose cell), while fat mass corresponds to the lipid fraction of the adipose cell (22). This leads to errors of approximately 8–10% in the estimation of “fat mass” when approaching adiposity from different models (8).

Regarding the model used by the different methods to address body composition, DXA approaches body composition from a molecular approach (model 2), using X-rays to distinguish materials based on their atomic number (24). These data are then transformed into pixels of varying colors representing lipids, bone minerals, and other molecules, thereby enabling the acquisition of fat mass values (24). BIA, also approach from model 2, and uses a molecular fractionation to body composition (model 2) analysing molecular conductance and resistance to the flow of an electric current, estimating fat mass (9, 25). In anthropometry, through the measurement of skinfold thickness, in most cases seeks to estimate body density for subsequent fat mass estimation, according to model 2 (molecular model) (23, 26), dividing between fat mass and fat-free mass as the previous methods mentioned (27–30). However, anthropometry also seeks to approximate body composition according to model 4 (tissue model). This is done only through the Kerr formula, which is a mathematical model for estimating adipose tissue, which was validated in tissue fractionation of cadavers (30–33). As a consequence of the above, the results of the Kerr equation cannot be compared with those obtained for the other formulas (8) and it is necessary to convert the adipose tissue result of the Kerr equation to fat mass if you want to compare the results.

As a result of the above, different studies that have compared the results reported for fat mass by DXA, BIA, and anthropometry (34–36); DXA and BIA (37, 38); BIA and anthropometry (39, 40); or different anthropometry formulas (8, 41), have reported that there are differences between all of them in the results reported, making the results not comparable. However, only two of these studies took into account the need to fit the results reported by the different systems to the same model in order to be able to compare them. More specifically, an investigation of 32 young people (19 males and 13 females) compared the results reported by DXA; air displacement plethysmography, underwater weighing (UWW) and BIA. After fitting all results to obtain comparable results, it was found that the differences between the results reported by most of these methods disappeared after fitting to the same model (38). In another study of 87 subjects, different anthropometric formulas were compared for the estimation of “fat mass,” adjusting adipose tissue to fat mass, and it was found that even after adjustment there were significant differences between the results reported by the different formulas (8). Therefore, so far, no research has addressed this issue by including the three most popular methods currently used to estimate adiposity, i.e., DXA, anthropometry and BIA.

In view of the above, the objectives of this research were to: (a) determine the agreement of DXA with both BIA and anthropometry for estimating body fat mass and to analyse if sex and hydration status affect these results; and (b) analyse the validity of both anthropometry and BIA versus DXA for fat mass estimation, as well as the different formulas available, and whether sex and hydration status could affect this issue. Considering the findings of previous studies, the research hypothesis were: (a) anthropometry and BIA are not interchangeable to estimate fat mass respect to DXA; and (b) not all methods of assessing body composition are valid in estimating fat mass compared to DXA.

2 Materials and methods

2.1 Design

The present research followed a descriptive, cross-sectional design. The sample recruitment was non-probabilistic by convenience. The calculation used to establish the minimum sample size was performed with Rstudio 3.15.0 software (Rstudio Inc., Boston, MA, United States). The significance level was set at $\alpha = 0.05$. The standard deviation (SD) for the total sample was set based on previous studies on the variables of fat mass percentage (SD = 5.19) (8). This methodology for sample size calculation has been used in previous research (42). Thus, the minimum sample size was 265 subjects, assuming an error (d) of 0.62% for fat mass percentage and for a 99% confidence interval (CI). Considering that acceptable statistical power is greater than 0.80 (43). The calculated statistical power was 0.96, which is high.

The Ethics Committee from the Catholic University San Antonio of Murcia (Murcia, Spain) reviewed and authorized the protocol designed for data collection, considering the World Medical Association Code (CE062103). All recommendations from the Declaration of Helsinki were followed throughout the process. Participants were informed about the procedure and signed a consent form prior to starting the study.

2.2 Participants

A total of 265 volunteers were included, with their selection being non-probabilistic by convenience. Of these, 161 were male (mean age = 23.04 ± 5.61 years old); and 104 were female (mean age = 22.29 ± 5.98 years old). The flow diagram of the sample selection process can be consulted in Figure 1. The inclusion criteria were: (1) to be aged between 18 and 35 years old and (2) not having ingested any liquids and/or food from the night before the measurements. The exclusion criteria were: (1) to have performed vigorous physical exercise within the 24 h prior to the measurement session, or 12 h prior to the measurement in case of moderate exercise, or any kind of physical exercise on the same day of the measurement; (2) to have consumed products with diuretic properties, or eaten a heavy meal within the 24 h prior to the measurement session; (3) to have any injury or pathology that conditioned the taking of measurements; (4) to have any disease that could affect body fat; (5) to take hormonal or corticosteroid treatment in the three months prior to the evaluation (except for hormonal treatment to regulate the menstrual cycle); (6) for women, not to be between the 8th and 21st day of the menstrual cycle; (7) to take sports supplements that could impact fat distribution or the validity of body composition estimation methods, such as creatine or fat burners; and (8) failure to complete all measurements.

2.3 Protocol

Within the university subjects related to body composition in the degree of Nutrition, Physiotherapy, and Sport Sciences at the UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia (Murcia, Spain), an announcement was posted in the virtual classroom to invite students

to volunteer for the study. They were required to fill out an initial questionnaire with basic data, and those who met the inclusion criteria were contacted to provide further instructions. Informed consent was obtained from each participant, and appointments for the measurements were scheduled, considering the menstrual cycle in the case of females. All appointments and measurements were carried out in the morning between 8 am and 10 am. All persons included were fasting from the previous night.

Firstly, a urine sample was taken from all participants to assess their hydration levels. The sample was used to classify the hydration status according to the colour of their urine and according to their urine density, measured with a refractometer (44, 45). Then, the participants were asked to complete an *ad hoc* questionnaire to provide information on basic sociodemographic information (sex, date of birth, and ethnicity), diseases that could affect body fat accumulation or distribution (illnesses and injuries in the last six months, chronic illness and surgeries), medication taken regularly, hormonal or corticosteroid treatment (daily or occasional treatment in the last six months), last menstrual period for women, food intake (24 h dietary recall), and sports practice (48 h exercise recall), based on previous studies (46, 47). They were also asked about sports supplements taken regularly.

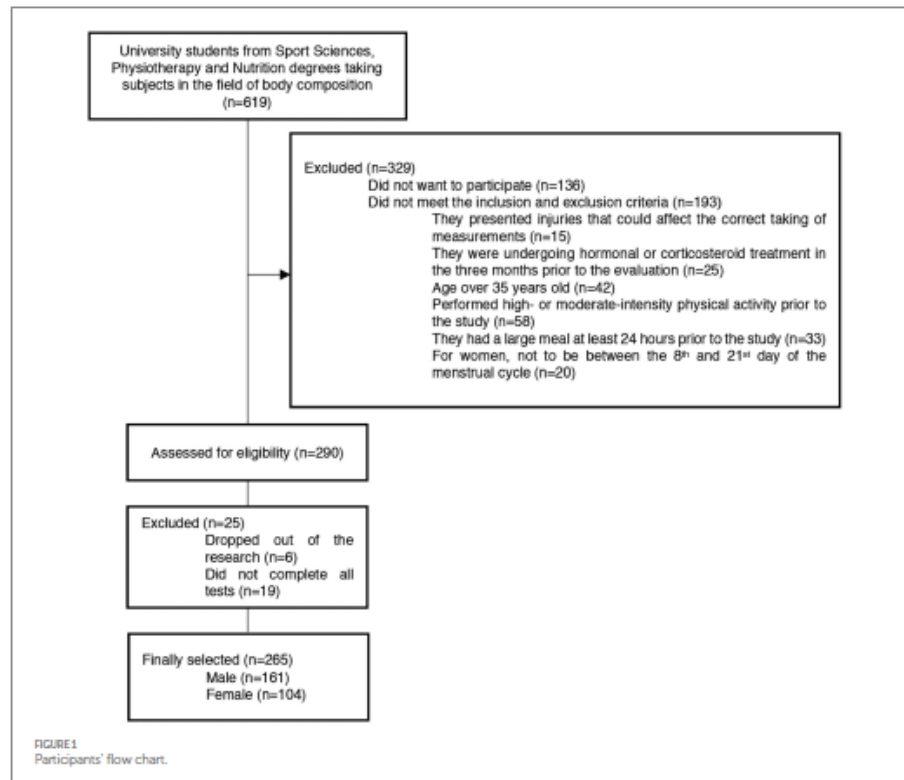
Secondly, all the body composition measurements with DXA, anthropometry, and BIA were performed in a single session day in a room with a standardized temperature of 24°C. The tests were performed in a randomised order, with the measurements in each test taken by the same individual in all measurement sessions to eliminate inter-rater technical error in the test.

2.3.1 Dual-energy X-ray absorptiometry

A total body composition measurement by DXA was performed on each participant. The Hologic Horizon model (Hologic Inc., Bedford, MA, United States) was used. The assessment was carried out by the same expert technician with previous experience. For the assessments, all participants were provided with sports tights and previous protocols were followed, including the removal of all metallic elements that could alter the results, and all participants were also asked to urinate within 30 min before the measurements (48). In the scanner, subjects were positioned with their hands in a lateral position and both feet in a 15° internal position (48). Results were analysed using Hologic APEX 13.6.0.5:5 software (Hologic Inc., Bedford, MA, United States). The values for fat mass (kg and percentage) were measured (Table 1).

2.3.2 Bioimpedance analysis

Each subject was measured by BIA with the TANITA MC-780-MA model (Tanita Corporation, Tokyo, Japan), which operates by segmental multifrequency (measuring frequencies: 5 kHz/50 kHz/250 kHz) and consists of eight electrodes. The subjects were measured in a standing position, following the technical instructions in the user manual of the device. All protocols established by the manufacturer were followed, including urinating within 30 min before the measurements. Water consumption or dietary factors that may affect total body water levels were also asked about (49). All subjects were measured in sports tights, and all metallic elements were removed from their bodies. Body mass values were analyzed, as well as percentage and kilograms of fat mass with the TANITA software (Tanita Corporation, Tokyo, Japan) (Table 1).



2.3.3 Anthropometry

The anthropometric variables were taken following the protocol by the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK). Body mass and height; triceps, subscapular, biceps, iliac crest, supraspinal, abdominal, thigh, and calf skinfolds, were taken by the same ISAK level-3 certified anthropometrist. The skinfold measurements were taken on the right side according to the ISAK protocol (14) at the third second after the full pressure of the calliper was applied (26). A TANITA MC-780-MA model (Tanita Corporation, Tokyo, Japan), with an accuracy of 0.1 kg, was used to measure body mass; a portable stadiometer (SECA, Hamburg, Germany), with an accuracy of 0.1 cm, was used for height measurements, and a Harpenden calliper (Harpenden, London, United Kingdom), with an accuracy of 0.2 mm, was used for skinfolds. Each measurement was taken twice. If the difference between them was greater than 1% for the basic measurements or greater than 5% for the skinfolds, a third measurement was taken. The final value considered for data analysis was the mean if two measurements were taken, or the median if three measurements were taken (50). The intra-evaluator technical error of measurement (TEM) was 0.01% for basic measurements and 1.12% for skinfolds (50). For the estimation of fat mass and its percentages,

formulas have been selected because they have been used in previous studies with similar samples (8). In addition, these are the validated formulas most commonly used in the young population (8). They were proposed by CUNBAE (51), Forsyth and Sinning (52), Evans et al. (29), Carter (27), Brozek and Keys (53), Yuhasz (54), Faulkner (28), and Durtnin and Womersley (30). The formula proposed by Kerr and Ross (33) was also included, although as it is a formula that estimates adipose tissue, its transformation into fat mass was calculated by a linear regression assuming a minimum percentage error with Martín et al. (55) formula and Snyder et al. (56) formula (Table 1).

2.4 Statistical analysis

The normal distribution with Kolmogorov-Smirnov test, kurtosis and asymmetry of the variables were calculated. Levene's test was used to assess the homogeneity of the variables. Levene's test was used to assess the homogeneity of the variables. The analysis of skewness and kurtosis showed a platykurtic distribution for all variables. As a normal and homogeneous distribution of the variables was found,

TABLE 1 Methods and equations for the estimation of fat mass included in the present study.

	Fat mass
Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA)	Value report by Hologic Horizon software
Bioimpedance (BIA)	Value report by TANITA MC-780-MA software
Anthropometry	Fat mass derived from the Kerr formula after Martin conversion
	Fat mass derived from the Kerr formula after Snyder conversion
	CUNBAE
	Forsyth et al.
	Evans et al.
	Carter et al.
	Brozek et al.
	Yuhasz et al.
	Faulkner et al.
	Durnin-Womersley et al.

parametric tests were performed. Descriptive statistics were performed for the variables analyzed. Differences between the fat mass equations and methods were analyzed with an ANOVA test for repeated measurements. An ANCOVA for repeated measurements was used to analyse the influence of the variables "sex" and "hydration status" on the differences found. The Bonferroni *post hoc* adjustment was used to analyse differences between DXA and anthropometry and BIA formulas when these differences were significant. The effect size for the pairwise comparisons was calculated with partial Eta-squared (η_p^2). The confidence interval (CI) of the differences (95% CI) was included. The software used in the statistical analysis was SPSS (v.23, IBM, Endicott, NY, United States). The agreement between equations and methods was determined using Lin's concordance correlation coefficient (CCC), including precision (ρ) and accuracy (Cb) indexes, as well as with McBride's strength concordance (almost perfect >0.99; substantial >0.95 to 0.99; moderate = 0.90–0.95; and poor <0.90), following previous research (46). The Bland-Altman test was used to determine the validity of different anthropometry and BIA equations with respect to DXA values. The trend to overestimate or underestimate the values respect to the reference method and the regression equation for the model was also calculated. The software used to perform the Lin's CCC and Bland-Altman test was MedCalc Statistical Software v.20.106 (Mariakerke, Belgium). For all the statistical tests, the significance level was set *a priori* to $p \leq 0.05$.

3 Results

Table 2 and Supplementary Figures S1–S6 shows the results of the descriptive statistical analysis for the general population, male and female samples, including means, standard deviation, a minimum and maximum values.

Table 3 presents the results of the ANOVA and the ANCOVA performed to analyze the effect of the covariates sex and hydration

status in both the general sample and the sample separated according to sex. Significant differences were found between methods and equations used to estimate both kilograms and percentage of fat mass, in both the general sample ($p < 0.001$), and when the covariable sex was included ($p < 0.001$). In contrast, hydration status showed no significant effect on the model ($p = 0.332$ – 0.527). When the sample was divided according to sex, significant differences remained in both males and females for the fat mass estimation methods and equations, both in kilograms and in percentages ($p < 0.001$).

When comparing the results shown by DXA with anthropometry and BIA in the general sample, the Bonferroni adjustment showed that DXA has significant differences with respect to all the other methods in kg ($p < 0.001$; 95% CI: -9.633 , 2.429) and percentage ($p < 0.001$; 95% CI: -11.547 , -7.294), with the exception of Carter's formula in kg ($p = 0.488$; 95% CI: -2.027 , 0.235) and percentage ($p = 1.000$; 95% CI: -0.863 , 0.819), and Forsyth's formula in kg ($p = 1.000$; 95% CI: -0.860 , 0.335) and percentage ($p = 1.000$; 95% CI: -1.872 , 1.086). When the sample was divided according to sex, significant differences remained between all the methods in male sample both for kg ($p < 0.001$; 95% CI: -16.586 , 2.588) and percentage ($p < 0.001$; 95% CI: -20.494 , -17.652). Regarding females, significant differences remained in females for the fat mass estimation methods in kilograms ($p < 0.001$; 95% CI: -4.907 , 5.783) and percentage ($p < 0.001$; 95% CI: -8.452 , 9.540), with the exception of BIA's formula for kg ($p = 0.127$; 95% CI: -1.432 , 0.062) and percentage ($p = 0.109$; 95% CI: -2.413 , 0.086), and Evans's formula for kilograms ($p = 1.000$; 95% CI: -0.337 , 1.743) and percentage ($p = 1.000$; 95% CI: -0.743 , 2.656).

Figures 2, 3 showed Lin's coefficient for general sample in kg and percentage; Figures 4, 5 for males and Figures 6, 7 for females. Lin's coefficient indicated that when the sample was treated as a group poor agreement between all the formulas and methods both in percentage and kilograms of fat mass (CCC = 0.135 – 0.892), with the exception of DXA's and BIA's formula of kilograms in female group (CCC = 0.936).

In the general group, the formulas that showed the statistically significant trend to overestimate fat mass compared with the DXA in kg and percentage were the Martin's ($r = 0.245$, $p < 0.001$; and $r = 0.321$, $p < 0.001$), CUNBAE's ($r = 0.498$, $p < 0.001$; and $r = 0.137$, $p = 0.026$), Forsyth's ($r = 0.593$, $p < 0.001$; and $r = 0.446$, $p < 0.001$), Carter's ($r = 0.279$, $p < 0.001$; and $r = 0.235$, $p < 0.001$) and Faulkner's formulas ($r = 0.145$, $p = 0.018$; and $r = -0.177$, $p = 0.004$). The formulas that showed the statistically significant trend to underestimate fat mass and compared with the DXA were Evans's formula ($r = -0.798$, $p < 0.001$) and Yuhasz's formula ($r = -0.898$, $p < 0.001$) for kilograms; and BIA's ($r = -0.286$, $p < 0.001$), Snyder's ($r = -0.368$, $p < 0.001$), Brozek's ($r = -0.564$, $p < 0.001$), Faulkner's ($r = -0.177$, $p = 0.004$), and Durnin's formulas ($r = -0.481$, $p < 0.001$) for percentage.

In males, the formulas that showed the statistically significant trend to overestimate fat mass compared with the DXA both in kg and percentage were the Martin's ($r = 0.251$, $p < 0.001$; and $r = 0.296$, $p < 0.001$) and Forsyth's formulas ($r = 0.756$, $p < 0.001$; and $r = 0.707$, $p < 0.001$). The BIA's ($r = 0.155$, $p = 0.049$), CUNBAE's ($r = 0.360$, $p < 0.001$), Carter's ($r = 0.297$, $p < 0.001$), Brozek's ($r = 0.238$, $p = 0.002$), Faulkner's ($r = 0.173$, $p = 0.028$) and Durnin's ($r = 0.361$, $p < 0.001$)

TABLE 2 Descriptive analysis of fat mass in kilograms and percentages in the general sample and separated into male and female samples.

Method and formulas	General sample (n = 265)		Male sample (n = 161)		Female sample (n = 104)	
	Mean ± SD	Min.–Max.	Mean ± SD	Min.–Max.	Mean ± SD	Min.–Max.
DXA In kg	12.50 ± 6.43	0.18; 40.57	15.69 ± 5.66	3.16; 38.67	15.31 ± 6.56	0.18; 40.57
BIA In kg	14.72 ± 6.06	1.90; 42.10	13.89 ± 5.75	1.90; 40.00	15.99 ± 6.32	5.00; 42.10
ANTHR Kerr converted by Martin In kg	16.40 ± 6.71	6.46; 41.17	14.71 ± 5.97	6.46; 37.12	19.02 ± 6.99	7.26; 41.17
ANTHR Kerr converted by Snyder In kg	18.21 ± 5.28	9.13; 36.82	17.62 ± 5.15	9.78; 36.82	19.13 ± 5.38	9.13; 36.35
ANTHR CUNBAE In kg	19.88 ± 10.02	1.70; 49.14	25.82 ± 7.43	12.32; 49.14	10.69 ± 5.59	1.70; 37.43
ANTHR Forsyth In kg	13.40 ± 8.70	2.98; 57.63	14.17 ± 8.73	3.84; 47.49	12.19 ± 8.55	2.98; 57.63
ANTHR Evans In kg	14.28 ± 5.92	4.45; 38.26	14.08 ± 5.94	4.45; 38.26	14.60 ± 5.91	5.27; 34.99
ANTHR Carter In kg	12.76 ± 5.85	4.28; 40.39	12.38 ± 5.66	5.29; 36.49	13.35 ± 6.13	4.28; 40.39
ANTHR Bronzok In kg	18.15 ± 6.08	7.14; 41.14	18.66 ± 6.18	8.77; 40.21	17.36 ± 5.86	7.14; 41.14
ANTHR Yuhász In kg	10.57 ± 5.36	3.70; 41.52	8.77 ± 3.92	3.70; 24.96	13.36 ± 6.08	4.61; 41.52
ANTHR Faulkner In kg	14.45 ± 5.84	5.70; 40.41	14.97 ± 5.79	7.34; 37.54	13.63 ± 5.86	5.70; 40.41
ANTHR Durmtn In kg	18.53 ± 6.43	7.01; 42.94	18.98 ± 6.56	8.59; 41.80	17.84 ± 6.19	7.01; 42.94
DXA In %	17.68 ± 8.24	0.44; 43.15	13.38 ± 5.77	5.08; 34.68	24.35 ± 6.97	0.44; 43.15
BIA In %	20.55 ± 6.92	3.00; 41.00	17.34 ± 5.21	3.00; 35.90	25.51 ± 6.28	9.80; 41.00
ANTHR Kerr converted by Martin In %	23.44 ± 9.26	8.54; 49.40	18.69 ± 6.37	8.54; 41.30	30.79 ± 8.20	14.95; 49.40
ANTHR Kerr converted by Snyder In %	25.84 ± 6.63	13.27; 42.06	22.44 ± 4.98	13.27; 37.73	31.12 ± 5.30	19.64; 42.06
ANTHR CUNBAE In %	26.27 ± 9.31	3.95; 45.03	32.45 ± 4.95	20.61; 45.03	16.70 ± 5.65	3.95; 36.41
ANTHR Forsyth In %	18.08 ± 8.98	5.96; 56.06	17.53 ± 8.71	5.96; 46.65	18.92 ± 9.37	6.08; 56.06
ANTHR Evans In %	19.95 ± 6.51	6.85; 40.84	17.72 ± 5.84	6.85; 34.92	23.39 ± 6.00	10.37; 40.84
ANTHR Carter In %	17.70 ± 6.18	8.13; 40.43	15.47 ± 5.19	8.13; 32.72	21.16 ± 6.02	10.07; 40.43
ANTHR Bronzok In %	25.23 ± 5.63	13.71; 40.02	23.52 ± 5.31	13.71; 36.06	27.88 ± 5.08	15.59; 40.02
ANTHR Yuhász In %	14.99 ± 6.84	5.74; 40.57	10.98 ± 3.62	5.74; 22.96	21.21 ± 5.94	10.83; 40.57
ANTHR Faulkner In %	19.92 ± 5.36	12.26; 39.31	18.79 ± 4.95	12.26; 34.92	21.68 ± 5.52	12.96; 39.31
ANTHR Durmtn In %	25.75 ± 6.10	13.28; 41.77	23.90 ± 5.76	13.28; 37.49	28.62 ± 5.50	15.31; 41.77

DXA, dual-energy X-ray absorptiometry; BIA, bioimpedance analysis; ANTHR, anthropometry

TABLE 3 Analysis of differences in fat mass (kg and percentage) between DXA, BIA, and anthropometry for the general sample and according to sex.

	ANOVA			Variable x Hydration status			Variable x Sex		
	F	p-value	η^2_p	F	p-value	η^2_p	F	p-value	η^2_p
General sample (n = 265)									
Fat mass In kg	10.363	<0.001	0.038	0.401	0.527	0.002	103.100	<0.001	0.282
Fat mass In percentage	13.188	<0.001	0.048	0.946	0.332	0.004	112.854	<0.001	0.301
Males (n = 161)									
Fat mass In kg	52.953	<0.001	0.249						
Fat mass In percentage	53.564	<0.001	0.251						
Females (n = 104)									
Fat mass In kg	49.519	<0.001	0.325						
Fat mass In percentage	51.427	<0.001	0.333						

formulas showed trend to overestimate only in kilograms, and Evans's ($r=0.162, p=0.040$) and Yuhász's ($r=0.128, p<0.001$) for percentage. The formulas that showed the statistically significant trend to underestimate fat mass and compared with the DXA were the Evans's ($r=-0.802, p<0.001$) and Yuhász's ($r=-0.975, p<0.001$) for kilograms, and Snyder's ($r=-0.201, p=0.010$), CUNBAE's

($r=-0.179, p=0.023$), and Faulkner's ($r=-0.177, p=0.024$) for percentage.

In females, Martin's formula showed statistically significant trend to overestimate fat mass compared with the DXA both in kg ($r=0.275, p=0.005$) and percentage ($r=0.256, p=0.009$). CUNBAE's ($r=0.291, p=0.003$), Forsyth's ($r=0.277, p=0.004$), Carter's ($r=0.238,$

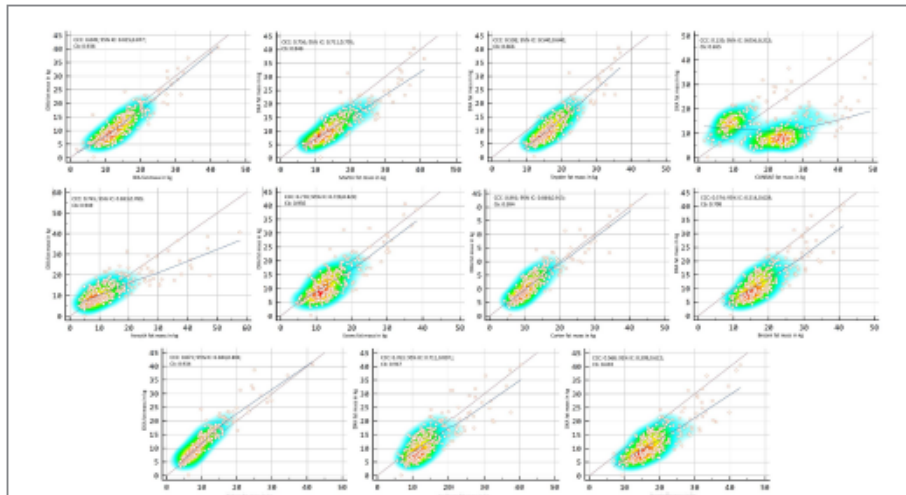


FIGURE 2 Point plot of the concordance between methods of fat mass in kg reported by DXA in the general sample.

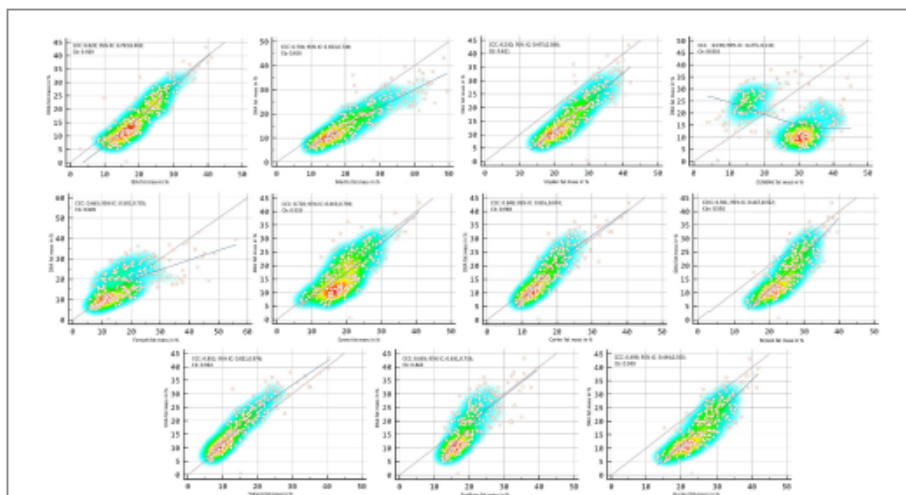
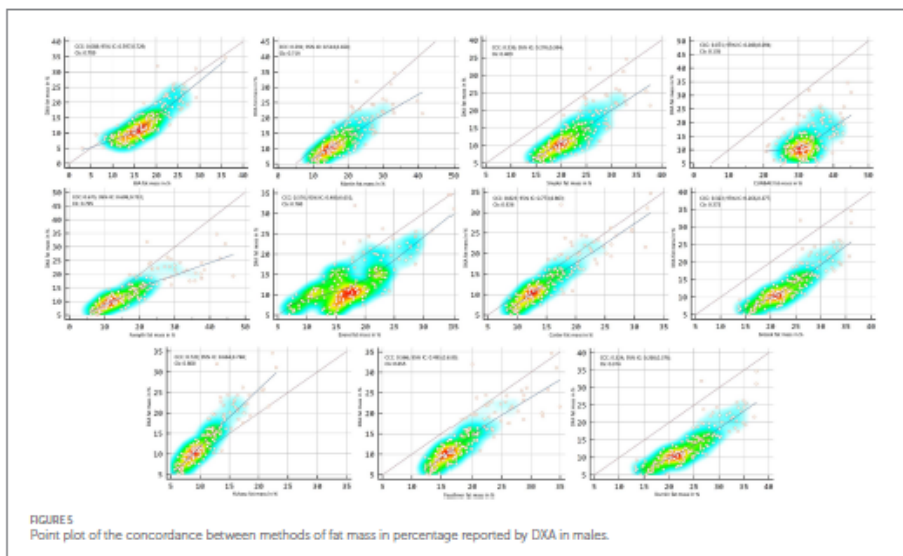
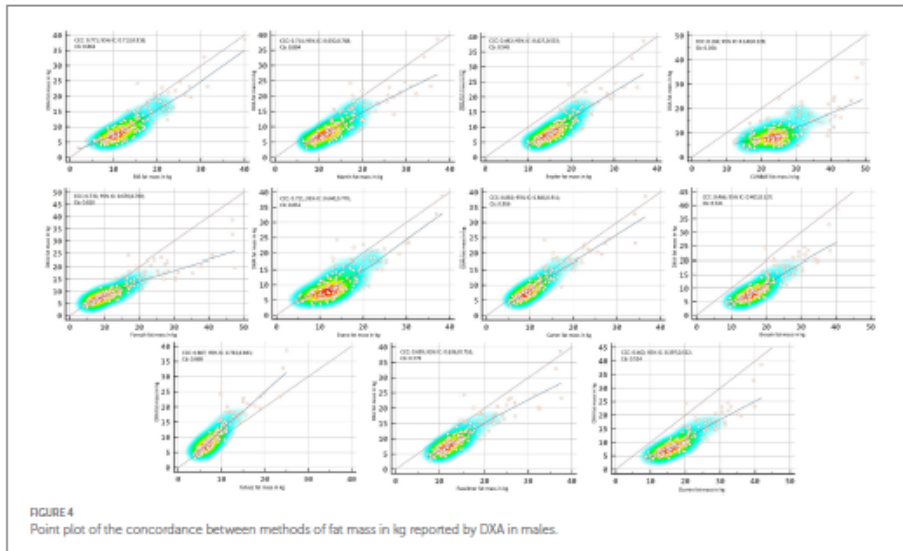


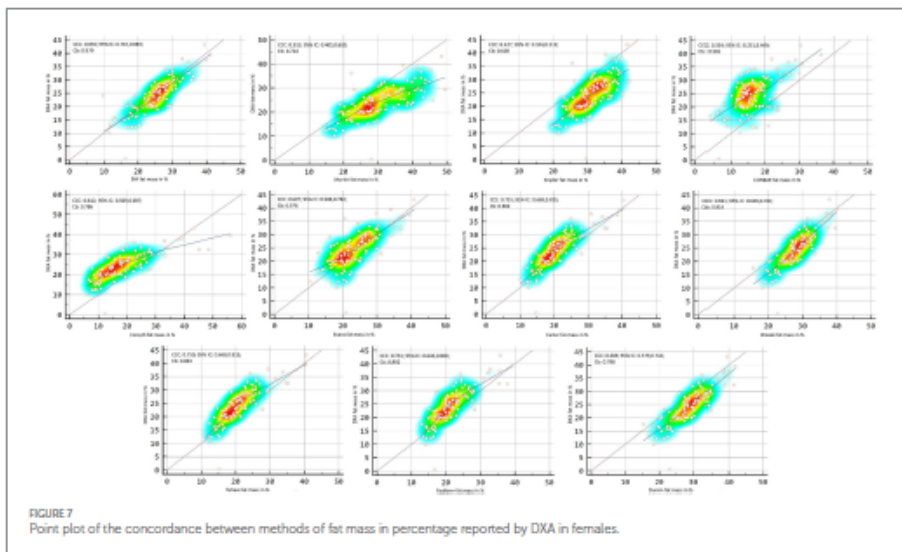
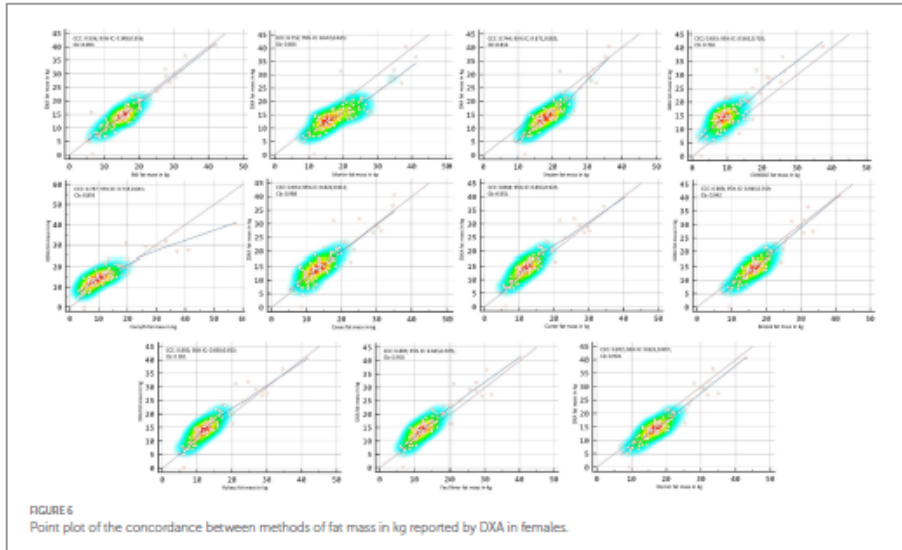
FIGURE 3 Point plot of the concordance between methods of fat mass in percentage reported by DXA in the general sample.

$p=0.015$) and Faulkner's ($r=0.342, p<0.001$) formulas showed trend to overestimate only in kilograms. The formulas that showed the statistically significant trend to underestimate fat mass compared with the DXA were Evans's formula for kilograms ($r=-0.833,$

$p<0.001$) and percentage ($r=-0.203, p=0.039$), Yuhasz's formula for kilograms ($r=-0.783, p<0.001$) and BIA's ($r=-0.246; p=0.012$), Snyder's ($r=-0.337, p<0.001$), Brozek's ($r=-0.452, p<0.001$), and Durnin's ($r=-0.384, p<0.001$) formulas for percentage.



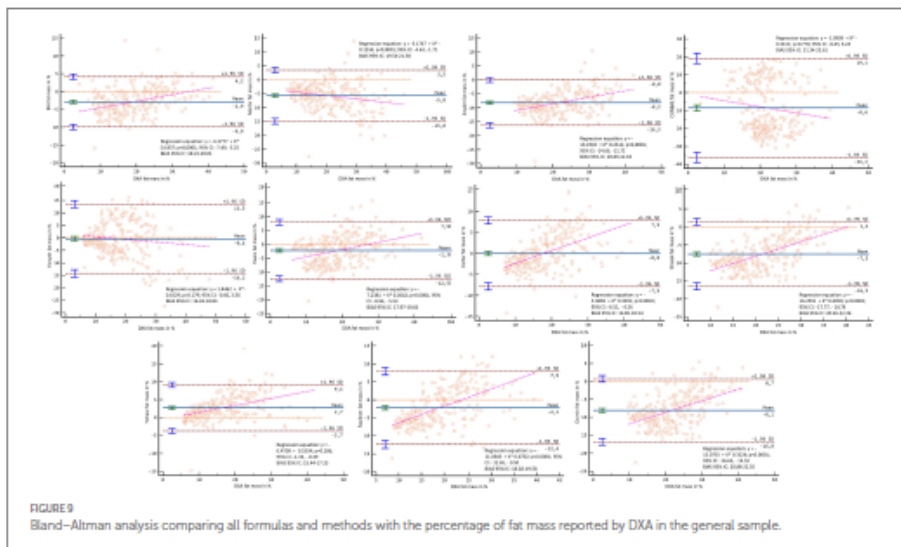
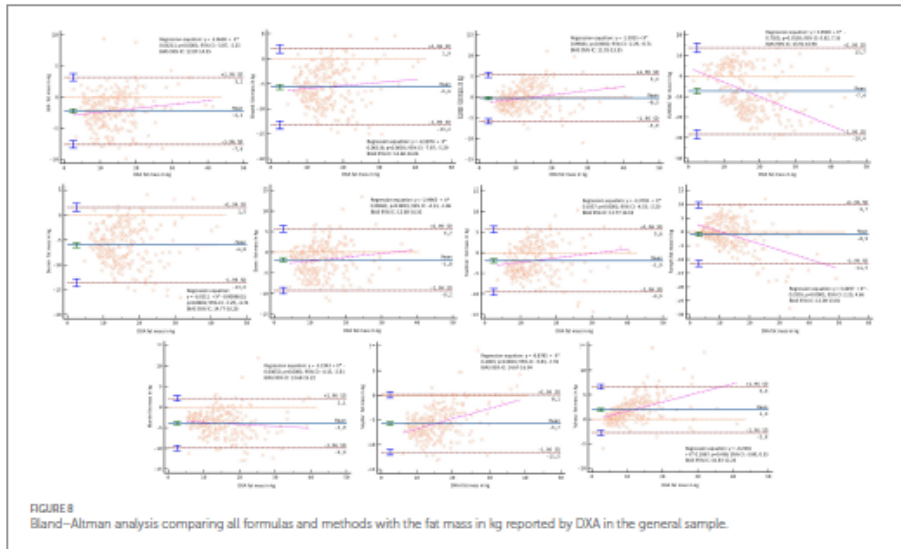
In the Bland-Altman analysis, using the DXA fat mass values as a reference, lack of agreement was found in the general sample ($p < 0.001-0.007$), except for Carter's formula in kilograms ($p = 0.136$) and percentage ($p = 0.929$) and Forsyth for percentage ($p = 0.365$) (Figures 8, 9). When separating the sample by sex, lack of agreement was found in males for all methods when compared with both



percentage and kilograms calculated by DXA ($p < 0.001$) (Figures 10, 11). In the female sample, all methods and formulas showed lack of agreement ($p < 0.001-0.020$), except for Evans's in percentage ($p = 0.058$) (Figures 12, 13).

4 Discussion

The main objective of this research was to determine the agreement of DXA with both anthropometry and BIA for estimating



fat mass; and to analyse the validity of both anthropometry and BIA versus DXA for fat mass estimation, as well as the different formulas available, and whether sex or hydration status could affect this issue. The main finding of the present investigation was that in general BIA

and anthropometry showed significant differences respect fat mass value report by DXA, proving to be not very valid with respect to DXA; it was also found that there is no agreement for fat mass values in most cases neither when analysing populations nor when analysing

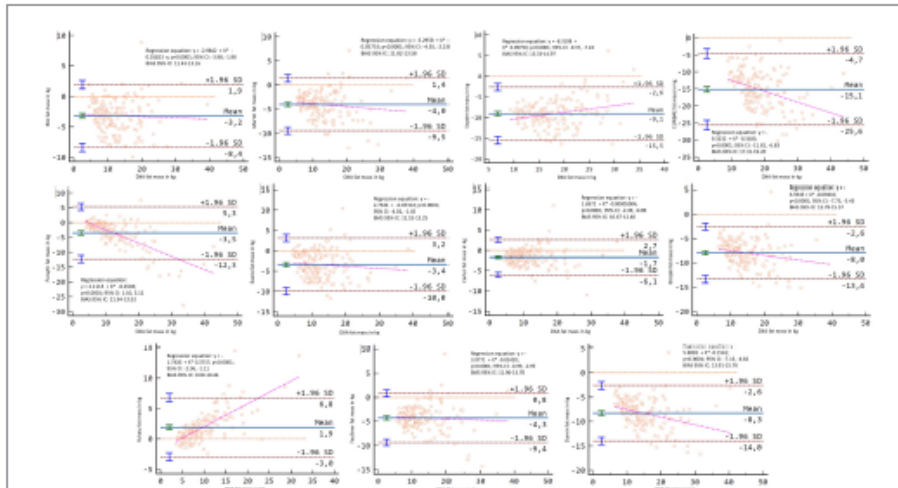


FIGURE 10
Bland-Altman analysis comparing all formulas and methods with the fat mass in kg reported by DXA in males.

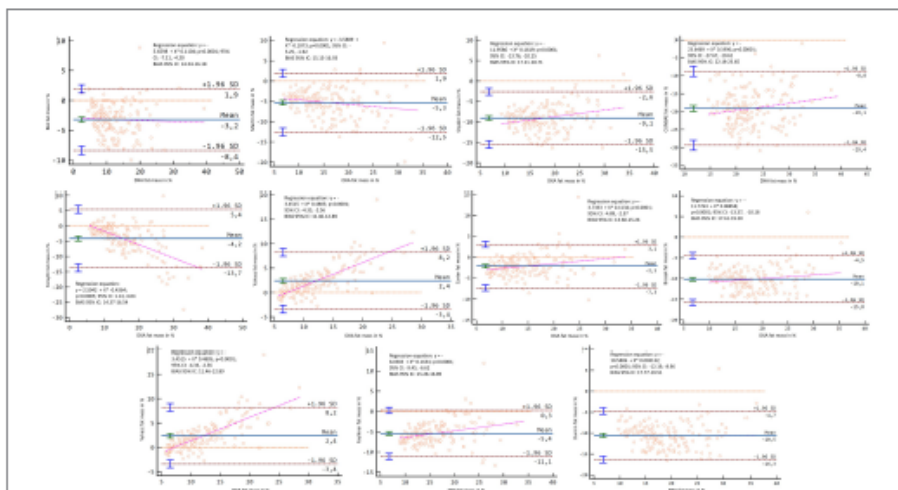


FIGURE 11
Bland-Altman analysis comparing all formulas and methods with the percentage of fat mass reported by DXA in males.

individuals. Previous studies have also found differences when comparing DXA, BIA, and anthropometry (34–36) and DXA and BIA (37, 38). However, no previous study had previously compared the results found in the estimation of fat mass with the main methods

used in the assessment of body composition (DXA, BIA, and anthropometry); adjusting the results according to the model used by each method; with as many formulas as included in this research, and with such a large sample.

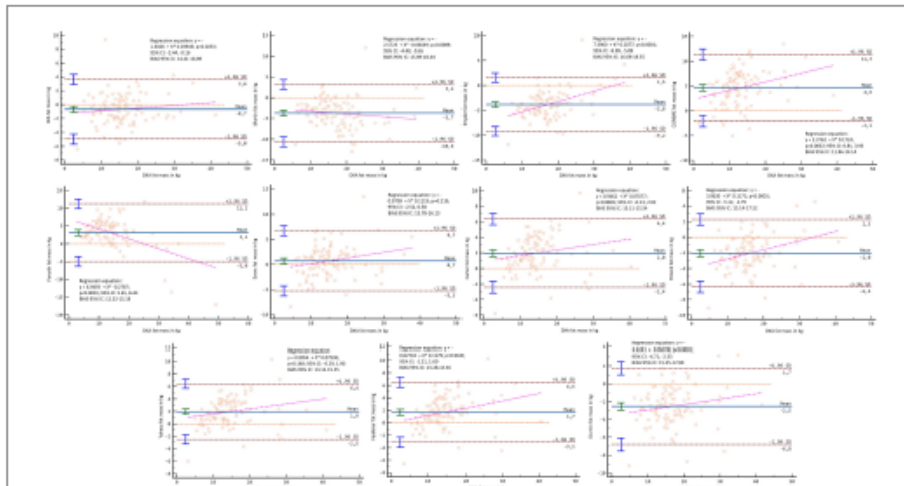


FIGURE 12 Bland-Altman analysis comparing all formulas and methods with the fat mass in kg reported by DXA in females.

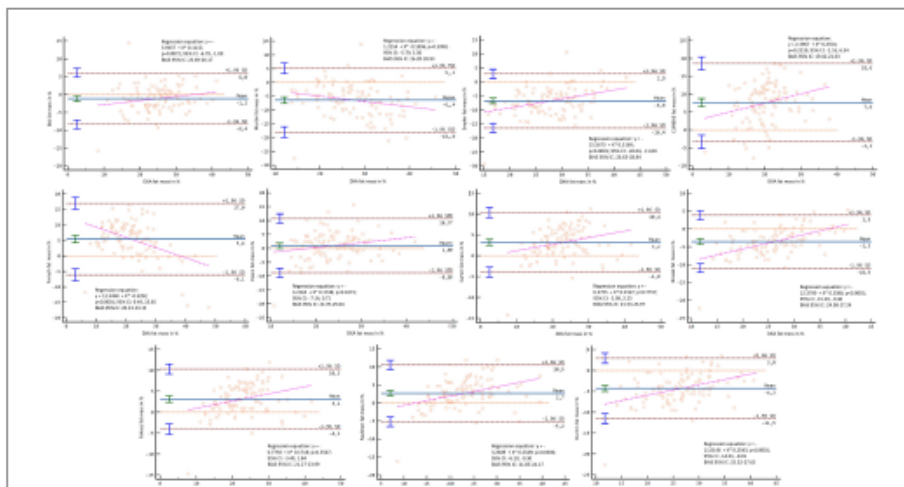


FIGURE 13 Bland-Altman analysis comparing all formulas and methods with the percentage of fat mass reported by DXA in females.

The differences found in the results of fat mass from anthropometry vs. DXA may be a consequence of the fact that most of the formulas for estimating fat mass with anthropometry had been validated based on multiple regressions, and are specific to a

population with similar characteristics to the one used in their validation, although for practical purposes, the lack of formulas validated in each of the different populations means that they are applied in different contexts (29, 30, 52). Thus, the application of

these formulas and methods to people of other sex, other levels of physical activity, other races, other nutrition habits, other genetics, etc. is uncertain and unreliable in the light of the results of this research.

Another possible explanation could be that anthropometry has put forward different options for approaching the adipose component depending on the method used for its estimation. More specifically, while Kerr anthropometric formula, focus on a model 4 approach aiming to estimate subcutaneous adipose tissue as a whole, other anthropometric formulas focus on model 2 to estimate fat mass (8, 57). Although Martin's and Snyder's formulas for converting adipose tissue estimated by Kerr to fat mass was used in the present investigation to solve the problem of different models for approximating body composition (8, 22), no agreement was still found between Kerr's fat mass and DXA results, so the appropriateness of Kerr's method should be investigated in future research.

Regarding the reported differences in fat mass results between DXA and BIA, previous studies have also pointed out that BIA may be a method whose concordance and validity is limited with respect to DXA (58–60). This could be since previous studies, as in the present one, a BIA device was used that do not report the raw electrical conductivity data (61), but rather the device's own software gives the fat mass estimation as a result (61, 62). Previous studies have suggested that the validity of BIA may be increased when the device gives the raw data and then this data is used by the researcher to estimate fat mass using the most appropriate formula for the population being analysed (21). A second justification for the lack of validity of the BIA results could be found in the fact that the device used in this research carried out the analysis in the standing position, which is the most common position in the clinical use of the BIA (63), but it has been shown that the validity of BIA analysis increases when the device is prepared to assess the subject in supine position (64), probably due to changes and stabilization in body water distribution that affects the results obtained (65). Therefore, future studies need to investigate these issues further.

Another outstanding result of the present research is that sex was an important factor to consider in the analysis of validity and agreement between methods. This is an interesting finding, considering that many of the formulas and methods for estimating fat mass have been classically used both in both men and women, regardless of the population in which they were validated (66). The different physiological characteristics between sex need to be considered. A relevant difference to the aim of the study is the tendency to accumulate adiposity (67, 68). In men, there is a greater accumulation in the central abdominal area of the body, while in women, this occurs more frequently in the gluteal-femoral area (67). So, in the light of the present research, it is important to consider sex when estimating body fat with these methods (69).

An important finding of the present research was that with respect to the agreement between formulas, the variable hydration status was not found to directly affect the results. Previous studies have shown a high impact of hydration levels on the results, mainly obtained with the BIA method (25). As a method that introduces an electrical current and assesses its transmission through the body, it is very important to monitor the levels of body water (9). Hydration status has also been proposed as a variable to control for when performing DXA body composition assessment (70). This could

be explained by the water component that is present in the different body tissues, not only in muscle mass but also in tissues containing the fat component (22, 70). However, in the present research, hydration status did not have high impact. This could be because in the present study, we controlled for the main factors that could affect hydration status, such as the practice of physical exercise, the consumption of products with diuretic properties, eating heavy meals, having an injury, taking hormonal or corticosteroid treatment, or the timing of the menstrual cycle in the case of women (71–74). Therefore, it is possible that the hydration conditions of the present sample were fairly standardized, which would have resulted in the hydration status not influencing the agreement between methods and formulas. These results should be tested in future research, where these factors that could affect hydration are not controlled for.

Despite the above, a noteworthy result of the present investigation was that, in case DXA assessment for fat mass cannot be used, Carter's anthropometry formula could be a good alternative to evaluate fat mass of individual subjects in general sample. This formula includes skinfolds of the upper limb, trunk and lower limb for estimation of fat mass, which approximates the subject's overall fat mass, as is done by DXA scanning (27). An alternative to the above could be the Forsyth formula for the percentage of fat mass in the general population. It is important to mention that these formulas include active persons in their validation (52). Therefore, it would be important to assess whether these alternatives remain appropriate in a population of different age, activity levels or with different pathologies considering that these factors have been shown to affect the validity of the formulas (35). Furthermore, Evans's anthropometry formula was shown as a good alternative to evaluate fat mass of individual subjects in female sample. It is important to mention that this formula requires few variables (triceps, abdominal and thigh skinfold) which makes it a quick formula to obtain. In addition, some previous studies also found this better concordance of the Evans formula in young females in comparison with other anthropometry formulas (75).

Furthermore, if a group analysis is desired, BIA could be a good alternative in the case of women. Previous studies have suggested that the BIA, without being a valid method for the assessment of individual subjects, can be a valid method for the assessment of groups (76). However, the influence of sex on this issue has not been analyzed so far. The present investigation demonstrates that BIA is a good alternative for the assessment of women's groups only, provided that some of the factors that could most influence the assessment of fat mass with BIA, such as the time of the menstrual cycle at which the assessment is performed (77), food or fluid intake (78) or the practice of physical exercise (79) are controlled.

This study provides practical applications for nutritionists, trainers, physiotherapists, and any health professional who is interested in the fat mass of their patient and/or athlete. The fact that DXA, anthropometry and BIA are not interchangeable, and neither anthropometry and BIA are valid with respect to DXA in general terms, forces the practitioner to always use the same method and formula to monitor the changes in fat mass of their patients/users over time. On the other hand, when seeking to compare an athlete with fat mass references in their discipline or a subject with the fat mass references for a non-communicable disease, the practitioner must ensure that the same formula and method used in the references study

are used. In addition, due to the important influence found with respect to sex, it is essential to have different working protocols and to use different methods depending on the sex of the person to be assessed.

This study also had some limitations. On the one hand, we used formulas that had not been validated only in the population analysed. However, this is often a standard practice in both clinical and research settings, a decision was made to apply them to discover what was occurring in the analysis. Another limitation was the use of a regression formulas to "convert" Kerr's formula dealing with "adipose tissue" to "fat mass." This was done to determine whether converting all methods and formulas to the same component would maintain the differences. Furthermore, with respect to BIA, it was done in a standing position with a model that did not give all the electrical properties in its report. Therefore, it has not been possible to calculate fat mass with different bioelectrical formulas for bioimpedance in this work, as was done for anthropometry (21) and as has been proposed that this should be done in previous studies with BIA (21). Finally, in the present investigation, the assessment of hydration status was evaluated to analyse its influence on the results found, but was not manipulated. Therefore, future research should manipulate hydration status to analyse its influence on the agreement and validity of anthropometry and BIA with respect to DXA (78, 80).

In conclusion, the formulas for fat mass assessment with anthropometry and BIA may not be valid with respect to the values reported with DXA, with the exception of Carter's and Forsyth's anthropometry formulas for general sample, and Evans's anthropometry formula for female sample. BIA could also be an alternative if what is needed is to assess fat mass in women as a group.

Data availability statement

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

Ethics statement

The studies involving humans were approved by the Ethics Committee from the Catholic University San Antonio of Murcia (Murcia, Spain) reviewed and authorized the protocol designed for data collection, considering the World Medical Association Code (CE062103). The studies were conducted in accordance with the local legislation and institutional requirements. The participants provided their written informed consent to participate in this study.

Author contributions

MM-C: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. MA-S: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. RV-C: Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

NB: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation. FE-R: Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Resources, Project administration, Funding acquisition, Conceptualization.

Funding

The author(s) declare that no financial support was received for the research, authorship, and/or publication of this article.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the participants and helpers who made this research possible. This study is part of the doctoral thesis of MM-C.

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.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Supplementary material

The Supplementary material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2024.1421950/full#supplementary-material>

SUPPLEMENTARY FIGURE S1
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in kg for the general sample.

SUPPLEMENTARY FIGURE S2
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in percentage for the general sample.

SUPPLEMENTARY FIGURE S3
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in kg in males.

SUPPLEMENTARY FIGURE S4
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in percentage in males.

SUPPLEMENTARY FIGURE S5
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in kg in females.

SUPPLEMENTARY FIGURE S6
Graphical representation of the means and standard deviations of fat mass in percentage in females.

Mecherques-Carini et al.

10.3389/fnut.2024.1421950

References

1. Carnero F, Alvarez-Cruz JR, Giraldez MA, Sardinha LB. La evaluación de la composición corporal "in vivo"; Parte I: Perspectiva histórica. *Nutr Hosp.* (2015) 31:1957–67. doi: 10.3305/nh.2015.31.5.8570
2. Ben Mansour G, Kacem A, Ishaq M, Grélot I, Platti F. The effect of body composition on strength and power in male and female students. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* (2021) 13:150. doi: 10.1186/s13102-021-00376-z
3. Flecher ER, Lovelick M, Coleman LC, Beals K, Nindl BC, Allison KE. Decreased percent body fat but not body mass is associated with better performance on combat fitness test in male and female marines. *J Strength Cond Res.* (2022) 37:887–93. doi: 10.1519/JSC.0000000000004335
4. Illüher M. Adipose tissue dysfunction in obesity. *Exp Clin Endocrinol Diabet.* (2009) 117:241–50. doi: 10.1055/s-0029-1192044
5. Komici K, D'Amico E, Verderosa S, Piomboni I, D'Addona C, Picerno V, et al. Impact of body composition parameters on lung function in athletes. *Nutrients.* (2022) 14:3844. doi: 10.3390/nu14183844
6. Maciejczyk M, Wlecek M, Szymura J, Strygala Z, Brown J.E. Influence of increased body mass and body composition on cycling anaerobic power. *J Strength Cond Res.* (2015) 29:58–65. doi: 10.1519/JSC.0000000000000727
7. Knechtel B, Tanda G. Marathon performance in relation to body fat percentage and training indices in recreational male runners. *Open Access J Sports Med.* (2013):141. doi: 10.2147/OAJSM.S44945
8. Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and differences between fat estimation formulas using kinanthropometry in a physically active population. *Appl. Sci.* (2022) 12:13043. doi: 10.3390/app122413043
9. Cruz A, Gómez C, Ronconi M, Vazquez E. La bioimpedancia eléctrica como método de estimación de la composición corporal. *Rev Andal Med Deport.* (2011) 4:17–28.
10. Jones LL, Cameron N. History, methods, and general applications of anthropometry in human biology. *Hum Evol Biol.* (2010) 2007:92–112. doi: 10.1017/CBO9780511781193.008
11. Shepherd JA, Ng BK, Sommer MJ, Heymsfield SB. Body composition by DXA. *Bone.* (2017) 104:101–5. doi: 10.1016/j.bone.2017.06.010
12. Aragon AA, Schoenfeld BJ, Wildman R, Kleiner S, VanDusseldorp T, Taylor L, et al. International society of sports nutrition position stand: diets and body composition. *J Int Soc Sports Nutr.* (2017) 14:16. doi: 10.1186/s12970-017-0174-y
13. Duran DL, Sherwood RJ, Czerwikowski SA, Lee M, Choh AC, Skerfving RM, et al. Body composition methods: comparisons and interpretation. *J Diabetes Sci Technol.* (2008) 2:1139–46. doi: 10.1177/193229680800200623
14. Esparza-Ros F, Vaquero-Cristóbal R, Mariell-Jones M. *International Standards for Anthropometric Assessment*, 20019. International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK): Murcia (2019).
15. Kasper AM, Langan C, Hudson JE, Brownlee TE, Harper LD, Naughton RJ, et al. Come back skinfolds, all is forgiven: a narrative review of the efficacy of common body composition methods in applied sports practice. *Nutrients.* (2021) 13:1075. doi: 10.3390/nu13041075
16. Campa E, Gobbo LA, Stagi S, Cyrino LT, Toselli S, Martini E, et al. Bioelectrical impedance analysis versus reference methods in the assessment of body composition in athletes. *Eur J Appl Physiol.* (2022) 122:561–89. doi: 10.1007/s00421-021-04879-y
17. Dellinger JR, Johnson BA, Benavides ML, Moore ML, Stratton MT, Harty PS, et al. Agreement of bioelectrical resistance, reactance, and phase angle values from supine and standing bioimpedance analyzers. *Physiol Meas.* (2021) 42:035003. doi: 10.1088/1361-6579/abef5a
18. Cormish BH, Thomas BJ, Ward LC. Improved prediction of extracellular and total body water using impedance loc generated by multiple frequency bioelectrical impedance analysis. *Phys Med Biol.* (1993) 38:337–46. doi: 10.1088/0031-9155/38/3/001
19. Lee LC, Hsieh KC, Wu CS, Chen YJ, Chiang J, Chen YY. Validity of standing posture eight-electrode bioelectrical impedance to estimate body composition in Taiwanese elderly. *Int J Gerontol.* (2014) 8:137–42. doi: 10.1016/j.ijge.2013.08.010
20. Lyons-Ried J, Ward LC, Kenaley T, Cutfield W. Bioelectrical impedance analysis—an easy tool for quantifying body composition in infancy? *Nutrients.* (2020) 12:920. doi: 10.3390/nu12040920
21. Petri C, Michel ML, Izzicupo P, Timperanza N, Lastrucci T, Vanni D, et al. Bioimpedance patterns and bioelectrical impedance vector analysis (BIVA) of body builders. *Nutrients.* (2023) 15:1606. doi: 10.3390/nu15071606
22. Vaquero-Cristóbal R. Assessing fat mass from a body composition perspective: a critical review. *Calc Clin Sport.* (2023) 184–13. doi: 10.12803/ccd.v18i56.2033
23. Wang Z, Pierson R, Heymsfield S. The five-level model: a new approach to organizing body composition research. *Am J Clin Nutr.* (1992) 56:19–28. doi: 10.1093/ajcn/56.1.19
24. Hill AM, LaForgia J, Coates AM, Buckley JD, Howe PRC. Estimating abdominal adipose tissue with DXA and anthropometry. *Obesity.* (2007) 15:504. doi: 10.1038/oby.2007.629
25. Campa E, Toselli S, Mazzilli M, Gobbo LA, Coratella G. Assessment of body composition in athletes: a narrative review of available methods with special reference to quantitative and qualitative bioimpedance analysis. *Nutrients.* (2021) 13:1620. doi: 10.3390/nu13051620
26. Vaquero-Cristóbal R, Calatayud-Moreira A, Esparza-Ros F, Barrigas C, Albaladejo-Saura M, Vletra F. Skinfolds compressibility and digital calliper's time response in skinfold measurement in male and female young adults. *J Int Soc Sports Nutr.* (2023) 20:2265888. doi: 10.1080/15502783.2023.2265888
27. Carlier J. *Physical Structure of Olympic Athletes. Part 2: The Montreal Olympic Games Anthropological Project*. Basel, Switzerland: Karger Publishers (1982)
28. Pulkner JA. *Physiology of swimming*. Res Q Am Assoc Health Phys Educ Recreat. (1966) 37:41–54. doi: 10.1080/10671188.1966.10614734
29. Evans EM, Rowe DA, Mistic MM, Prior BM, Argyrantonis SA. Skinfold prediction equation for athletes developed using a four-component model. *Med Sci Sports Exerc.* (2005) 37:2006–11. doi: 10.1249/01.mss.0000176682.54071.5c
30. Durin B, Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr.* (1973) 32:77–97. doi: 10.1079/BJN19740060
31. Hastuti J, Kagawa M, Byrne NM, Hills AP. Anthropometry to assess body fat in Indonesian adults. *Asia Pac J Clin Nutr.* (2018) 27:592–8. doi: 10.6133/apjcn.092017.02
32. Kaich FI, McArdle WD. Validity of body composition prediction equations for college men and women. *Am J Clin Nutr.* (1975) 28:105–9. doi: 10.1093/ajcn/28.2.105
33. Kerr D, Ross W. Fraccionamiento de la masa corporal: un nuevo método para utilizar en nutrición clínica y medicina deportiva. *Aquitas.* (1991) 28:175–88.
34. Prieto S, Pasquali M, Festa R, Mazza J. Comparison between anthropometric prediction of fat mass, using different equations and models. *Med Sci Sports Exerc.* (2022) 54:366. doi: 10.1249/01.mss.0000879656.11522.35
35. Vaquero-Cristóbal R, Albaladejo-Saura M, Luna-Badach AE, Esparza-Ros F. Differences in fat mass estimation formulas in physically active adult population and relationship with sums of skinfolds. *Int J Environ Res Public Health.* (2020) 17:1–13. doi: 10.3390/ijerph17217777
36. Casajus JA. Body fat percentage comparisons between four methods in young football players: are they comparable? *Nutr Hosp.* (2017) 34:1119–24. doi: 10.20960/nh.760
37. Tinsley GM, Morales E, Forsse JS, Grandjean FW. Impact of acute dietary manipulations on DXA and BIA body composition estimates. *Med Sci Sports Exerc.* (2017) 49:823–32. doi: 10.1249/MSS.0000000000001148
38. Schubert MM, Soay RF, Spain KK, Clarke HE, Taylor JK. Reliability and validity of various laboratory methods of body composition assessment in young adults. *Clin Physiol Funct Imaging.* (2019) 39:150–9. doi: 10.1111/cpf.12550
39. Arroyo M, Rocandío AM, Ansolagui L, Herrera H, Salces I, Raballo E. Comparison of predicted body fat percentage from anthropometric methods and from impedance in university students. *Br J Nutr.* (2004) 92:827–32. doi: 10.1079/BJN20041273
40. da Silva JSM, Biesek S, Wojciechowski AS, Borba VZC, Rabito EI, Gomes ARS, et al. Estimations of body fat by anthropometry or bioelectrical impedance differ from those by dual-energy X-ray absorptiometry in prefall community-dwelling older women. *Nutr Res.* (2021) 86:1–9. doi: 10.1016/j.nutres.2020.12.002
41. Aristizabal JC, Estrada-Restrepo A, García AG. Development and validation of anthropometric equations to estimate body composition in adult women. *Colomb Med.* (2018) 49:154–9. doi: 10.25100/cm.v49i2.3643
42. Bhalarao S, Kadam P. Sample size calculation. *Int J Ayurveda Res.* (2010) 1:55–7. doi: 10.4103/0974-7788.59946
43. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: Routledge (2013).
44. Koscielnik SB, Davy KP, Hedrick VE, Thomas DT, Davy BM. The validity of urine color as a hydration biomarker within the general adult population and athletes: a systematic review. *J Am Coll Nutr.* (2021) 40:172–9. doi: 10.1080/07315724.2020.1750073
45. Khlam U, Votkovicova L, Timpmann S, Ponlaga I, Ereltne J, Unt E, et al. Pre-practice hydration status in soccer (football) players in a cool environment. *Medicina.* (2018) 54:102. doi: 10.3390/medicina5406102
46. Esparza-Ros F, Moreira AC, Vaquero-Cristóbal R, Barrigas C, Albaladejo-Saura M, Vletra F. Differences between four skinfold callipers in the assessment of adipose tissue in young adult healthy population. *Nutrients.* (2022) 14:2085. doi: 10.3390/nu14102085
47. Vaquero-Cristóbal R, García Roca JA, Albaladejo-Saura M, Fernández-Alarcón M, Esparza F. Evolution in anthropometric variables related to training and nutritional parameters in ultra-endurance mountain runners. *Nutr Hosp.* (2019) 36:706–13. doi: 10.20960/nh.2333
48. Nana A, Slater GJ, Hopkins WG, Halson SL, Martin DT, West NP, et al. Importance of standardized DXA protocol for assessing physique changes in athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* (2016) 26:259–67. doi: 10.1123/ijsem.2013-0111
49. Schlierbauer J, Günther S, Haupt S, Zimmer RT, Herz D, Velt T, et al. Acute fluid intake impacts assessment of body composition via bioelectrical impedance analysis: A randomized, controlled crossover pilot trial. *Metabolites.* (2023) 13:473. doi: 10.3390/metabo13040473

50. Esparza-Ros F, Vaquero-Cristóbal R. *Antropometría: Fundamentos para la aplicación e interpretación*. Madrid, Spain: McGraw Hill. (2023). 1–237.
51. Gómez-Ambrosi J, Silva C, Catalán V, Rodríguez A, Galofré JC, Escalada J, et al. Clinical usefulness of a new equation for estimating body fat. *Diabetes Care*. (2012) 35:383–8. doi: 10.2337/dci11-1334
52. Forsyth LH, Stinning EW. The anthropometric estimation of body density and lean body weight of male athletes. *Med Sci Sports*. (1973) 5:174–80.
53. Bronck J, Keys A. Body fat in adult man. *Physiol Rev*. (1953) 33:245–325. doi: 10.1152/physrev.1953.33.3.245
54. Yuhazr MS. *Physical fitness manual*. Ontario: University of Western Ontario (1974).
55. Martin AD, Daniel MZ, Drinkwater DT, Clarys JP. Adipose tissue density, estimated adipose lipid fraction and whole body adiposity in male cadavers. *Int J Obes Relat Metab Disord*. (1994) 18:79–83. Available at: <http://europepmc.org/abstract/MED/8148928>
56. Snyder WS, Cook MI, Nasset ES, Karhausen LR, Howells GB, Tiplon IH. *Report of the task group on reference man*. Oxford: Pergamon Press (1975). 419–420
57. Holway E. Composición corporal en nutrición deportiva. In: *Nutrición aplicada al deporte*. 1st ed. Madrid, Spain: McGraw-Hill (2011). 195–226.
58. González-Ruiz K, Medrano M, Correa-Bautista J, García-Hermoso A, Prieto-Benavides D, Tordecilla-Sanders A, et al. Comparison of bioelectrical impedance analysis, slaughter skinfold thickness equations, and dual-energy X-ray absorptiometry for estimating body fat percentage in Colombian children and adolescents with excess of adiposity. *Nutrients*. (2018) 10:1086. doi: 10.3390/nu10081086
59. Rockmann RA, Dalton EK, Arabas JL, Jern L, Mayhew JL. Validity of arm-to-arm BIA devices compared to DXA for estimating % fat in college men and women. *Int J Exerc Sci*. (2017) 10:977–88.
60. Achamrah N, Collange G, Delay J, Rimbert A, Folepe V, Petit A, et al. Comparison of body composition assessment by DXA and BIA according to the body mass index: a retrospective study on 3655 measures. *PLoS One*. (2018) 13:e0200465. doi: 10.1371/journal.pone.0200465
61. Moeng-Mahlangu L, Moryeji MA, Reilly JJ, Kruger HS. Comparison of several prediction equations using skinfold thickness for estimating percentage body fat vs. body fat percentage determined by BIA in 6–8-year-old south African children: the BC-IT study. *Int J Environ Res Public Health*. (2022) 19:14531. doi: 10.3390/ijerph192114531
62. Segal KR, Gutin B, Presta E, Wang J, Van Itallie TB. Estimation of human body composition by electrical impedance methods: a comparative study. *J Appl Physiol*. (1985) 58:1565–71. doi: 10.1152/jappl.1985.58.5.1565
63. Khalil S, Mohktar M, Ibrahim F. The theory and fundamentals of bioimpedance analysis in clinical status monitoring and diagnosis of diseases. *Sensors*. (2014) 14:10895–928. doi: 10.3390/s140610895
64. Shirreffs SM, Maughan RJ. The effect of posture change on blood volume, serum potassium and whole body electrical impedance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. (1994) 69:461–3. doi: 10.1007/BF00865413
65. Ducharme JB, Clark C, Houck JM, Hall H, Gerard-Osbourne A, Gibson AL. Comparison of supine and vertical bioimpedance measurements in young adults. *Top Exerc Sci and Kinesiol*. (2022) 3 Available at: www.tesjournal.com
66. Thorland WG, Johnson GO, Tharp GD, Housh TJ, Cisar CJ. Estimation of body density in adolescent athletes. *Hum Biol*. (1984) 56:439–48.
67. Chang F, Varghese M, Singer K. Gender and sex differences in adipose tissue. *Curr Diab Rep*. (2018) 18:69. doi: 10.1007/s11892-018-1031-3
68. Karasargiou K, Smith SR, Greenberg AS, Fried SK. Sex differences in human adipose tissues—the biology of pear shape. *Biol Sex Differ*. (2012) 3:13. doi: 10.1186/2042-6410-3-13
69. Chang CS, Liu FT, Liang FW, Li CC, Sun ZL, Chang YE, et al. Effects of age and gender on body composition indices as predictors of mortality in middle-aged and old people. *Sci Rep*. (2022) 12:7912. doi: 10.1038/s41598-022-12048-0
70. Rodríguez-Sánchez N, Galloway SDR. Errors in dual energy X-ray absorptiometry estimation of body composition induced by hypohydration. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. (2015) 25:60–8. doi: 10.1123/ijsem.2014-0067
71. Gierach GEW, Charkeoulian N, Stearns RI, Casa DJ. Fluid balance and hydration considerations for women: review and future directions. *Sports Med*. (2020) 50:253–61. doi: 10.1007/s40279-019-01206-6
72. Aparicio-Ugarrta R, Luzzardo-Socorro R, Palacios G, del Mar BM, Julibert A, Tur JA, et al. Impact of physical activity and sedentarism on hydration status and liquid intake in Spanish older adults. The PHYSMED study. *Nutr Hosp*. (2016) 33:309. doi: 10.20960/nh.309
73. San Mauro Martín I, Garicano Vilar E, Romo Orzuco DA, Mendive Dubourdieu B, Paredes Barrio V, Rincón Barrado M, et al. Hydration status: influence of exercise and diet quality. *Am J Lifestyle Med*. (2019) 13:414–23. doi: 10.1177/1559827617711906
74. Puga AM, Lopez-Oliva S, Trives C, Parraerroyo T, Varela-Moreiras G. Effects of drugs and excipients on hydration status. *Nutrients*. (2019) 11:669. doi: 10.3390/nu11030669
75. Corvos CA, Rangel RD, Salazar AD. Concordance between two equations to estimate the percentage of body fat in competitive college athletes. *Nutr Clin Diet Hosp*. (2020) 40:127–32. doi: 10.12873/401corvos
76. Nickerson BS, Snarr RL, Ryan GA. Validity of foot-to-foot bioelectrical impedance for estimating body composition in NCAA division I male athletes: a 3-compartment model comparison. *J Strength Cond Res*. (2019) 33:3361–6. doi: 10.1519/JSC.0000000000002999
77. Campa F, Levi Micheli M, Pompignoli M, Cannataro R, Gulisano M, Toselli S, et al. The influence of menstrual cycle on bioimpedance vector patterns, performance, and flexibility in elite soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*. (2022) 17:58–66. doi: 10.1123/ijpp.2021-0135
78. Kerr A, Slater GJ, Byrne N. Impact of food and fluid intake on technical and biological measurement error in body composition assessment methods in athletes. *Br J Nutr*. (2017) 117:591–601. doi: 10.1017/S0007114517000551
79. Romanowski KL, Fradkin AJ, Dixon CB, Andreacchi JL. Effect of an acute exercise session on body composition using multi-frequency bioelectrical impedance analysis in adults. *J Sports Sci*. (2015) 33:171–8. doi: 10.1080/02643758.2015.104003
80. Ugras S. Evaluating of altered hydration status on effectiveness of body composition analysis using bioelectric impedance analysis. *Lithuan J Med*. (2020) 15:1741904. doi: 10.1080/19932820.2020.1741904

Artículo 3


Mecherques-Carini, M., Albaladejo-Saura, M., Esparza-Ros, F. et al. Validity between dual-energy x-ray absorptiometry and bioelectrical impedance for segmental fat analysis and a novel low-cost model developed using anthropometry in young adults. *J Transl Med* 23, 40 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-06062-1>

RESEARCH

Open Access



Validity between dual-energy x-ray absorptiometry and bioelectrical impedance for segmental fat analysis and a novel low-cost model developed using anthropometry in young adults

Malek Mecherques-Carini¹, Mario Albaladejo-Saura^{1,2*} , Francisco Esparza-Ros^{1*}, Nicolás Baglietto¹ and Raquel Vaquero-Cristóbal³

Abstract

Background Accurate body fat distribution assessment is essential for managing cardiovascular disease and metabolic disorders. Although several methods are available for segmental fat analysis, few studies have examined the validity of affordable methods such as Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) against the reference method, Dual-Energy X-ray Absorptiometry (DXA). This study aimed to assess the validity of BIA as compared to DXA for segmental fat mass assessment, and to develop anthropometric multivariate regression models that offer a cost-effective alternative for health professionals in clinical and public health settings.

Methods Cross-sectional study that included 264 young adults (161 males, mean age = 23.04 ± 5.61 years; and 103 females, mean age = 22.29 ± 5.98 years). Segmental fat mass was measured using DXA and BIA, and anthropometric measurements were collected following the ISAK protocol.

Results Significant differences were found between DXA and BIA for segmental fat mass ($p < 0.001$). Sex significantly influenced the results ($p < 0.05$), while BMI and hydration status had no significant impacts. The Bland-Altman analysis revealed significant differences ($p < 0.001$) between BIA and DXA for fat mass in the upper and lower limbs. Trunk fat mass also differed significantly in males and females ($p < 0.001$), except for the overall sample ($p = 0.088$). Anthropometric multivariate regression models showed a high predictive accuracy for both females ($R^2 = 0.766 - 0.910$; $p < 0.001$) and males ($R^2 = 0.758 - 0.887$; $p < 0.001$). Key predictors of segmental fat mass included body mass ($r = 0.606 - 0.867$; $p < 0.001$), skinfold thickness ($r = 0.688 - 0.893$; $p < 0.001$), and waist girth ($r = 0.883 - 0.810$; $p < 0.001$). Peripheral skinfolds were highly predictive for upper and lower limbs, while waist girth was relevant for trunk fat mass.

*Correspondence:

Mario Albaladejo-Saura
mdalbaladejosaura@ucam.edu
Francisco Esparza-Ros
fesparza@ucam.edu

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s) 2024. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Conclusions DXA and BIA are not interchangeable for segmental fat analysis due to the significant differences observed. However, the anthropometric multivariate regression models developed provide a cost-effective and reliable alternative for predicting segmental fat mass in clinical settings where DXA is unavailable.

Trial registration Not applicable.

Keywords Body composition, Fat mass, Body segment, Dual-energy x-ray absorptiometry, Bioelectrical impedance analysis, Anthropometry, Health

Introduction

Accurately quantifying body fat is critical in public health. It provides essential information for strategies aimed at mitigating the risk of chronic diseases such as obesity, diabetes, and cardiovascular conditions [1–3]. Furthermore, understanding fat distribution, beyond total body fat, is essential due to its heterogeneous distribution throughout the body, which can lead to varying health outcomes [4, 5]. Notably, visceral fat accumulation, particularly in the abdominal area, is strongly associated with metabolic and cardiovascular diseases [6, 7], and challenges in balance and stability, increasing the risk of falls [8]. Additionally, excess fat accumulation in the trunk or lower limbs can impair daily activities, limiting autonomy and diminishing overall functional capacity [9].

Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA), bioelectrical impedance analysis (BIA), and anthropometry are the most commonly used methods for assessing body fat [10, 11]. DXA is widely regarded as the benchmark due to its high accuracy, particularly in the assessment of bone mineral content. However, its high operational costs and limited accessibility restrict its use to well-funded institutions [10, 12]. BIA is a more affordable and portable alternative that provides segmental data, but is limited by its reliance on pre-established equations, which may reduce accuracy in certain populations [13–15]. In addition, its reliability may depend on the technology used, the position in which the assessment is performed, or differences in the placement of the electrodes [16, 17]. Anthropometry, which estimates subcutaneous adiposity through skinfold measurements, is an accessible and cost-effective method for assessing body fat [18]. Its affordability and portability make it especially valuable in both athletic and clinical settings [15]. Furthermore, it can be consistently replicated by trained practitioners following standardized protocols [19].

BIA and DXA devices frequently provide detailed segmental reports on fat and other body components, highlighting their usefulness in clinical and sports studies [20, 21]. While numerous studies have validated BIA against DXA for overall fat estimation [22–24], research at the segmental level remains scarce. Consequently, the validity of BIA as compared to DXA for segmental fat analysis is not well established. In contrast, anthropometry

has received limited attention in segmental fat analysis.

To date, only two studies have attempted to estimate segmental fat using anthropometry, both of which faced significant methodological shortcomings [25, 26]. In one study, some of the included anthropometric variables were not part of the standardized International Society for the Advancement on Kinanthropometry (ISAK) protocol; and it included the use of only 31 anthropometric variables, omitting key measurements outlined in the ISAK protocol, which likely reduced the accuracy of their predictive models [25]. The other study employed a broad age range (21–82 years), introducing variability in fat distribution across life stages and limiting the applicability of their findings to more homogeneous populations [26]. Additionally, both studies exclusively measured the right side of the body, failing to capture potential asymmetries between dominant and non-dominant limbs [25, 26]. To the authors' knowledge, no study has yet conducted a comprehensive analysis of segmental fat using anthropometry in a large, homogeneous young sample, with measurements taken bilaterally and following the updated ISAK protocol. This gap highlights the need for further research to explore the potential of anthropometry as a reliable tool for segmental fat estimation.

In addition, differences in fat distribution related to sex, adiposity accumulation and hydration status, should be taken into account when performing segmental fat analysis. Not surprisingly, previous studies have demonstrated the influence of this factor on the comparability between different methods of estimating fat mass from a global point of view [27–30]. With respect to sex-related differences, males typically exhibit a visceral fat accumulation pattern, often described as an 'apple-shaped' distribution, while females tend to have a 'pear-shaped' pattern characterized by subcutaneous fat predominantly stored around the hips and thighs, and a lower visceral fat accumulation, especially in their pre-menopausal stage [29, 31]. Furthermore, BMI, a widely recognized indicator of overall adiposity, has been shown to significantly affect the precision of fat mass estimates and agreement with the different body composition calculation methods, particularly in individuals with extreme body mass indices [32]. Finally, hydration status has been shown to have a direct impact on the electrical properties measured by BIA, as fluctuations in total body water alter resistance

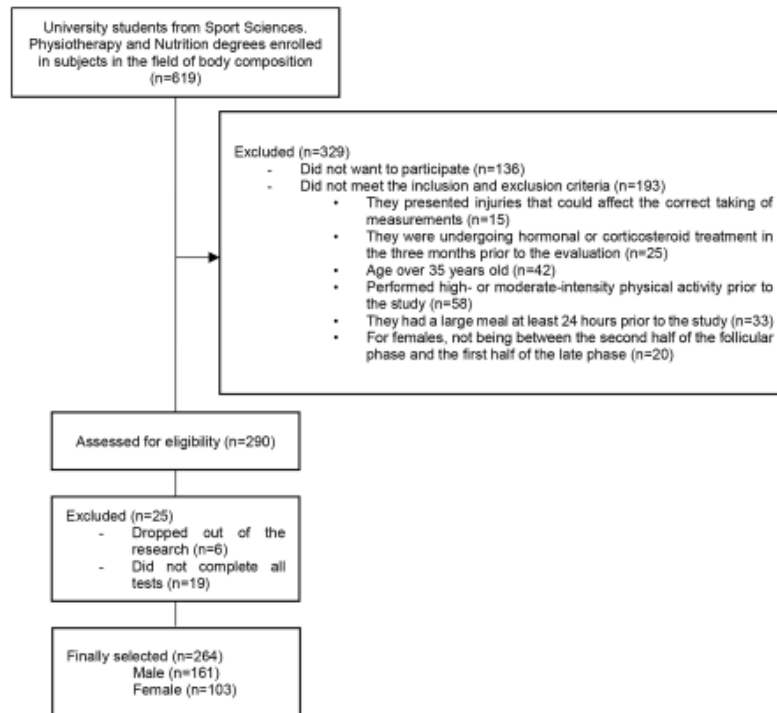


Fig. 1 Participants' flow chart

To determine the hydration status of the participants, urine specific gravity (USG) was measured using a MASTER-URC/Na refractometer (Atago, Japan) (mean = 1020.26 ± 8.52 specific gravity). This assessment followed the protocol outlined in previous research, which involves a urine sample collected in the 30 min prior to the measurements in a sterile, unused container. Hydration status was then classified according to the following USG criteria: well-hydrated (USG: ≤ 1.020), moderately dehydrated (USG: $1.021 - 1.024$), and significantly dehydrated (USG: > 1.024). These categories are based on established urinary density benchmarks [37, 38].

The participants also completed a questionnaire on sociodemographic data, including health status, medication, menstrual cycle information for females, dietary intake (24-hour recall), and exercise habits (48-hour recall) [39]. Furthermore, information on regular sports supplement use was also collected using a questionnaire

that had been previously used in research for similar purposes [22].

Body composition measurements using DXA, BIA, and anthropometry were performed in a single session in a controlled environment at 24°C . Tests were conducted in a randomized order, with each measurement taken by the same technician to eliminate inter-rater variability.

Dual-energy x-ray absorptiometry (DXA)

Segmental fat mass was assessed using a Hologic Horizon system (Hologic Inc., Bedford, MA, USA) which was calibrated daily using an anthropometric spine phantom supplied by the manufacturer. All the measurements were taken by the same experienced technician who was specialized in body composition analysis following standardized protocols, including the removal of all metallic items and ensuring that participants urinated within 30 min before the assessment [40, 41]. The participants were positioned with their hands in a lateral position,

and feet at a 15° internal angle [42]. To measure subjects whose stretch stature was greater than the scanner dimensions, sum-of-scans protocols were used following the protocol used in previous research [42]. Data analysis was performed using the Hologic APEX 13.6.0.5:5 software, and segmental fat mass (right and left upper limbs, trunk and right and left lower limbs) in kg and percentage was measured using the Hologic software (Hologic Inc., Bedford, MA, USA).

Bioelectrical Impedance analysis (BIA)

Bioelectrical impedance analysis (BIA) measurements were taken using a TANITA MC-780-MA scale (Tanita Corporation, Tokyo, Japan), a device that utilizes segmental multi-frequency analysis through eight electrodes (measuring at 5 kHz, 50 kHz, and 250 kHz). The precision of this device has been analyzed in previous studies ($p < 0.001$; $r = 0.852$; ICC 95% CI = 0.84 (0.75–0.90)) [43, 44]. The technical error of measurement (TEM) of the TANITA MC-780-MA has been reported to range between 1.5% and 2.5%, depending on the population and body segment being evaluated, highlighting the precision of the TANITA MC-780-MA scale in both total and segmental body fat assessments [44].

The participants stood on the device, following the technical instructions provided in the user manual, which included the removal of all metallic items and urination within 30 min prior to assessment [45]. The participants wore sports tights to minimize interference with the readings [33].

The TANITA MC-780-MA scale measures raw bioimpedance parameters, including resistance, reactance, and phase angle, which are key variables for determining total body water and estimating fat mass values. The use of multiple frequencies enhances the device's ability to differentiate between intracellular and extracellular water, which is crucial for providing a more complete assessment of body composition [34]. However, this device does not provide this raw data. On the contrary, the TANITA MC-780-MA software provided both total and segmental (right and left upper limbs, trunk and right and left lower limbs) fat mass data in kilograms and percentages. The equation used was chosen by the software itself, based on the characteristics of the individual.

The device used underwent a systematic calibration to ensure the validity of its measurements. An automatic calibration was performed before each session, and a periodic verification using standardized resistors was conducted to maintain precision. These procedures followed international guidelines for BIA devices, minimizing potential errors and ensuring that the measurements remained accurate over time.

The TANITA MC-780-MA scale, as other BIA devices, may be sensitive to daily factors such as hydration status

[22]. While the device provides an estimate of both intracellular and extracellular water, variations in body water levels—due to factors such as physical activity, dehydration, or food intake—have been shown to influence the accuracy of the fat mass estimations. In this study, these variables were supervised by ensuring that participants followed a standardized protocol, but it is still a factor that could affect results in other settings [45].

Anthropometry

Anthropometric measurements were performed by a level 3 anthropometrist accredited by the ISAK [19]. All indications from the ISAK protocol were followed to measure both the right and left sides of the body. One researcher measured the right side and another the left side, maintaining their positions during all the measurements to avoid inter-rater TEM. A complete measurement profile was used, which included basic measurements (body mass, stretch stature, sitting height, and arm span), skinfolds (triceps, subscapular, biceps, iliac crest, supraspinale, abdominal, thigh, and calf), girths (head, neck, arm relaxed, arm flexed and tensed, forearm, wrist, chest, waist, hips, thigh 1 cm gluteal, thigh middle, calf and ankle), lengths and heights (acromiale-radiale, radiale-styloid, midstyloid-dactylion, iliospinale height, trochanterion height, trochanterion-tibiale laterale, tibiale laterale height, foot, and tibiale mediale-sphyrion tibiale), breadths and depths (biacromial, antero-posterior abdominal depth, biiliocrystal, transverse chest, antero-posterior chest depth, humerus, bi-styloid, femur and bimalleolar). Measurements were taken twice, and if discrepancies exceeded 1% for basic measurements or 5% for skinfolds, a third measurement was taken. The final value used for analysis was the mean of two measurements or the median when three measurements were taken. The intra-evaluator technical error of measurement (TEM) was 0.01% for basic measurements, 1.12% for skinfolds, 0.6% for girths, and 0.3% for lengths and heights and 0.4% for breadths and depths.

The instruments used included a TANITA MC-780-MA scale (Tanita Corporation, Tokyo, Japan), with an accuracy of 0.1 mm, for body mass; a SECA portable stadiometer (SECA, Hamburg, Germany), with an accuracy of 0.1 cm, for stretch stature and sitting height; a Harpenden caliper (Harpenden, London, UK), with an accuracy of 0.2 mm, for skinfolds; an inextensible tape with an accuracy of 0.1 cm for girths (Lufkin, USA), a segmometer for lengths and heights with an accuracy of 0.1 cm (Cescor, Brazil); and large and small sliding calipers for breadths with an accuracy of 0.1 cm (Realmet, Spain).

Statistical analysis

The normal distribution of the variables was assessed using the Kolmogorov-Smirnov test, as well as with the analysis of kurtosis and skewness. Levene's test was performed to evaluate the homogeneity of the variances at the beginning of the study. The analysis indicated a platykurtic distribution for all variables (-0.34 to -0.597) and a symmetric tendency (0.034 to -0.067). The Kolmogorov-Smirnov test showed that the data had a normal distribution ($p < 0.067$ -0.200), and Levene's test showed the homogeneity of the variances ($F = 0.191$ to 8.550; $p = 0.084$ to 0.999). Given the normality and homogeneity of the data, parametric tests were deemed appropriate. Descriptive statistics were computed for the analyzed variables. The differences between the fat mass segmental results, depending on the method used, were examined using a repeated-measures ANOVA. A repeated-measures ANCOVA was used to evaluate the impact of the variables "BMI", "sex", and "hydration status" on the observed differences. The effect size for pairwise comparisons was calculated using partial Eta-squared (η^2_p). To assess the robustness of the data, 95% confidence intervals (95% CI) were calculated for all analyses. The Bland-Altman test was used to determine the validity of BIA's fat mass segmental values (right and left upper limbs, trunk and right and left lower limbs) in kg as compared to DXA values. The trend to overestimate or underestimate the values with respect to the reference method and the multivariate regression equation for the model was also calculated.

The correlation between the DXA-measured fat mass in kg and anthropometric measurements was evaluated using both Pearson's and partial correlation tests for male and female subgroups. Partial correlations were calculated to control for the influence of BMI and hydration status, ensuring that the observed associations were not affected by these variables. Subsequently, a multivariate stepwise regression was performed with the variables that demonstrated significant correlations, to identify which anthropometric variables could predict the fat mass values of the left and right upper limbs, trunk, and right and left lower limbs depending on sex. The multicollinearity of the variables in the different models was also analyzed using the variance inflation factor (VIF). Based on established guidelines in the literature, a VIF threshold of ≤ 5 was used to confirm the absence of significant multicollinearity; a range between 5 and 10 was considered a moderate collinearity, while a significant collinearity was considered if the $VIF > 10$ [46].

The MedCalc Statistical Software v.20.106 (Maraikere, Belgium) was used to perform the Bland-Altman test. The rest of the statistical analyses were performed using SPSS software (v.23. IBM, Endicott, NY, USA). The

significance level for all statistical tests was set a priori at $p \leq 0.05$.

Results

Descriptive analysis

The descriptive statistics for fat mass kilograms and percentages across body segments, measured by DXA and BIA, are presented in Table 1. In the general sample, fat mass in the right upper limb was 0.92 ± 0.37 kg by DXA and 1.10 ± 0.40 kg by BIA; in the left upper limb, it was 0.94 ± 0.39 kg by DXA and 1.12 ± 0.42 kg by BIA; in the trunk, it was 7.80 ± 3.61 kg by DXA and 10.23 ± 4.07 kg by BIA; in the right lower limb, it was 3.95 ± 1.41 kg by DXA and 4.25 ± 1.58 kg by BIA; and in the left lower limb, it was 3.85 ± 1.38 kg by DXA and 4.15 ± 1.53 kg by BIA. Regarding the percentage of fat mass, in the right upper limb, it was $4.96 \pm 0.70\%$ by DXA and $6.03 \pm 0.85\%$ by BIA; in the left upper limb, it was $5.05 \pm 0.68\%$ by DXA and $6.20 \pm 0.87\%$ by BIA; in the trunk, it was $41.42 \pm 5.85\%$ by DXA and $49.57 \pm 7.29\%$ by BIA; in the right lower limb, it was $21.58 \pm 3.11\%$ by DXA and $23.97 \pm 3.85\%$ by BIA; and in the left lower limb, it was $21.04 \pm 3.14\%$ by DXA and $23.54 \pm 3.79\%$ by BIA).

Analysis of differences in fat mass (kg and percentage) by body segments between DXA and BIA

Table 2 presents the results of the ANOVA and ANCOVA analyses performed to evaluate the effects of the covariates BMI, hydration status, and sex on segmental fat mass estimation in both kilograms (kg) and percentage (%), using DXA and BIA.

Significant differences between DXA and BIA were observed in the general sample for most segments when estimating fat mass in both kg and percentage, reflecting small to moderate effect sizes ($p = 0.000$ -0.024; $\eta^2_p = 0.019$ -0.073). In the male subgroup, significant differences in fat mass percentage were detected in all segments, with small to large effect sizes ($p = 0.000$ -0.007; $\eta^2_p = 0.038$ -0.154). For females, significant differences were found in absolute fat mass for the right and left lower limbs, with a small effect size ($p = 0.018$ -0.020; $\eta^2_p = 0.030$ -0.034), and in the fat mass percentage of the left upper limb, with a moderate effect size ($p = 0.004$; $\eta^2_p = 0.043$).

Sex showed significant effects on fat mass estimation in multiple segments. For fat mass in kg, significant effects were observed, with a small effect size for the right upper limb ($p = 0.002$; $\eta^2_p = 0.045$), a moderate effect size for the left upper limb ($p = 0.000$; $\eta^2_p = 0.078$), and a large effect size for the trunk ($p = 0.000$; $\eta^2_p = 0.199$). When considering fat mass percentage, significant effects were found, showing moderate to large effect sizes for the right upper limb ($p = 0.005$; $\eta^2_p = 0.037$), left upper limb ($p = 0.000$; $\eta^2_p = 0.083$), trunk ($p = 0.000$; $\eta^2_p = 0.463$), right lower

Table 1 Descriptive analysis of kg and percentages of fat mass by body segments estimated by DXA and BIA in the general sample and divided by sex

Variable	General sample (n=264)		Male sample (n=161)		Female sample (n=103)	
	Mean ± SD	Min.-Max.	Mean ± SD	Min.-Max.	Mean ± SD	Min.-Max.
Body mass (kg)	71.55 ± 13.93	42.54;111.5	78.37 ± 11.47	56.40;111.50	60.94 ± 10.33	42.54;102.80
Stretch Stature (cm)	172.46 ± 9.58	147.44;198.4	177.90 ± 7.02	161.54;198.40	163.97 ± 6.33	147.44;180.14
BMI	23.91 ± 3.42	16.16;36.75	24.77 ± 3.18	18.37;36.75	22.58 ± 3.36	16.16;36.75
Sitting height (cm)	91.15 ± 4.53	80.14;101.29	93.60 ± 3.43	85.60;101.29	87.33 ± 3.20	80.14;95.00
Arm span (cm)	174.80 ± 11.37	147.09;203.99	181.38 ± 8.10	162.70;203.99	164.54 ± 7.44	147.09;180.14
% DXA right upper limb	4.96 ± 0.70	2.49;8.94	4.96 ± 0.67	3.72;8.94	4.96 ± 0.74	2.49;6.80
% DXA left upper limb	5.05 ± 0.68	3.50;8.80	5.00 ± 0.65	3.85;8.80	5.13 ± 0.73	3.50;7.08
% DXA trunk	41.42 ± 5.85	25.83;56.18	43.64 ± 4.60	33.07;56.18	37.95 ± 5.92	25.83;53.58
% DXA right lower limb	21.58 ± 3.11	14.98;30.16	20.18 ± 2.29	14.98;30.16	23.75 ± 2.97	14.98;30.16
% DXA left lower limb	21.04 ± 3.14	14.39;30.90	19.66 ± 2.38	14.39;30.90	23.19 ± 2.96	14.39;30.90
% BIA right upper limb	5.48 ± 0.64	5.57;8.10	5.57 ± 0.70	3.57;8.10	5.34 ± 0.52	3.57;6.77
% BIA left upper limb	5.75 ± 0.74	3.90;9.25	5.87 ± 0.83	4.08;9.25	5.57 ± 0.53	3.90;6.89
% BIA trunk	53.32 ± 10.28	17.18;68.51	59.86 ± 4.28	40.00;68.51	43.12 ± 8.44	17.18;68.47
% BIA right lower limb	17.62 ± 5.45	7.40;37.50	14.37 ± 3.01	7.40;37.50	22.70 ± 4.42	7.40;37.50
% BIA left lower limb	17.86 ± 5.34	7.40;37.50	14.73 ± 2.96	7.40;37.50	22.74 ± 4.51	7.40;37.50
Kg. DXA right upper limb	0.92 ± 0.37	0.30;2.51	0.84 ± 0.33	0.30;2.22	1.03 ± 0.40	0.30;2.51
Kg. DXA left upper limb	0.94 ± 0.39	0.31;2.51	0.85 ± 0.35	0.31;2.26	1.07 ± 0.41	0.38;2.51
Kg. DXA trunk	7.80 ± 3.61	2.63;25.88	7.62 ± 3.54	2.75;25.88	8.07 ± 3.73	2.63;23.06
Kg. DXA right lower limb	3.95 ± 1.41	1.13;8.65	3.44 ± 1.31	1.13;8.65	4.75 ± 1.16	2.26;8.57
Kg. DXA left lower limb	3.85 ± 1.38	1.06;8.65	3.35 ± 1.29	1.06;8.65	4.64 ± 1.14	2.29;8.09
Kg. BIA right upper limb	0.80 ± 0.33	0.10;2.70	0.75 ± 0.28	0.10;1.80	0.87 ± 0.38	0.20;2.70
Kg. BIA left upper limb	0.83 ± 0.32	0.10;2.70	0.79 ± 0.28	0.10;1.80	0.90 ± 0.37	0.20;2.70
Kg. BIA trunk	7.98 ± 3.80	1.00;26.70	8.41 ± 3.81	1.00;26.70	7.30 ± 3.70	1.10;20.50
Kg. BIA right lower limb	2.55 ± 1.16	0.40;8.10	1.94 ± 0.77	0.40;5.40	3.50 ± 1.03	1.20;8.10
Kg. BIA left lower limb	2.58 ± 1.15	0.40;8.10	1.99 ± 0.78	0.40;5.60	3.50 ± 1.03	1.20;8.10

Kg: Kilogram; %: percentage; BMI: Body Mass Index; DXA: Dual-energy X-ray Absorptiometry; BIA: Bioelectrical Impedance

limb ($p=0.000$; $\eta^2p=0.314$), and left lower limb ($p=0.000$; $\eta^2p=0.288$).

BMI significantly influenced fat mass estimation in the general sample for the lower limbs and trunk in kg, with small effect sizes ($p=0.007-0.043$; $\eta^2p=0.020-0.030$). Additionally, BMI had a significant impact on fat mass percentage, showing small to moderate effect sizes in the right and left upper limbs ($p=0.000-0.011$; $\eta^2p=0.027-0.071$) and in the trunk ($p=0.004$; $\eta^2p=0.040$). When analyzed separately by sex, BMI showed a significant effect in males for trunk fat mass in kg, with a small effect size ($p=0.004$; $\eta^2p=0.039$). Significant moderate effects were observed for the right ($p=0.000$; $\eta^2p=0.086$) and left lower limbs ($p=0.000$; $\eta^2p=0.063$). For fat mass percentage, BMI had a significant small effect on the right upper limb ($p=0.004$; $\eta^2p=0.038$) and trunk ($p=0.004$; $\eta^2p=0.039$), while the left upper limb showed a moderate effect size ($p=0.000$; $\eta^2p=0.062$). In females, BMI significantly affected the fat mass percentage of the left upper limb, with a small effect size ($p=0.031$; $\eta^2p=0.025$).

No significant effects of hydration status were observed for any segment in the general sample ($p=0.284-0.971$; $\eta^2p<0.006$) or when the sample was stratified by sex ($p=0.161-0.971$; $\eta^2p<0.009$).

Bland-Altman analysis of agreement between DXA and BIA

Table 3 presents the Bland-Altman analysis results, showing the agreement between DXA and BIA for segmental fat mass measurements in kilograms across the right and left upper limbs, trunk, and lower limbs. To ensure the robustness of the findings, the Bland-Altman analysis was supplemented by confidence interval assessments, with narrower ranges indicating a higher precision. For the general sample, the limits of agreement for trunk segment measurements ranged from -3.53 to 3.17 , being the widest interval, while the right lower limb showed a narrower range (-0.27 to 3.08). Similar trends were observed in the segmented analyses by sex, with the trunk consistently exhibiting the broadest limits of agreement across all groups.

Using DXA as the reference method, significant differences ($p<0.001$) were observed between BIA and DXA for fat mass estimation in most of the segments analyzed for the overall sample, as well as in males and females separately.

The mean differences indicated a consistent overestimation by BIA for all limbs (mean difference = -1.40 kg to 0.10 kg; limits of agreement: -0.38 to 3.08) in the general sample. For males, BIA overestimated the values in

Table 2 Analysis of differences in fat mass (kg and percentage) by body segments between DXA and BA for the general sample and divided by sex

	ANOVA			Variable-BMI			Variable-Hydration Status			Variable-Sex		
	F	P	η^2_p	F	P	η^2_p	F	P	η^2_p	F	P	η^2_p
General sample (n=264)												
Right upper limb fat mass (kg)	2760	0.098	0.011	0.007	0.932	0.000	0.001	0.971	0.000	9371	0.002	0.037
Left upper limb fat mass (kg)	0163	0.687	0.001	1.628	0.203	0.006	0.006	0.684	0.001	18276	0.000	0.666
Trunk fat mass (kg)	5142	0.024	0.019	1.640	0.202	0.006	0.129	0.719	0.000	52496	0.000	0.168
Right lower limb fat mass (kg)	0038	0.846	0.000	7.489	0.007	0.028	1.153	0.284	0.004	1867	0.173	0.007
Left lower limb fat mass (kg)	0385	0.536	0.001	4.155	0.043	0.016	0.703	0.402	0.003	1865	0.173	0.007
Right upper limb fat mass (%)	8802	0.003	0.033	6.594	0.011	0.025	0.135	0.714	0.001	7914	0.005	0.030
Left upper limb fat mass (%)	20570	0.000	0.073	16.990	0.000	0.061	0.012	0.911	0.000	19998	0.000	0.071
Trunk fat mass (%)	16345	0.000	0.059	8.531	0.004	0.032	0.382	0.537	0.001	186500	0.000	0.418
Right lower limb fat mass (%)	0265	0.382	0.003	0.401	0.527	0.002	0.421	0.517	0.002	102901	0.000	0.284
Left lower limb fat mass (%)	0506	0.478	0.002	0.503	0.479	0.002	0.151	0.698	0.001	89298	0.000	0.257
Males (n=161)												
Right upper limb fat mass (kg)	0036	0.850	0.000	0.513	0.475	0.003	0.377	0.540	0.002			
Left upper limb fat mass (kg)	0442	0.507	0.003	1.772	0.185	0.011	0.135	0.714	0.001			
Trunk fat mass (kg)	3630	0.059	0.022	8.657	0.004	0.052	0.074	0.787	0.000			
Right lower limb fat mass (kg)	2206	0.139	0.014	18.025	0.000	0.102	0.109	0.742	0.001			
Left lower limb fat mass (kg)	1134	0.289	0.007	13.473	0.000	0.079	0.001	0.970	0.000			
Right upper limb fat mass (%)	10235	0.002	0.061	8.385	0.004	0.050	1.982	0.161	0.012			
Left upper limb fat mass (%)	18591	0.000	0.105	13.477	0.000	0.080	1.335	0.250	0.008			
Trunk fat mass (%)	46079	0.000	0.229	8.411	0.004	0.051	0.015	0.904	0.000			
Right lower limb fat mass (%)	8145	0.005	0.049	0.290	0.591	0.002	0.354	0.553	0.002			
Left lower limb fat mass (%)	7438	0.007	0.045	0.408	0.524	0.003	0.009	0.924	0.000			
Females (n=103)												
Right upper limb fat mass (kg)	1971	0.163	0.019	0.371	0.544	0.004	0.557	0.457	0.006			
Left upper limb fat mass (kg)	0090	0.765	0.001	0.248	0.620	0.002	1.250	0.266	0.012			
Trunk fat mass (kg)	0121	0.729	0.001	2.008	0.160	0.020	0.422	0.517	0.004			
Right lower limb fat mass (kg)	5612	0.020	0.053	0.595	0.442	0.006	1.096	0.298	0.011			
Left lower limb fat mass (kg)	5777	0.018	0.055	1.168	0.282	0.012	1.058	0.306	0.010			
Right upper limb fat mass (%)	2475	0.119	0.024	0.505	0.479	0.005	1.310	0.255	0.013			
Left upper limb fat mass (%)	8833	0.004	0.081	4.764	0.031	0.045	1.673	0.199	0.016			
Trunk fat mass (%)	2929	0.090	0.026	1.542	0.217	0.015	0.589	0.445	0.006			
Right lower limb fat mass (%)	0248	0.620	0.002	0.128	0.722	0.001	0.102	0.750	0.001			
Left lower limb fat mass (%)	0063	0.802	0.001	0.111	0.740	0.001	0.202	0.654	0.002			

kg: kilogram; %: percentage

Table 3 Bland–Altman results for the agreement between DXA and BIA for estimating kilograms of fat mass in each segment for the general sample and divided by sex

	Mean diff.	95% CI	95% Limits of agreement		p	Regression equation	p
			Lower limit	Upper limit			
General sample (n = 264)							
Right upper limb	0.11	0.09 to 0.14	-0.26	0.50	<0.001	y=0.004687+0.1322*x	0.0002
Left upper limb	0.10	0.08 to 0.13	-0.30	0.51	<0.001	y=-0.06366+0.1915*x	<0.0001
Trunk	-0.18	-0.38 to 0.02	-3.53	3.17	0.088	y=0.2458+0.05403*x	0.0645
Right lower limb	1.40	1.30 to 1.50	-0.27	3.08	<0.001	y=0.7163+0.2115*x	<0.0001
Left lower limb	1.27	1.17 to 1.37	-0.38	2.93	<0.001	y=0.6351+0.1986*x	<0.0001
Males (n = 161)							
Right upper limb	0.08	0.057 to 0.11	-0.29	0.46	<0.001	y=-0.05551+0.1783*x	0.0004
Left upper limb	0.06	0.033 to 0.09	-0.34	0.47	0.001	y=-0.1309+0.2382*x	<0.0001
Trunk	-0.78	-1.03 to -0.54	-3.86	2.28	<0.001	y=-0.1613+0.07824*x	0.0228
Right lower limb	1.50	1.36 to 1.63	-0.24	3.24	<0.001	y=-0.07568+0.5850*x	<0.0001
Left lower limb	1.36	1.22 to 1.49	-0.33	3.06	<0.001	y=-0.1047+0.5485*x	<0.0001
Females (n = 103)							
Right upper limb	0.16	0.13 to 0.20	-0.19	0.53	<0.001	y=0.1087+0.06426*x	0.196
Left upper limb	0.17	0.13 to 0.20	-0.21	0.55	<0.001	y=0.07246+0.09989*x	0.0499
Trunk	0.78	0.49 to 1.07	-2.12	3.69	<0.001	y=0.6774+0.01434*x	0.7272
Right lower limb	1.24	1.09 to 1.40	-0.28	2.77	<0.001	y=0.7338+0.1251*x	0.1063
Left lower limb	1.13	0.97 to 1.28	-0.44	2.70	<0.001	y=0.7337+0.09807*x	0.2293

all limbs (mean difference=0.06 kg to 1.50 kg; limits of agreement: -0.34 to 3.24), and underestimated the trunk value (mean difference = -0.78 kg; limits of agreement: -3.86 to 2.28). For females, BIA overestimated values both in the trunk and limbs (mean difference=0.16 kg to 1.24 kg; limits of agreement: -2.12 to 3.69). The broad limits of agreement highlight the substantial variability between methods, reinforcing the non-interchangeability between DXA and BIA, particularly in the upper and lower limbs.

Generation of predictive models for the analysis of segmental body composition by anthropometry

In Tables 4 and 5, the Pearson and partial correlation analyses revealed strong associations between anthropometric variables and DXA-measured segmental fat mass across both sexes. After controlling for BMI and hydration status, the correlations generally remained significant, although the strength of some associations was slightly reduced.

These analyses served as the basis for developing the predictive models. The stepwise multivariate regression method ensured that only significant variables were included in the models, with multicollinearity tested. Between one and six models were found for the fat mass in each segment (Tables 6 and 7), with R^2 values ranging from 0.758 to 0.887 for males ($p < 0.001$) and between 0.766 and 0.910 for females ($p < 0.001$), demonstrating strong predictive capacities.

In the case of the upper limbs in the sample of males, four multivariate regression models were obtained

($R^2=0.758-0.812$; $p < 0.001$). Trunk and left lower limb fat mass can be predicted by four models as well ($R^2=0.783-0.887$; $p < 0.001$); and the right lower limb by three models ($R^2=0.794-0.819$; $p < 0.001$). For the right upper limb, the triceps skinfold, body mass, and biceps skinfold were the highest predictive variables (VIF value=1.170–4.409). For the left upper limb, the triceps skinfold, arm relaxed girth, and arm flexed and tensed girth were the highest predictive variables (VIF value=1.648–18.028). For the trunk, the variable with the highest predictive ability was the left supraspinale skinfold (VIF value=1.000). The thigh skinfold was shown to be most influential for the right and left lower limbs, followed by body mass for the right lower limb and thigh 1 cm gluteal girth for the left lower limb (VIF value=1.140–8.643).

In the female sample, six multivariate regression models were obtained for the left upper limb ($R^2=0.853-0.910$; $p < 0.001$), and three for the right upper limb ($R^2=0.766-0.899$; $p < 0.001$). Trunk fat mass can be predicted by five models ($R^2=0.780-0.907$; $p < 0.001$), while the left and right lower limbs fat mass by three models ($R^2=0.776-0.840$; $p < 0.001$). Body mass showed a high degree of determination, being the most important variable for determining the kg of fat in the left upper limb and for both lower limbs, followed by biceps skinfold for left upper limb and calf skinfold for both lower limbs (VIF value=1.559–27.238). In the case of the right upper limb, the triceps skinfold was the most important determinant factor (VIF value=1.000). In the trunk, waist girth was shown to be most influential (VIF value=1.000).

Table 4 (continued)
Partial correlations with hydration status as a control variable

Right lower limb fat mass (kg)	Body mass	Sitting height	Right Thigh skinfold	Right Calf skinfold	Right Thigh 1 cm gluteal girth	Right Thigh middle girth	Right Calf girth	Right Ankle girth	Right Trachion-terion-breadth	Right Femur length
$r=0.617$	$r=0.179$	$r=0.820$	$r=0.778$	$r=0.728$	$r=0.743$	$r=0.657$	$r=0.561$	$r=0.418$	$r=0.449$	$r=0.001$
$p<0.001$	$p=0.024$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$
Left lower limb fat mass (kg)	Body mass	Sitting height	Left Thigh skinfold	Left Calf skinfold	Left Thigh 1 cm gluteal girth	Left Thigh middle girth	Left Calf girth	Left Ankle girth	Left Femur length	Left Tibiale laterale length
$r=0.156$	$r=0.035$	$r=0.258$	$r=0.338$	$r=0.308$	$r=0.045$	$r=0.067$	$r=0.005$	$r=0.194$	$r=0.083$	$r=0.186$
$p=0.249$	$p=0.661$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p=0.573$	$p=0.400$	$p=0.955$	$p=0.014$	$p=0.083$	$p=0.019$
										$p=0.298$

kg, kilogram; %, percentage

Discussion

The first objective of this research was to analyze the differences between DXA and BIA in estimating segmental fat mass. Significant differences were observed in most body segments across the general sample. Specifically, discrepancies were found in trunk fat mass, both in kilograms and percentages, as well as in the percentages of the right and left upper limbs. When analyzing the male subgroup, differences were identified in all body segments, both in kilograms and percentages (upper limbs, trunk, and lower limbs). In contrast, in the female subgroup, significant differences were found in the kilograms of fat in the lower limbs and the percentage of fat in the left upper limb.

One of the possible sources of these differences could be attributed to the methodology used in each technique. DXA measures molecular density, differentiating between soft lean mass, fat mass, and bone mineral content with a high accuracy [47]. In contrast, BIA estimates body composition through predictive equations based on the body's electrical impedance, which can be strongly influenced by factors such as hydration status, fasting conditions, glycogen levels, and body temperature, leading to potential variations in the measurements [48]. Furthermore, BIA does not always adequately capture regional fat distribution differences, as its accuracy can vary depending on the technology used (leg-to-leg, hand-to-hand, etc.), and the subject's posture [49].

Additionally, differences between segmental DXA and BIA measurements may arise from how each method defines body segments. DXA allows technicians to manually delineate specific body segments, providing a high degree of customization and precision [40, 41]. In contrast, BIA determines these segments automatically through its software, without the possibility for manual adjustment, which can introduce variability in body composition estimates made by the BIA apparatus [45].

Moreover, a critical limitation of the BIA device used was its inability to provide raw impedance values, a factor that significantly restricts the application of alternative BIA equations that might be better aligned with DXA values [50]. This limitation hinders the ability to refine or adjust BIA estimations for a greater accuracy in comparison to the reference method [51]. Thus, in the current research, the BIA device used employed proprietary equations based on raw bioimpedance parameters to estimate fat mass. These equations were supposed to have been validated in multiple populations, showing a good agreement with DXA [52, 53]. However, the manufacturer's proprietary equations are not disclosed in detail, which presents a limitation when attempting to understand the underlying assumptions and variables used in the estimations [50]. This is also particularly relevant to consider when using BIA's software values to analyze

Table 5 (continued)

Partial correlation with BMI as a control variable

Right lower limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Right Calf skinfold	Right Thigh 1 cm gluteal girth	Right Thigh middle girth	Right Calf girth	Right Ankle girth	Right ilioespinal height	Right Trochanterion height	Right Tibial Lateral Height	Right Femoral breadth	Right Bimalar breadth
$r = 0.674$	$r = 0.678$	$r = 0.404$	$r = 0.575$	$r = 0.446$	$r = 0.466$	$r = 0.294$	$r = 0.412$	$r = 0.443$	$r = 0.608$	$r = 0.474$	$r = 0.548$	$r = 0.538$	$r = 0.429$
$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.003$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Left lower limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Left Calf skinfold	Left Thigh 1 cm gluteal girth	Left Thigh middle girth	Left Calf girth	Left Ankle girth	Left ilioespinal height	Left Trochanterion height	Left Tibial Lateral Height	Left Femoral breadth	Left Bimalar breadth
$r = 0.597$	$r = 0.104$	$r = 0.071$	$r = 0.007$	$r = 0.080$	$r = 0.265$	$r = 0.024$	$r = 0.351$	$r = 0.327$	$r = 0.161$	$r = 0.052$	$r = 0.064$	$r = 0.305$	$r = 0.259$
$p = 0.001$	$p = 0.334$	$p = 0.300$	$p = 0.479$	$p = 0.346$	$p = 0.007$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.522$	$p = 0.604$	$p = 0.522$	$p = 0.002$	$p = 0.009$
Partial correlations with hydrations as a control variable													
Right upper limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Right Triceps skinfold	Right Arm flexed and tensed girth	Right Arm flexed and tensed girth	Right Forearm girth	Right Wrist girth	Right Acromioclavicular length	Right Humerus breadth	Right Bistylloid breadth	Right Femoral breadth	Right Bimalar breadth
$r = 0.852$	$r = 0.299$	$r = 0.252$	$r = 0.010$	$r = 0.875$	$r = 0.829$	$r = 0.753$	$r = 0.736$	$r = 0.626$	$r = 0.334$	$r = 0.561$	$r = 0.347$	$r = 0.347$	$r = 0.365$
$p < 0.001$	$p = 0.002$	$p = 0.010$	$p = 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Left upper limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Left Triceps skinfold	Left Arm flexed and tensed girth	Left Arm flexed and tensed girth	Left Forearm girth	Left Wrist girth	Left Acromioclavicular length	Left Radial-ulnar length	Left Bistylloid breadth	Left Femoral breadth	Left Bimalar breadth
$r = 0.864$	$r = 0.314$	$r = 0.248$	$r = 0.012$	$r = 0.830$	$r = 0.835$	$r = 0.730$	$r = 0.766$	$r = 0.674$	$r = 0.411$	$r = 0.281$	$r = 0.319$	$r = 0.526$	$r = 0.365$
$p < 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.012$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p = 0.004$	$p = 0.004$	$p = 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Trunk fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Right Subscapular skinfold	Right Subscapular skinfold	Right Abdominal skinfold	Right Subscapular skinfold	Right Crest skinfold	Right Subscapular skinfold	Right Abdominal skinfold	Right Chest girth	Right Femoral breadth	Right Bimalar breadth
$r = 0.865$	$r = 0.260$	$r = 0.370$	$r = 0.001$	$r = 0.838$	$r = 0.825$	$r = 0.751$	$r = 0.865$	$r = 0.731$	$r = 0.790$	$r = 0.718$	$r = 0.870$	$r = 0.983$	$r = 0.365$
$p < 0.001$	$p = 0.008$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Right lower limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Right Thigh skinfold	Right Thigh 1 cm gluteal girth	Right Thigh middle girth	Right Calf girth	Right Ankle girth	Right ilioespinal height	Right Trochanterion height	Right Tibial Lateral Height	Right Femoral breadth	Right Bimalar breadth
$r = 0.860$	$r = 0.494$	$r = 0.530$	$r = 0.001$	$r = 0.696$	$r = 0.851$	$r = 0.753$	$r = 0.749$	$r = 0.658$	$r = 0.422$	$r = 0.361$	$r = 0.432$	$r = 0.796$	$r = 0.514$
$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Left lower limb fat mass (kg)	Body mass	Stretch	Sitting Height	Left Thigh skinfold	Left Thigh 1 cm gluteal girth	Left Thigh middle girth	Left Calf girth	Left Ankle girth	Left ilioespinal height	Left Trochanterion height	Left Tibial Lateral Height	Left Femoral breadth	Left Bimalar breadth
$r = 0.853$	$r = 0.495$	$r = 0.527$	$r = 0.001$	$r = 0.752$	$r = 0.828$	$r = 0.744$	$r = 0.742$	$r = 0.702$	$r = 0.384$	$r = 0.484$	$r = 0.484$	$r = 0.800$	$r = 0.437$
$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$

Kg: kilogram; %: percentage

Table 6 Multivariate regression models using anthropometric variables in males

	Model	R ²	Variable included	VIF	F	p	Equation	
Right upper limb fat mass (kg)	1	0.758	Right Triceps skinfold	3.484	164.123	p < 0.001	-0.473 + 0.025 * Right Triceps skinfold + 0.011 * Body mass + 0.041 * Right Biceps skinfold	
			Body mass	1.170				
	2	0.774	Right Biceps skinfold	3.498	133.191	p < 0.001	0.403 + 0.024 * Right Triceps skinfold + 0.015 * Body mass + 0.039 * Right Biceps skinfold - 0.071 * Right Wrist girth	
			Right Triceps skinfold	3.528				
			Body mass	2.337				
			Right Biceps skinfold	3.514				
	3	0.781	Right Wrist girth	2.006	110.252	p < 0.001	0.131 + 0.023 * Right Triceps skinfold + 0.011 * Body mass + 0.040 * Right Biceps skinfold - 0.065 * Right Wrist girth + 0.014 * Right Arm relaxed girth	
			Right Triceps skinfold	3.535				
			Body mass	4.321				
			Right Biceps skinfold	3.521				
	4	0.798	Right Wrist girth	2.034	101.241	p < 0.001	0.160 + 0.019 * Right Triceps skinfold + 0.010 * Body mass + 0.035 * Right Biceps skinfold - 0.050 * Right Wrist girth + 0.080 * Right Arm relaxed girth - 0.065 * Right Arm flexed and tensed girth	
			Right Arm relaxed girth	2.695				
			Right Triceps skinfold	3.781				
			Body mass	4.409				
	Left upper limb fat mass (kg)	1	0.782	Right Biceps skinfold	3.580	187.391	p < 0.001	-0.923 + 0.043 * Left Triceps skinfold + 0.135 * Left Arm relaxed girth - 0.087 * Left Arm flexed and tensed girth
				Right Arm flexed and tensed girth	22.176			
2		0.796	Left Triceps skinfold	1.648	152.164	p < 0.001	-0.909 + 0.032 * Left Triceps skinfold + 0.124 * Left Arm relaxed girth - 0.078 * Left Arm flexed and tensed girth + 0.026 * Left Biceps skinfold	
			Left Arm relaxed girth	17.460				
			Left Arm flexed and tensed girth	16.312				
			Left Biceps skinfold	2.632				
3		0.806	Left Triceps skinfold	2.899	129.106	p < 0.001	-0.847 + 0.031 * Left Triceps skinfold + 0.107 * Left Arm relaxed girth - 0.076 * Left Arm flexed and tensed girth + 0.023 * Left Biceps skinfold + 0.006 * Body mass	
			Left Arm relaxed girth	20.142				
			Left Arm flexed and tensed girth	16.796				
			Left Biceps skinfold	2.669				
4		0.812	Body mass	2.881	110.859	p < 0.001	-0.371 + 0.030 * Left Triceps skinfold + 0.096 * Left Arm relaxed girth - 0.068 * Left Arm flexed and tensed girth + 0.022 * Left Biceps skinfold + 0.008 * Body mass - 0.099 * Left Bi-styloid breadth	
			Left Triceps skinfold	2.971				
			Left Arm relaxed girth	21.925				
			Left Arm flexed and tensed girth	17.758				
Trunk fat mass (kg)		1	0.797	Left Biceps skinfold	2.696	625.670	p < 0.001	1.345 + 0.580 * Left Supraspinale skinfold + 0.180 * Waist girth
				Left Bi-styloid breadth	1.623			
	2	0.866	Left Supraspinale skinfold	1.000	509.472	p < 0.001	-11.625 + 0.415 * Left Supraspinale skinfold + 0.146 * Waist girth + 0.202 * Left subscapular skinfold	
			Waist girth	1.943				
	3	0.883	Left Supraspinale skinfold	1.943	393.298	p < 0.001	-9.881 + 0.300 * Left Supraspinale skinfold + 0.146 * Waist girth + 0.202 * Left subscapular skinfold	
			Waist girth	2.230				
	4	0.887	Left subscapular skinfold	4.192	304.629	p < 0.001	-7.983 + 0.304 * Left Supraspinale skinfold + 0.081 * Waist girth + 0.219 * Left subscapular skinfold + 0.041 * Body mass	
			Left Supraspinale skinfold	3.833				
	Right lower limb fat mass (kg)	1	0.794	Waist girth	6.613	304.604	p < 0.001	-1.862 + 0.117 * Right Thigh skinfold + 0.044 * Body mass
				Left subscapular skinfold	4.319			
		2	0.813	Body mass	4.207	228.086	p < 0.001	-1.754 + 0.084 * Right Thigh skinfold + 0.041 * Body mass + 0.063 * Right Calf skinfold
				Right Thigh skinfold	1.140			
		3	0.819	Body mass	1.140	176.038	p < 0.001	-2.909 + 0.077 * Right Thigh skinfold + 0.028 * Body mass + 0.060 * Right Calf skinfold + 0.038 * Right Thigh 1 cm gluteal girth
				Right Thigh skinfold	3.045			
				Body mass	1.164			
				Right Calf skinfold	3.081			
				Right Thigh 1 cm gluteal girth	4.752			

Table 6 (continued)

	Model	R ²	Variable included	VIF	F	p	Equation
Left lower limb fat mass (kg)	1	0.783	Left Thigh skinfold	1.499	285.257	p < 0.001	-4.554 + 0.102 * Left Thigh skinfold + 0.106 * Left Thigh 1 cm gluteal girth
			Left Thigh 1 cm gluteal girth	1.499			
	2	0.826	Left Thigh skinfold	2.711	247.744	p < 0.001	-3.962 + 0.061 * Left Thigh skinfold + 0.092 * Left Thigh 1 cm gluteal girth + 0.087 * Left Calf skinfold
			Left Thigh 1 cm gluteal girth	1.565			
Left Calf skinfold			2.605				
3	0.836	Left Thigh skinfold	2.850	199.523	p < 0.001	-3.749 + 0.055 * Left Thigh skinfold + 0.169 * Left Thigh 1 cm gluteal girth + 0.090 * Left Calf skinfold - 0.087 * Left Thigh middle girth	
			Left Thigh 1 cm gluteal girth				10.035
			Left Calf skinfold				2.616
			Left Thigh middle girth				8.643
4	0.845	Left Thigh skinfold	2.976	169.005	p < 0.001	-2.652 + 0.060 * Left Thigh skinfold + 0.130 * Left Thigh 1 cm gluteal girth + 0.092 * Left Calf skinfold - 0.100 * Left Thigh middle girth + 0.023 * Body mass	
			Left Thigh 1 cm gluteal girth				12.785
			Left Calf skinfold				2.619
			Left Thigh middle girth				8.887
			Body mass	4.715			mass

Kg: kilogram; %: percentage; VIF: variance inflation factor

different populations, as the accuracy of these equations may vary based on factors such as ethnicity, activity level, or age [50].

Another limitation is the inability of BIA to differentiate between visceral and subcutaneous fat with the same precision as imaging methods such as magnetic resonance imaging (MRI) or DXA [54]. This can lead to variability in the assessment of fat distribution, particularly in populations with central obesity or conditions that affect fat accumulation. Previous studies have suggested that while BIA may be effective for general fat mass assessment, it should be complemented with more direct methods such as DXA or MRI, when precise information about visceral fat is required, as this will affect the trunk values [55]. These may explain the differences obtained in this study.

An analysis of whether the covariates BMI, sex and hydration status affected the differences between methods was also performed. Concerning BMI, although it has historically been considered a strong indicator of nutritional status and levels of overweightness [56, 57], in the present study, it did not have an influence on the comparison of segmental fat as a function of the method used for its assessment in most cases. This could be because BMI does not distinguish between fat mass and fat-free mass, taking for granted that an excess of total weight is related to an excess of fat, which could be an erroneous conclusion, especially in the health field [58]. In addition, BMI does not include any variables at the segmental level in its calculation, only general body mass and stretch stature. This indicates that BMI could be considered when assessing the general condition of a person, but would not be related to fat in different body segments [59].

Hydration status also showed no effects on the differences in estimated segmental fat mass. Previous studies have found that body water levels could be a contaminating factor in the estimation of fat mass, especially in

methods based on electrical conductivity such as BIA [12]. However, in the current research, most of the factors that could influence the participants' hydration status were carefully controlled for [58], such as physical activity, training, and food intake, which can help reduce the impact of hydration levels [22]. Despite these controls, the Bland-Altman analysis revealed that even under adequate hydration and normal BMI conditions, significant differences persisted between BIA and DXA across various body segments. This highlights that those discrepancies are not solely attributable to hydration variability or extreme body composition, but are likely inherent to the methodological differences between these techniques. Consequently, the reliability of BIA could deteriorate further in populations with abnormal hydration states, such as individuals with lymphedema, edema, or chronic kidney disease, as well as in elderly populations, where hydration status can vary significantly [60, 61]. This underscores the need for alternative methods, such as anthropometry, which demonstrated a greater robustness under ad libitum conditions.

In contrast, sex had a significant influence on the differences between DXA and BIA in the different body segments. Body fat distribution significantly differs between males and females, as it is influenced by hormonal and physiological factors. Females tend to accumulate more subcutaneous fat, especially in the hips and thighs, while males generally have more visceral fat [28, 29, 31]. This differential distribution can influence the accuracy of BIA, as the method is sensitive to the distribution and fluctuation of body water. During the menstrual cycle, females experience hormonal changes that affect the retention of fluids, which can alter BIA measurements [62]. For instance, the luteal phase of the menstrual cycle is associated with a higher retention of water, which can influence body fat estimates obtained through BIA [63]. These hormonal and water fluctuations do not affect

Table 7 Multivariate regression models using anthropometric variables in females

	Model	R ²	Variable included	VIF	F	p	Equation
Right upper limb fat mass (kg)	1	0.766	Right Triceps skinfold	1.000	330.473	p < 0.001	-0.093 + 0.055 * Right Triceps skinfold
	2	0.876	Right Triceps skinfold Body mass	1.988 1.988	353.597	p < 0.001	-0.792 + 0.034 * Right Triceps skinfold + 0.018 * Body mass
	3	0.899	Right Triceps skinfold Body mass Right Biceps skinfold	4.237 2.142 4.234	292.986	p < 0.001	-0.620 + 0.020 * Right Triceps skinfold + 0.016 * Body mass + 0.031 * Right Biceps skinfold
Left upper limb fat mass (kg)	1	0.853	Body mass Left Biceps Skinfold	1.888 1.888	290.396	p < 0.001	-0.715 + 0.022 * Body mass + 0.045 * Left Biceps Skinfold
	2	0.871	Body mass Left Biceps Skinfold Left Bi-styloid breadth	2.397 1.895 1.433	223.765	p < 0.001	0.087 + 0.026 * Body mass + 0.044 * Left Biceps Skinfold - 0.212 * Left Bi-styloid breadth
	3	0.881	Body mass Left Biceps Skinfold Left Bi-styloid breadth Left Triceps skinfold	2.571 4.126 1.467 4.024	181.217	p < 0.001	-0.091 + 0.025 * Body mass + 0.030 * Left Biceps Skinfold - 0.189 * Left Bi-styloid breadth + 0.017 * Left Triceps skinfold
	4	0.888	Body mass Left Biceps Skinfold Left Bi-styloid breadth Left Triceps skinfold Left Arm relaxed girth	5.771 4.152 1.565 4.032 4.291	153.711	p < 0.001	-0.519 + 0.019 * Body mass + 0.028 * Left Biceps Skinfold - 0.155 * Left Bi-styloid breadth + 0.016 * Left Triceps skinfold + 0.024 * Left Arm relaxed girth
	5	0.905	Body mass Left Biceps Skinfold Left Bi-styloid breadth Left Triceps skinfold Left Arm relaxed girth Left Arm flexed and tensed girth	5.928 4.176 1.640 4.176 26.657 18.373	152.254	p < 0.001	-0.576 + 0.017 * Body mass + 0.026 * Left Biceps Skinfold - 0.108 * Left Bi-styloid breadth + 0.012 * Left Triceps skinfold + 0.109 * Left Arm relaxed girth - 0.083 * Left Arm flexed and tensed girth
	6	0.910	Body mass Left Biceps Skinfold Left Bi-styloid breadth Left Triceps skinfold Left Arm relaxed girth Left Arm flexed and tensed girth Left Acromiale-Radiale length	7.514 4.188 1.672 4.180 27.238 18.375 1.627	137.592	p < 0.001	-1.272 + 0.013 * Body mass + 0.027 * Left Biceps Skinfold - 0.125 * Left Bi-styloid breadth + 0.011 * Left Triceps skinfold + 0.117 * Left Arm relaxed girth - 0.083 * Left Arm flexed and tensed girth + 0.025 * Left Acromiale-Radiale length
Trunk fat mass (kg)	1	0.780	Waist girth	1.000	358.541	p < 0.001	-24.423 + 0.461 * Waist girth
	2	0.850	Waist girth Right Subscapular skinfold	2.870 2.870	282.990	p < 0.001	-14.360 + 0.273 * Waist girth + 0.213 * Right Subscapular skinfold
	3	0.883	Waist girth Right Subscapular skinfold Body mass	5.438 2.873 3.416	248.738	p < 0.001	-8.814 + 0.053 * Waist girth + 0.228 * Right Subscapular skinfold + 0.159 * Body mass
	4	0.901	Waist girth Right Subscapular skinfold Body mass Left Abdominal skinfold	5.555 4.239 3.487 2.170	226.007	p < 0.001	-10.065 + 0.058 * Waist girth + 0.152 * Right Subscapular skinfold + 0.161 * Body mass + 0.136 * Left Abdominal skinfold
	5	0.906	Waist girth Right Subscapular skinfold Body mass Left Abdominal skinfold Biacromial breadth	7.882 4.431 3.697 2.187 5.894	189.333	p < 0.001	-4.745 + 0.068 * Waist girth + 0.140 * Right Subscapular skinfold + 0.184 * Body mass + 0.127 * Left Abdominal skinfold - 0.194 * Biacromial breadth
Right lower limb fat mass (kg)	1	0.776	Body mass Right Calf skinfold	1.559 1.559	173.450	p < 0.001	-0.909 + 0.078 * Body mass + 0.046 * Right Calf skinfold
	2	0.800	Body mass Right Calf skinfold Stretch Stature	2.080 1.638 1.357	131.782	p < 0.001	-5.824 + 0.066 * Body mass + 0.053 * Right Calf skinfold + 0.034 * Stretch Stature
	3	0.840	Body mass Right Calf skinfold Stretch Stature Right 1 cm gluteal girth	9.891 1.638 1.559 7.857	128.556	p < 0.001	-12.114 + 0.002 * Body mass + 0.053 * Right Calf skinfold + 0.051 * Stretch Stature + 0.126 * Right 1 cm gluteal girth

Table 7 (continued)

	Model	R ²	Variable included	VIF	F	p	Equation
Left lower limb fat mass (kg)	1	0.792	Body mass	1.674	190.441	p < 0.001	-0.782 + 0.069 * Body mass + 0.068 * Left Calf skinfold
			Left Calf skinfold	1.674			
	2	0.822	Body mass	2.080	152.040	p < 0.001	-4.895 + 0.057 * Body mass + 0.081 * Left Calf skinfold + 0.051 * Left Iliospinale Height
			Left Calf skinfold	1.817			
			Left Iliospinale Height	1.243			
	3	0.840	Body mass	2.460	128.360	p < 0.001	-5.781 + 0.048 * Body mass + 0.059 * Left Calf skinfold + 0.060 * Left Iliospinale Height + 0.036 * Left Thigh skinfold
			Left Calf skinfold	2.510			
			Left Iliospinale Height	1.319			
			Left Thigh skinfold	2.668			

Kg: kilogram; %: percentage; VIF: variance inflation factor

DXA in the same manner, which can therefore provide more stable and accurate body composition measurements, specifically fat measurements, regardless of these variations [64]. Additionally, the hormonal environment in males contributes to an android pattern of fat distribution, characterized by a greater fat accumulation in the abdominal region. Hormones such as testosterone and growth hormone play crucial roles in this process. Testosterone is known to promote the development of lean body mass and to reduce fat mass [65, 66]. Growth hormone also supports muscle growth and fat metabolism, with higher levels in males especially during the growth stage [67]. This hormonal context leads to a body composition where fat is more centrally located in males, and as a result, sex is a modulating factor in the differences shown in segmental fat between methods (67).

As mentioned, one of the primary challenges faced in this study was the notable discrepancy between BIA and DXA when estimating segmental fat mass. Given these constraints, a second objective was pursued: developing anthropometric-based predictive models for segmental fat mass in kg, using multivariate regression equations with DXA as the reference method. Anthropometry has many distinct advantages in this context, particularly within public health settings [68, 69]. It is a highly accessible, low-cost method that can be employed in large-scale studies and across various population groups [70, 71]. Therefore, by leveraging anthropometric data, this study aimed to bridge the gap left by the limitations of BIA, to offer a more feasible and scalable solution for body fat analysis in resource-constrained environments. Furthermore, the current study strictly adhered to the most current ISAK protocols, by including all 45 variables, and accounting for bilateral asymmetries in the predictive models. This comprehensive approach not only improves the robustness of the models, but also enhances their applicability and replicability in both research and public health settings [19, 42, 72]. The results of the predictive models differed between males and females, when using DXA as the reference. The models developed showed a higher prediction capacity in females. These findings are consistent with previous studies that suggested that

anthropometric measurements can be reliable predictors of body composition, particularly in females [73, 74].

In males, the predictive models for both the right and left upper limbs included triceps and biceps skinfolds, confirming the relationship between subcutaneous fat and segmental fat [75]. In addition, skinfolds, as well as body mass, have shown the lowest multicollinearity values when generating the models and this enhances their predictive capacity. In the right upper limb, body mass also contributed to the prediction equation. This demonstrates the high predictive power of this basic variable, and in fact, several general fat mass estimation formulae include this variable in their analysis. However, arm relaxed girth and arm flexed and tensed girth were determinant variables in left upper limb fat prediction. Arm relaxed girth reflects not only muscle mass but also subcutaneous fat [76], which could explain why this variable is a positive determinant of upper limb fat mass, although with a higher multicollinearity, what could weaken the predictive power of this variable. On the other hand, arm flexed and tensed girth negatively predicted segmental fat mass, which could be because this variable is highly correlated with muscle mass development, instead of fat [77].

Focusing on the left upper limb in females, the multivariate regression model highlighted the importance of variables such as triceps skinfold for the right upper limb, and biceps skinfold for the left upper limb, also indicating a strong relationship between subcutaneous fat and segmental fat mass in the upper limbs [75]. Body mass has been shown to have a high predictive power in the left arm in women. This is consistent with previous studies, thereby showing the high predictive power of body mass on total fat, especially in populations where there is no prominent muscular presence that could act as a confounding factor. In addition, considering that the left arm tends to be the least dominant in the general population worldwide, the prediction of fat mass could be made from body mass, although this variable does not distinguish between fat mass and lean mass [73].

For the trunk, in both males and females, the key predictor variables included the supraspinale skinfold and

waist girth, respectively. These variables emphasize the relevance of central adiposity and visceral fat distribution in predicting trunk fat. Similar findings were reported in previous research, where waist girth was a strong predictor of trunk fat, emphasizing its usefulness in clinical and fitness assessments [63, 78].

In the lower limbs, the models underscored the influence of the thigh skinfold, thigh 1 cm gluteal girth, and body mass. The thigh skinfold provides a direct assessment of subcutaneous fat in one of the primary regions where fat accumulates in the lower limbs [79]. This localized fat is closely associated with overall lower limb fat mass, making the thigh skinfold a strong predictor of total fat in this area [79]. Similarly, the gluteal girth at 1 cm below the fold captures both subcutaneous fat and underlying muscle mass. Given the high proportion of fat stored in the glutes and thighs as compared to other body regions [80], this measurement indirectly reflects overall fat accumulation in these areas, while also detecting variations in leg circumference influenced by fat content [81]. Although body mass is a more general measurement, it correlates positively with total fat content, especially in populations with a higher BMI [59, 82, 83], and can thus serve as an indicator of the total fat deposited in the lower limbs. For females, the most precise model for both lower limbs included body mass and calf skinfold. The findings that calf skinfold and body mass are the strongest predictors of leg fat in females can be attributed to the unique physiological and anthropological factors influencing fat distribution in females. They typically exhibit a greater accumulation of subcutaneous fat, particularly in the gluteo-femoral region, including the calves, due to the regulatory effects of estrogen [84]. This regional fat deposition is thought to serve as an energy reserve for reproductive functions such as gestation and lactation, reflecting an evolutionary adaptation [85]. The calf skinfold measurement, which captures the subcutaneous fat in this area, therefore becomes a reliable indicator of overall leg fat. Additionally, body mass correlates with a higher body fat percentage in females, particularly in areas prone to subcutaneous fat storage, such as the lower limbs [28, 67].

However, these conclusions should be taken with caution. In all cases, the main predictor variable had a VIF below 5, which is the value determined by previous research to establish that there is no multicollinearity in its predictive ability [46]. However, some of the covariates included obtained a VIF above 10; considering that they may have some multicollinearity with other variables, it is recommended to eliminate or group variables with scores above this value [46], so perhaps it would be more appropriate to choose predictive models in which all factors have a VIF < 5.

Strengths, limitations and future lines of research

The current study reveals the complex interplay between various anthropometric measurements and segmental fat distribution. The variables related to skinfolds, girths, and body mass, have been the most important determinants in the different segmental fat prediction equations for both males and females. Understanding these relationships is crucial for developing accurate models for body composition analysis, which have significant implications for health, sports, and aesthetic assessments. These insights support the use of comprehensive anthropometric assessments in clinical and fitness settings, promoting a nuanced approach to evaluating and optimizing segmental body composition. This work seeks to fill the gap in the literature by providing comparative data between methods, and by developing practical tools for assessing segmental fat, thereby contributing to a better understanding and management of adiposity in various contexts.

Furthermore, the adherence to ISAK protocols and the inclusion of bilateral measurements provide a robust foundation for the proposed predictive models, and the results presented offer a strong foundation for further research. The simplicity and accessibility of the anthropometry-based models developed in this study highlight their potential to address gaps in body composition analysis, particularly in settings where DXA is unavailable or unsuitable. These findings represent an important step forward in creating practical tools for assessing segmental fat.

However, this study presents some limitations. Firstly, the sample included only young individuals with normal BMI ranges and an adequate hydration status. Although the findings are robust within the context of this study, they are primarily applicable to individuals with similar demographic and physiological profiles. Therefore, the findings of the present research cannot be generalized to other populations [74]. Future research should aim to include a more heterogeneous and representative population in terms of age, adiposity levels, and hydration status. This would enhance the external validity of the models and allow their application to broader groups, such as older adults, children, or individuals with extreme body composition characteristics, such as elite athletes or those with obesity.

Secondly, the sample was selected by convenience sampling. However, although the sample was very large as compared to previous studies [4], it was limited to university students of Caucasian ethnicity coming from mostly Southern and Eastern European countries. This may have meant that the sample was not representative of the young population, and the particular characteristics of the individuals accessible for the present research may have influenced the results obtained. These issues

may limit the generalization of the findings [18, 86], necessitating replication in future research in samples with diverse hydration statuses, BMI, age, ethnic backgrounds and metabolic conditions, among others, or randomly selected samples.

Thus, while the equations generated demonstrated a strong predictive power within the sample studied, their performance in diverse populations remains to be tested. Together with this, some of the variables showed a high multicollinearity, possibly affecting the predictive power of the model. Future research should prioritize the inclusion of independent validation groups and a broader range of individuals to confirm the reliability of these models for both group-level analysis and individual assessments, and to also confirm the specific weight of the predictive variables in the model.

Additionally, a standing BIA device was used, which, although widely accepted and frequently utilized in clinical and sports settings [87], may produce discrepancies as compared to supine BIA systems [49]. The eight-electrode placement on the hands and feet, standard for many BIA devices, has shown acceptable validity for total body composition estimation, but may not be optimal for body segment-specific analysis, especially in special populations such as those with fluid retention disorders or asymmetries [60]. Future studies should also explore whether the predictive models developed here maintain their accuracy under conditions of extreme BMI or abnormal hydration levels, as these factors are known to influence BIA-based estimations.

Practical implications

The findings of this study offer valuable insights for health professionals, particularly in clinical settings where DXA may not be available due to its high cost or limited accessibility. The Bland-Altman analysis demonstrated significant differences between BIA and DXA across various body segments. These findings reinforce the known fact that DXA and BIA are not interchangeable for segmental fat mass estimation, even in a well-hydrated, homogeneous population with normal BMI ranges. Given the observed variability and overestimation tendencies of the BIA, this raises concerns regarding the reliability of BIA. This concern could be even greater in populations with abnormal hydration states, such as individuals with lymphedema, edema, or chronic kidney disease, or in elderly populations where hydration status can vary significantly [61, 88]. Under such conditions, it is likely that the agreement between BIA and DXA would deteriorate further, limiting its usefulness as a reliable tool. In contrast, anthropometry has shown less variability under ad libitum conditions, reinforcing its robustness as a tool for segmental fat analysis [27, 30, 77]. By relying on simple, standardized measurements, anthropometry becomes

crucial for segmental fat analysis in contexts where DXA is unavailable.

Therefore, by developing predictive models for segmental fat estimation using simple anthropometric measurements, this research provides an effective and validated alternative for assessing fat distribution across the body. These models demonstrate that through the use of straightforward measurements, it is possible to predict fat mass in specific body segments such as the upper limbs, trunk, or lower limbs. More specifically, the determination of segmental fat mass in males can be achieved with just 10 variables (body mass, right and left triceps skinfolds, right biceps skinfold, left supraspinale skinfold, right and left thigh skinfolds, left arm relaxed girth, left arm flexed and tensed girth, and left thigh 1 cm gluteal girth), and in females with just 6 variables (body mass, right triceps skinfold, left biceps skinfold, right and left calf skinfolds, and waist girth). This simplicity not only reduces the need for complex and costly diagnostic tools but also makes these models highly accessible and feasible for implementation in diverse clinical and public health settings [68].

These anthropometry-based models also hold significant potential for public health initiatives, especially in underserved populations where the prevalence of obesity and associated comorbidities is high [79, 88, 89]. By providing a cost-effective solution for routine screening and monitoring, these models enable health professionals to identify individuals at risk of central fat accumulation, a critical predictor of chronic diseases such as cardiovascular conditions and metabolic syndrome. The simplicity of these models also ensures their applicability in resource-constrained environments, allowing for the collection of consistent and actionable data without the need for advanced imaging technologies [2, 90, 91].

In clinical and rehabilitation settings, these models offer additional value by enabling long-term monitoring of segmental fat distribution. The ability to predict fat mass in specific segments, such as the arms or legs, using simple variables such as skinfold thicknesses or girths, provides health professionals with a practical and reliable tool. This is particularly beneficial for individuals undergoing weight loss programs, rehabilitation after injuries, or managing chronic diseases that affect body composition [92]. The accurate tracking of changes in segmental fat allows clinicians to design personalized interventions, improve functional outcomes, and enhance quality of life [93, 94]. Furthermore, in conditions such as lymphedema or metabolic disorders, understanding fat distribution at the segmental level is crucial for tailoring treatment strategies effectively. These models are also useful in unique cases, such as individuals with amputations or asymmetrical fat distribution, where traditional methods face challenges in providing accurate assessments [95].

By addressing the limitations of methods such as BIA and offering a validated, simple, and reliable alternative for segmental fat analysis, this study underscores the usefulness of anthropometry as a cornerstone of accessible health care. It bridges the gap for populations and settings where access to advanced imaging techniques is limited, contributing to more equitable health outcomes and advancing the standard of care for diverse groups.

Conclusions

In conclusion, BIA demonstrated a limited validity for segmental fat mass estimation as compared to DXA. The current findings suggest that neither BMI nor hydration status significantly influenced the differences between BIA and DXA, although sex emerged as a crucial factor, highlighting the need for tailored approaches in both clinical and public health settings. As a consequence, this study underscores the importance of developing accessible, sex-specific methods for segmental fat mass assessment. The anthropometric multivariate regression models developed in the present research offer a reliable and cost-effective alternative for estimating fat mass in the upper limbs, trunk, and lower limbs, making them especially useful for extensive public health initiatives aimed at improving early detection and supporting individualized health care strategies across diverse communities.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the participants and helpers who made this research possible. This study is part of the doctoral thesis of MM-C.

Authors' contributions

MM-C: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. MA-S: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. FE-R: Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Resources, Project administration, Funding acquisition, Conceptualization. NB: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation. BV-C: Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

Funding

The author(s) declare that no financial support was received for the research, authorship, and/or publication of this article.

Data availability

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

Declarations

Ethics approval and consent to participate

The studies involving humans were approved by the Ethics Committee from the Catholic University San Antonio de Murcia (Murcia, Spain), which reviewed and authorized the protocol designed for data collection, considering the World Medical Association Code (CE062103). The studies were conducted in accordance with the local legislation and institutional requirements.

Consent for publication

The participants provided their written informed consent to participate in this study.

Competing interests

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.

Author details

¹Catedra Internacional de Cineantropometria, UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia, Murcia, Murcia, Spain
²Faculty of Sport Sciences, UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia, Murcia, Spain
³Research Group Movement Sciences and Sport (MS&SPORT), Department of Physical Activity and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Murcia, Murcia, Spain

Received: 31 October 2024 / Accepted: 26 December 2024

Published online: 10 January 2025

References

- Xue Y, Yang X, Liu G. Association of combined body mass index and central obesity with cardiovascular disease in middle-aged and older adults: a population-based prospective cohort study. *BMC Cardiovasc Disord*. 2024;24:443.
- Carter JL, Abdullah N, Bragg F, Murad NAA, Taylor H, Fong CS, et al. Body composition and risk factors for cardiovascular disease in global multi-ethnic populations. *Int J Obes*. 2023;47:855–64.
- Duren DL, Sherwood RJ, Czerwinski SA, Lee M, Choh AC, Sienvogel RM, et al. Body composition methods: comparisons and interpretation. *J Diabetes Sci Technol*. 2008;2:1139–46.
- Nicolas Messina D. Estimation of Arm Fat percentage: from Segmental Bioimpedance to Anthropometry. *Int J Kinesiology*. 2024;4:24–31.
- Sansone P, Makivic B, Csapo R, Hume P, Martinez-Rodriguez A, Bauer P. Body Fat of Basketball players: a systematic review and Meta-analysis. *Sports Med*. 2022;28:26.
- Despres J-P. Body Fat distribution and risk of Cardiovascular Disease. *Circulation*. 2012;126:1301–13.
- Chen G-C, Arthur R, Iyengar NM, Kamensky V, Xue X, Wasserthel-Smolter S, et al. Association between regional body fat and cardiovascular disease risk among postmenopausal women with normal body mass index. *Eur Heart J*. 2019;40:2849–55.
- Cheng S-H, Kuo Y-J, Lin J-C-F, Chang W-C, Wu C-C, Chu Y-L, et al. Fat distribution may predict intra- or extra-capsular hip fracture in geriatric patients after falling. *Injury*. 2020;51:414–9.
- Ahn J, Simpkins C, Yang F. Adipose tissue deposition region affects fall risk in people with obesity: a systematic review and meta-analysis. *Obes Res Clin Pract*. 2024;18:1–8.
- Duren DL, Sherwood RJ, Czerwinski SA, Lee M, Choh AC, Sienvogel RM, et al. Body composition methods: comparisons and interpretation [Internet]. *J Diabetes Sci Technol*. 2008. Available from: www.journalofdiabetes.org.
- Moreira OC, Alonso-Aubin DA, Patrocínio, De Oliveira CE, Cândia-Lujan R, De Paz JA. Methods of assessment of body composition: an updated review of description, application, advantages and disadvantages. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18.
- Aragon AA, Schoenfeld BJ, Wildman R, Kleiner S, VanDusseldorp T, Taylor L, et al. International society of sports nutrition position stand: diets and body composition. *J Int Soc Sports Nutr*. 2017;14:16.
- Kasper AM, Langan C, Hudson JF, Brownlee TE, Harper LD, Naughton RL, et al. Come back skinfolds, all is forgiven: a narrative review of the efficacy of common body composition methods in applied sports practice. *Nutrients*. 2021;13:1075.
- Campa F, Gobbo LA, Stagi S, Cyrino LT, Toselli S, Marini E, et al. Bioelectrical impedance analysis versus reference methods in the assessment of body composition in athletes. *Eur J Appl Physiol*. 2022;122:561–80.
- Camero E, Alvero-Cruz JR, Girdleir MA, Sardinha LB. La evaluación De La composición corporal in vivo; parte I: Perspectiva histórica. *Nutr Hosp*. 2015;31:1957–67.

16. Marini F, Campa F, Buffa R, Stagi S, Matias CN, Toselli S, et al. Phase angle and bioelectrical impedance vector analysis in the evaluation of body composition in athletes. *Clin Nutr*. 2020;39:447–54.
17. Dellinger JR, Johnson BA, Benavides ML, Moore ML, Stratton MT, Harty PS, et al. Agreement of bioelectrical resistance, reactance, and phase angle values from supine and standing bioimpedance analyzers. *Physiol Meas*. 2021;42:035003.
18. Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a physically active Population. *Appl Sci*. 2022;12:13043.
19. Esparza-Ros F, Vaquero-Cristóbal R, Marfell-Jones M. International standards for anthropometric assessment. International Society for Advancement in Kinanthropometry, Murcia; 2019.
20. Heymsfield B, Wang S, Baumgartner Z, Ross RN. Human body composition: advances in models and methods. *Annu Rev Nutr*. 1997;17:527–58.
21. Wang J, Thornton JC, Bari S, Williamson B, Gallagher D, Heymsfield SB, et al. Comparisons of waist circumferences measured at 4 sites. *Am J Clin Nutr*. 2003;77:379–84.
22. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N, Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front Nutr*. 2024;11:1421950–66.
23. Achamrah N, Collange G, Delay J, Rimbert A, Folope-V, Petit A, et al. Comparison of body composition assessment by DXA and BIA according to the body mass index: a retrospective study on 3655 measures. *PLoS ONE*. 2018;13:e0200465.
24. Sun G, French CR, Martin GR, Youngusband B, Green RC, Xie Y, et al. Comparison of multifrequency bioelectrical impedance analysis with dual-energy X-ray absorptiometry for assessment of percentage body fat in a large, healthy population. *Am J Clin Nutr*. 2005;81:74–8.
25. Scalfoglian A, Tresignie J, Provyn S, Marfell-Jones M, George K, Clarys JP, et al. Accuracy and concordance of anthropometry for measuring regional fat distribution in adults aged 20–55 years. *Am J Hum Biol*. 2013;25:63–70.
26. Demura S, Sato S, Noguchi T. Prediction of segmental percent fat using anthropometric variables. *J Sports Med Phys Fit*. 2005;45:18–23.
27. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N, Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front Nutr*. 2024;11.
28. Chang E, Varghese M, Singer K. Gender and sex differences in adipose tissue. *Curr Diab Rep*. 2018;18:60.
29. Karastergiou K, Smith SR, Greenberg AS, Fried SK. Sex differences in human adipose tissues – the biology of pear shape. *Biol Sex Differ*. 2012;3:13.
30. Kerr A, Slater GJ, Byrne N. Impact of food and fluid intake on technical and biological measurement error in body composition assessment methods in athletes. *Br J Nutr*. 2017;117(4):591–601.
31. Lumish HS, O'Reilly M, Reilly MP. Sex differences in Genomic Drivers of Adipose Distribution and related Cardiometabolic disorders. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2020;40:45–60.
32. Nickerson BS, McLester CN, McLester JR, Kiszczewicz BM. Relative accuracy of anthropometric-based body fat equations in males and females with varying BMI classifications. *Clin Nutr ESPEN*. 2020;35:136–40.
33. Khalil SF, Mohktar MS, Ibrahim F. The theory and fundamentals of bioimpedance analysis in clinical status monitoring and diagnosis of diseases. *Sens (Switzerland)*. 2014;1410895–928.
34. Campa F, Toselli S, Mazzilli M, Gobbo LA, Coratella G. Assessment of body composition in athletes: a narrative review of available methods with special reference to quantitative and qualitative bioimpedance analysis. *Nutrients*. MDPI AG; 2021.
35. Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a physically active Population. *Appl Sci*. 2022;12.
36. Bhalerao S, Kadam P. Sample size calculation. *Int J Ayurveda Res*. 2010;1:55–7.
37. Kostelnik SB, Davy KP, Hedrick VE, Thomas DT, Davy BM. The validity of urine color as a hydration biomarker within the General Adult Population and athletes: a systematic review. *J Am Coll Nutr*. 2021;40:172–9.
38. Kitam U, Voitekavica L, Timpmann S, Pontaga L, Erelne J, Unt E, et al. Pre-practice hydration status in soccer (football) players in a cool environment. *Med (B Aires)*. 2018;54:54–6.
39. Vaquero-Cristóbal R, García Roca JA, Albaladejo-Saura M, Fernández-Alarcón M, Esparza F. Evolution in anthropometric variables related to training and nutritional parameters in ultra-endurance mountain runners. *Nutr Hosp*. 2019;36:706–13.
40. Nana A, Slater GJ, Stewart AD, Burke LM. Methodology review: using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) for the assessment of body composition in athletes and active people. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2015;25:198–215.
41. Nana A, Slater GJ, Hopkins WG, Halson SL, Martin DT, West NP, et al. Importance of standardized DXA protocol for assessing physique changes in athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2016;26:259–67.
42. Nana A, Slater GJ, Hopkins WG, Burke LM. Techniques for Undertaking Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Whole-Body scans to Estimate Body Composition in Tall and/or broad subjects. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2012;22:313–22.
43. Thivel D, Verney J, Miguet M, Masurier J, Cardenoux C, Lambert C, et al. The accuracy of bioelectrical impedance to track body composition changes depends on the degree of obesity in adolescents with obesity. *Nutr Res*. 2018;54:60–8.
44. Verney J, Schwartz C, Amiche S, Pereira B, Thivel D. Comparisons of a Multi-frequency Bioelectrical Impedance Analysis to the dual-energy X-Ray Absorptiometry scan in healthy young adults depending on their physical activity level. *J Hum Kinet*. 2015;47:73–80.
45. Schierbauer J, Günther S, Haupt S, Zimmer RT, Herz D, Voit T, et al. Acute Fluid Intake impacts Assessment of Body Composition via Bioelectrical Impedance Analysis. A Randomized, controlled crossover pilot trial. *Metabolites*. 2023;13:473.
46. Kim JH. Multicollinearity and misleading statistical results. *Korean J Anesthesiol*. 2019;72:558–69.
47. Shepherd JA, Ng BK, Sommer MI, Heymsfield SB. Body composition by DXA. *Bone*. 2017;104:101–5.
48. Andreoli A, Scalzo G, Masala S, Tarantino U, Guglielmi G. Body composition assessment by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). *Radiol Med*. 2009;114:286–300.
49. Ward LC. Segmental bioelectrical impedance analysis. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2012;15:424–9.
50. Campa F, Coratella G, Cenullo G, Noriega Z, Francisco R, Charrier D, et al. High-standard predictive equations for estimating body composition using bioelectrical impedance analysis: a systematic review. *J Transl Med*. 2024;22:515.
51. Coratella G, Campa F, Matias CN, Toselli S, Koury JC, Andreoli A, et al. Generalized bioelectric impedance-based equations underestimate body fluids in athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2021;31:2123–32.
52. Rojano-Ortega D, Moya-Amaya H, Bernal-Aguilar AJ, Baratto P, Molina-López A, Bernal-de la Rosa FI. Development and validation of new bioelectrical impedance equations to accurately estimate fat mass percentage in a heterogeneous caucasian population. *Nutr Res*. 2024;72:380–7.
53. Buch A, Ben-Yehuda A, Rouch V, Maier AB, Greenman Y, Izhakovic E, et al. Validation of a multi-frequency bioelectrical impedance analysis device for the assessment of body composition in older adults with type 2 diabetes. *Nutr Diabetes*. 2022;12:45.
54. Day K, Kwok A, Evans A, Mata F, Verdejo-García A, Hart K, et al. Comparison of a Bioelectrical Impedance device against the Reference Method Dual Energy X-Ray Absorptiometry and Anthropometry for the evaluation of body composition in adults. *Nutrients*. 2018;10:1469.
55. Ling CHY, de Craen AJM, Slaagboom PE, Gunn DA, Stokkel MPM, Westendorp RGJ, et al. Accuracy of direct segmental multi-frequency bioimpedance analysis in the assessment of total body and segmental body composition in middle-aged adult population. *Clin Nutr*. 2011;30:610–5.
56. Lin X, Li H. Obesity. *Epidemiology, pathophysiology, and therapeutics*. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2021;12:706978.
57. Bhaskaran K, dos-Santos-Silva I, Leon DA, Douglas LJ, Smeeth L. Association of BMI with overall and cause-specific mortality: a population-based cohort study of 3.6 million adults in the UK. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2018;6:944–53.
58. Lahav Y, Kfir A, Gepner Y. The paradox of obesity with normal weight; a cross-sectional study. *Front Nutr*. 2023;10:1173488.
59. Etchison WC, Bloodgood EA, Minton CP, Thompson NJ, Collins MA, Hunter SC, et al. Body Mass Index and percentage of body fat as indicators for obesity in an adolescent athletic population. *Sports Health: Multidisciplinary Approach*. 2011;3:249–52.
60. Organ LW, Bradham GB, Gore DT, Lozier SL. Segmental bioelectrical impedance analysis: theory and application of a new technique. *J Appl Physiol*. 1994;77:98–112.

61. Genser L, Casella Mariolo JR, Castagneto-Gissey L, Panagiotopoulos S, Rubino F. Obesity, Type 2 diabetes, and the metabolic syndrome. *Surg Clin North Am*. 2016;96:681–701.
62. Kyle UG, Bosaeus I, De Lorenzo AD, Deurenberg P, Elia M, Manuel Gómez J, et al. Bioelectrical impedance analysis—part II: utilization in clinical practice. *Clin Nutr*. 2004;23:1430–53.
63. Bosy-Westphal A, Danielzik S, Dörhöfer R-P, Piccoli A, Müller M. Patterns of bioelectrical impedance vector distribution by body mass index and age: implications for body-composition analysis. *Am J Clin Nutr*. 2005;82:60–8.
64. Baneaia TV, Tash W. The effects of acute water ingestion on body composition analyses via dual-energy X-Ray absorptiometry. *Clin Nutr*. 2020;39:3836–8.
65. Kelly DM, Jones TH. Testosterone: a metabolic hormone in health and disease. *J Endocrinol*. 2013;217:225–45.
66. Dhinda S, Ghanim H, Batra M, Dandona P. Hypogonadotropic hypogonadism in Men with Diabetes. *Diabetes Care*. 2018;41:1516–25.
67. Finkelstein JS, Lee H, Burnett-Bowie S-AM, Pallas JC, Yu EW, Borges LF, et al. Gonadal steroids and body composition, strength, and sexual function in men. *N Engl J Med*. 2013;369:1011–22.
68. Padilla CJ, Ferreyro FA, Arnold WD. Anthropometry as a readily accessible health assessment of older adults. *Exp Gerontol*. 2021;153:111464.
69. Bhattacharya A, Pal B, Mukherjee S, Roy SK. Assessment of nutritional status using anthropometric variables by multivariate analysis. *BMC Public Health*. 2019;19:1045.
70. Wang J, Thornton JC, Kolesnik S, Pierson RN. Anthropometry in body composition: an overview. *Ann NY Acad Sci*. 2000;904:317–26.
71. Scafoglieri A, Clarys JP, Cattyse E, Bautmans I. Use of anthropometry for the prediction of regional body tissue distribution in adults: benefits and limitations in clinical practice. *Aging Dis*. 2014;5:373–93.
72. de Onis M, Garza C, Victora CG, Onyango AW, Frongillo EA, Martinez J. The WHO Multicentre Growth Reference Study: planning, Study Design, and Methodology. *Food Nutr Bull*. 2004;25:515–26.
73. Heymsfield S, Wang Z, Vasser M, Gallagher D, Pierson R. Techniques used in the measurement of body composition: an overview with emphasis on bioelectrical impedance analysis. *Am J Clin Nutr*. 1996;64:547B–84.
74. Silva AM, Fields DA, Heymsfield SB, Sardinha LB. Body composition and power changes in Elite Judo athletes. *Int J Sports Med*. 2010;31:737–41.
75. Silva AM, Fields DA, Quitério AL, Sardinha LB. Are Skinfold-based models accurate and suitable for assessing changes in body composition in highly trained athletes? *J Strength Cond Res*. 2009;23:1688–96.
76. Holway F. Composición corporal en nutrición deportiva. *Nutrición aplicada al deporte*; 2011. pp. 195–226.
77. Baglietto N, Albaladejo-Saura M, Eparza-Ros F, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and differences between the equations for estimating muscle and bone mass using the anthropometric method in recreational strength trainees. *Peer J*. 2024;12.
78. Wajchenberg BL. Subcutaneous and visceral adipose tissue: their relation to the metabolic syndrome. *Endocr Rev*. 2000;21:697–738.
79. Wells J. The evolution of human fitness and susceptibility to obesity: an ethological approach. *Biol Rev*. 2006;81:183–205.
80. Jackson A, Stanforth P, Gagnon J, Rankinen T, Leon A, Rao D, et al. The effect of sex, age and race on estimating percentage body fat from body mass index: the Heritage Family Study. *Int J Obes*. 2002;26:789–96.
81. Manolopoulos K, Karpe F, Frayn K. Gluteofemoral body fat as a determinant of metabolic health. *Int J Obes*. 2010;34:949–59.
82. Despres JP. Obesity and lipid metabolism: relevance of body fat distribution. *Lipidology*. 1991;2.
83. Bosy-Westphal A, Geisler C, Omar S, Korth Q, Selberg Q, Schrezenmeir J, et al. Value of body fat mass vs anthropometric obesity indices in the assessment of metabolic risk factors. *Int J Obes*. 2006;30:475–83.
84. Doherty DJ. The influence of aging and sex on skeletal muscle mass and strength. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2001;4:503–8.
85. Jacob S, Stumvoll M, Becker R, Koch M, Nielsen M, Löblein K, et al. The PPAR γ polymorphism Pro12Ala is Associated with Better insulin sensitivity in the offspring of type 2 Diabetic patients. *Horm Metab Res*. 2000;32:413–6.
86. Clarys JP, Martin AD, Drinkwater DT, Mariell-Jones MJ. The skinfold: myth and reality. *J Sports Sci*. 1987;5:3–33.
87. Siedler MR, Rodriguez C, Stratton MT, Harty PS, Keith DS, Green JJ, et al. Assessing the reliability and cross-sectional and longitudinal validity of fifteen bioelectrical impedance analysis devices. *Br J Nutr*. 2023;130:827–40.
88. Frank AP, de Souza Santos R, Palmer BF, Clegg DJ. Determinants of body fat distribution in humans may provide insight about obesity-related health risks. *J Lipid Res*. 2019;60:1710–9.
89. Davison KK, Ford ES, Cogswell ME, Dietz WH. Percentage of body fat and Body Mass Index are Associated with Mobility limitations in people aged 70 and older from NHANES III. *J Am Geriatr Soc*. 2002;50:1802–9.
90. Lin Y, Wang X, Wu R, Zhou J, Feng F. Association between segmental body composition and bone mineral density in US adults: results from the NHANES (2011–2018). *BMC Endocr Disord*. 2023;23:246.
91. Wall-Scheffler CM, Myers MJ. Reproductive costs for everyone: how female loads impact human mobility strategies. *J Hum Evol*. 2013;64:448–56.
92. Hirani V. Generalised and abdominal adiposity are important risk factors for chronic disease in older people: results from a nationally representative survey. *J Nutr Health Aging*. 2011;15:469–78.
93. Rosmond R, Björntorp P. Quality of life, overweight, and body fat distribution in Middle-aged men. *Behav Med*. 2000;26:90–4.
94. Han TS, Tjohus MA, Lean ME, Seidell JC. Quality of life in relation to overweight and body fat distribution. *Am J Public Health*. 1998;88:1814–20.
95. Cavedon V, Sandri M, Venturini M, Zancanato C, Milanese C. Anthropometric prediction of DXA-Measured percentage of Fat Mass in athletes with unilateral lower limb amputation. *Front Physiol*. 2020;11.

Publisher's note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

VII - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VII - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias en la estimación de la adiposidad corporal mediante métodos antropométricos, BIA y DXA representan un desafío en la evaluación de la composición corporal (82,93). La variabilidad observada entre estos métodos no solo influye en la interpretación de los resultados individuales, sino que también puede impactar en la aplicación de estrategias de intervención en ámbitos clínicos y deportivos (89). Estudios previos han apuntado a que las divergencia en las estimaciones obtenidas en la presente tesis doctoral se deben, en gran medida, a los fundamentos metodológicos y poblaciones de referencia utilizadas para el desarrollo y validación de cada técnica (24,94).

La selección inadecuada de una ecuación o un método de evaluación de la composición corporal puede llevar a interpretaciones erróneas, afectando el monitoreo de la composición corporal en distintos contextos (89). La falta de consenso sobre qué método o ecuación emplear en función del perfil del individuo limita la posibilidad de establecer comparaciones directas y dificulta la implementación de protocolos estandarizados. En consecuencia, es fundamental analizar la concordancia y las diferencias entre las herramientas de estimación de la adiposidad, con el objetivo de optimizar su aplicación y mejorar la interpretación de los valores obtenidos (27,95).

El objetivo general de esta tesis doctoral fue evaluar la validez y la concordancia entre los principales métodos de estimación de la adiposidad corporal en adultos jóvenes físicamente activos, analizando sus discrepancias y su aplicabilidad en la práctica. Para ello, se compararon diversas ecuaciones antropométricas con valores obtenidos a través de BIA y DXA, considerando la variabilidad en la estimación de la grasa corporal según el método empleado. Asimismo, se analizaron las diferencias metodológicas entre las ecuaciones antropométricas en relación con el modelo de fraccionamiento de la composición corporal. A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos específicos de este estudio:

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las distintas ecuaciones antropométricas utilizadas para la estimación de la adiposidad corporal presentan diferencias significativas entre sí, lo que indica que no son intercambiables y que su aplicación debe ser considerada con precaución (24). En los hombres, los valores estimados oscilaron entre $8.90 \pm 2.17\%$ y $17.91 \pm 2.84\%$, mientras que en las mujeres la variabilidad fue aún mayor, con un rango entre $15.33 \pm 2.94\%$ y $28.79 \pm 3.30\%$. Estas discrepancias reflejan la influencia del modelo de referencia en la formulación de cada ecuación y la variabilidad de las poblaciones utilizadas para su validación (93). La concordancia entre ecuaciones también varió en función del sexo. En los hombres, se encontró un grado de acuerdo moderado entre las ecuaciones de Carter y Yuhasz, así como entre Civar y Faulkner, mientras que en mujeres, la ecuación de Carter mostró la mayor concordancia con Yuhasz. Sin embargo, la mayoría de las ecuaciones presentaron baja concordancia, lo que refuerza la idea de que su aplicabilidad en distintos contextos no es uniforme (69) y que la elección de una fórmula debe hacerse con base en las características específicas de la población evaluada (89,96).

Las comparaciones realizadas con la ecuación de Kerr evidenciaron una tendencia general a la sobrestimación o subestimación de la adiposidad, dependiendo de la fórmula utilizada (87). En hombres, las ecuaciones de Yuhasz, Carter y Sloan tendieron a subestimar la adiposidad en relación con Kerr (97,98), mientras que Peterson, Hastuti y Evans la sobrestimaron (99–101). En mujeres, se observó un patrón similar, donde las ecuaciones de Yuhasz, Carter y Evans generaron valores más bajos que la ecuación de Kerr, mientras que Peterson y Lean arrojaron valores superiores. Estas diferencias pueden deberse a la metodología utilizada en el desarrollo de cada ecuación, ya que mientras la ecuación de Kerr se basa en datos obtenidos de disección cadavérica, muchas de las demás fórmulas han sido validadas utilizando métodos indirectos, como la hidrodensitometría o DXA (87). La heterogeneidad en las muestras de validación también podría explicar las discrepancias observadas, ya que cada ecuación ha sido desarrollada en poblaciones con características específicas y su aplicabilidad puede no extenderse a otros grupos (89).

El análisis de la relación entre las ecuaciones antropométricas y las sumas de pliegues cutáneos mostró asociaciones significativas, aunque con ciertas variaciones según el sexo (24). En hombres, la ecuación de Kerr presentó una correlación alta con la suma de seis pliegues cutáneos, mientras que en mujeres la mayor relación se observó con la suma de ocho pliegues. Esto sugiere que, si bien las ecuaciones pueden reflejar de manera aproximada la cantidad de tejido adiposo subcutáneo, su grado de precisión depende de la población en la que fueron desarrolladas. Además, el índice de masa corporal (IMC) mostró una relación moderada con las ecuaciones de adiposidad, lo que indica que su utilidad como predictor de grasa corporal es limitada. Este hallazgo concuerda con estudios previos que han cuestionado la fiabilidad del IMC como un indicador de adiposidad en individuos físicamente activos, ya que sujetos con valores similares de IMC pueden presentar composiciones corporales muy diferentes (102).

Estos resultados refuerzan la necesidad de una selección cuidadosa de la ecuación antropométrica en función del contexto y la población evaluada, evitando comparaciones directas entre fórmulas con fundamentos metodológicos distintos. La variabilidad en la estimación de la adiposidad corporal observada en este estudio destaca la importancia de establecer criterios estandarizados para la elección y aplicación de ecuaciones en el ámbito clínico y deportivo, con el fin de minimizar errores en la interpretación de los resultados y optimizar la precisión de la evaluación de la adiposidad corporal.

Además de las diferencias observadas entre las ecuaciones antropométricas, los resultados de las investigaciones desarrolladas para la presente tesis doctoral muestran que la estimación de la masa grasa varía significativamente según el método utilizado, especialmente al comparar DXA con BIA y antropometría (103). Estas discrepancias reflejan las diferencias en los principios de medición de cada técnica y subrayan la necesidad de evaluar su concordancia y aplicabilidad en distintos contextos(104). La comparación entre métodos reveló que ni la antropometría ni la BIA pueden considerarse equivalentes a DXA, ya que se identificaron diferencias sistemáticas en la estimación de la adiposidad (77). En la muestra general, la prueba ANOVA evidenció diferencias significativas entre los tres métodos ($p < 0.001$), resultado que se mantuvo tras incluir el sexo como

covariable. En contraste, el estado de hidratación no mostró un efecto significativo sobre las estimaciones de masa grasa ($p = 0.332-0.527$). Los ajustes post-hoc de Bonferroni confirmaron que, salvo en algunas ecuaciones específicas, los valores de masa grasa obtenidos con DXA diferían significativamente de los obtenidos por BIA y antropometría ($p < 0.001$).

El análisis de concordancia mediante el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) mostró valores variables, con la mayoría de las ecuaciones presentando baja concordancia con DXA (CCC = 0.135–0.892). El análisis de Bland-Altman reveló una falta de acuerdo generalizada entre DXA y los métodos evaluados ($p < 0.001-0.007$). Sin embargo, algunas excepciones sugieren que ciertos métodos podrían aproximarse a DXA en poblaciones específicas. La ecuación de Carter presentó una concordancia aceptable con DXA en la muestra general, tanto en kilogramos de masa grasa ($p = 0.136$) como en porcentaje de adiposidad ($p = 0.929$). En mujeres, la ecuación de Evans fue la única que no mostró diferencias significativas con DXA en porcentaje de grasa ($p = 0.058$), lo que indica que podría ser una opción más confiable para este grupo poblacional (101).

Las discrepancias observadas en función del sexo evidencian que la exactitud de cada método puede depender de la población evaluada (53,105). En los hombres, ninguna de las ecuaciones analizadas mostró acuerdo con DXA en porcentaje ni en kilogramos de masa grasa ($p < 0.001$), lo que sugiere una menor aplicabilidad de estos métodos en esta población. En mujeres, aunque la mayoría de las ecuaciones mostraron diferencias significativas con DXA, la ecuación de Evans presentó una mejor concordancia, lo que resalta la importancia de considerar el sexo como un factor determinante en la selección de la fórmula o método de evaluación (106).

En cuanto al estado de hidratación, no se encontraron efectos significativos en la concordancia entre los métodos. Este resultado contrasta con estudios previos que han reportado que la hidratación puede influir en las mediciones de BIA (107,108), sugiriendo que el control de factores como la ingesta de líquidos, la actividad física y el ciclo menstrual en mujeres podría haber reducido su impacto en este estudio (36,109).

Los hallazgos de este estudio refuerzan la idea de que ni la antropometría ni la BIA pueden considerarse métodos completamente equivalentes a DXA para la estimación de la masa grasa general (103). No obstante, la ecuación de Carter en la muestra total y la ecuación de Evans en mujeres podrían ser opciones más cercanas a los valores de referencia obtenidos con DXA. En un análisis grupal, BIA podría representar una alternativa viable en mujeres, aunque su precisión a nivel individual sigue siendo cuestionable (96,110). Estos resultados resaltan la necesidad de emplear criterios estandarizados en la selección del método de evaluación, asegurando la consistencia en el monitoreo de la composición corporal y evitando interpretaciones erróneas debido a la variabilidad entre técnicas (36,111,112).

Respecto al análisis de la adiposidad segmental, diferencias significativas se encontraron entre las mediciones obtenidas mediante DXA y BIA, lo que confirma la falta de equivalencia entre ambos métodos para la evaluación de la grasa en distintas regiones corporales (113). En la muestra general, las diferencias fueron evidentes en la mayoría de los segmentos corporales ($p < 0.001$), especialmente en las extremidades inferiores y el tronco, donde BIA sobrestimó la grasa respecto a DXA. Sin embargo, el grado de discrepancia varió según el segmento analizado y el sexo de los participantes. En el caso de los miembros superiores, la diferencia entre los métodos fue menor, aunque se mantuvo significativa, mientras que en el tronco y las extremidades inferiores las discrepancias fueron más marcadas. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han reportado limitaciones en la capacidad de BIA para diferenciar con precisión la grasa segmentaria (114), especialmente en personas con mayor adiposidad.

El análisis de covariables mostró que el IMC tuvo un impacto significativo en las diferencias observadas entre BIA y DXA para la estimación de la grasa segmentaria (113). Se observó que a mayor IMC, mayor era la sobrestimación de BIA, lo que coincide con estudios previos que han identificado que este método tiende a presentar errores más pronunciados en individuos con índices de masa corporal elevados (89). Este efecto fue particularmente notorio en el tronco, donde

las discrepancias fueron más marcadas en sujetos con mayor adiposidad central. En contraste, el estado de hidratación no mostró un impacto significativo en las diferencias entre los métodos (113), lo que sugiere que los protocolos seguidos para estandarizar las mediciones lograron minimizar la influencia de la variabilidad hídrica sobre los resultados.

Al considerar las diferencias por sexo, se identificó que la estimación de la grasa segmentaria mediante BIA presentó una menor concordancia con DXA en los hombres, mientras que en las mujeres las discrepancias fueron menores. Esto podría explicarse por las diferencias en la distribución del tejido adiposo entre ambos sexos (53), dado que los hombres presentan una mayor acumulación de grasa visceral, mientras que las mujeres tienden a almacenar mayor cantidad de grasa subcutánea en las extremidades inferiores (53). La diferente composición y distribución de los compartimentos adiposos podría influir en la capacidad de BIA para estimar correctamente la adiposidad en cada segmento corporal.

Dado el alto costo y la limitada accesibilidad de DXA en ciertos entornos, se desarrollaron modelos de regresión multivariada basados en antropometría para predecir la cantidad de grasa en cada segmento corporal. Estos modelos demostraron una alta precisión predictiva, con coeficientes de determinación (R^2) que oscilaron entre 0.758 y 0.910 para hombres y mujeres ($p < 0.001$), lo que sugiere que la antropometría podría ser una alternativa viable en entornos donde DXA no está disponible. Se identificó que las variables con mayor capacidad predictiva variaban según el segmento analizado: en los miembros superiores, los pliegues del tríceps y del bíceps fueron los predictores más relevantes, mientras que en el tronco el perímetro de la cintura y el pliegue supraespinal mostraron la mayor capacidad explicativa. Para las extremidades inferiores, el pliegue del muslo y el perímetro de muslo medio fueron los principales predictores de la adiposidad segmental.

Estos resultados refuerzan la utilidad de la antropometría para la evaluación de la adiposidad corporal segmental, proporcionando una alternativa de bajo costo y fácil aplicación para la estimación de la grasa en diferentes segmentos corporales.

Sin embargo, aunque los modelos propuestos muestran una alta capacidad predictiva, su aplicabilidad en diferentes poblaciones debe ser evaluada en futuros estudios. La validación de estos modelos en poblaciones con diferentes características antropométricas, niveles de adiposidad y perfiles deportivos podría mejorar su generalización y aplicabilidad en la práctica clínica y deportiva (104).

En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de utilizar metodologías estandarizadas y apropiadas según el contexto de aplicación. Si bien DXA sigue siendo el método de referencia, su inaccesibilidad en muchos entornos refuerza la importancia de contar con métodos alternativos, como la antropometría, para la estimación de la grasa segmentaria. La correcta selección del método y la ecuación predictiva adecuada permitirá una evaluación más precisa y aplicable de la adiposidad corporal, asegurando su utilidad tanto en la práctica clínica como en la investigación.

VIII – CONCLUSIONES

VIII - CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIÓN GENERAL

En respuesta al objetivo general de esta tesis, se concluye que las distintas fórmulas y métodos empleados para estimar la masa grasa corporal mediante DXA, BIA y antropometría presentan diferencias significativas en sus valores estimados, evidenciando la falta de concordancia entre ellos y resaltando que no son métodos intercambiables. Además, el sexo se establece como un factor determinante en el análisis de grasa corporal, siendo necesario considerarlo al utilizar cualquiera de estos métodos. Sin embargo, ni el estado de hidratación ni el IMC han mostrado ejercer influencia significativa en las estimaciones obtenidas. Finalmente, los modelos antropométricos desarrollados para estimar la grasa segmental demuestran ser una alternativa robusta, confiable y económica en ausencia del DXA, aportando un recurso válido para evaluaciones de adiposidad segmental.

5.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

En respuesta a los objetivos específicos 1, 2 y 3, se concluye que existen diferencias significativas entre las distintas fórmulas de estimación de adiposidad mediante antropometría, y la mayoría de ellas presentan una baja concordancia. Este hallazgo confirma que los resultados de estas fórmulas no son comparables entre sí, lo que resalta la importancia de utilizar la misma fórmula al comparar con referencias o al evaluar el progreso en un mismo sujeto. La fórmula de Kerr se destaca como una alternativa óptima, al haber sido validada en cadáveres y contar con un protocolo estandarizado que incluye seis pliegues cutáneos de diferentes segmentos corporales, siendo actualmente una de las metodologías más utilizadas a nivel mundial.

En relación con los objetivos específicos 4, 5, 6 y 7, se concluye que las fórmulas de antropometría y BIA para la evaluación de la masa grasa pueden no ser válidas respecto a los valores reportados por DXA, con excepción de las

fórmulas de Carter y Forsyth en la muestra general y la fórmula de Evans en la muestra femenina.

En particular, BIA se presenta como una alternativa válida para la estimación de masa grasa en mujeres a nivel grupal, proporcionando una opción accesible y específica para evaluaciones en este segmento.

Finalmente, en respuesta a los objetivos específicos 8, 9 y 10, los resultados muestran que la BIA presenta una validez limitada para la estimación de masa grasa segmental en comparación con DXA. Ni el IMC ni el estado de hidratación ejercieron una influencia significativa en las diferencias observadas entre BIA y DXA, sin embargo, el sexo se posicionó como un factor determinante, indicando la necesidad de enfoques específicos según el sexo tanto en entornos clínicos como en salud pública. Como respuesta a esta necesidad, los modelos de regresión antropométricos desarrollados en esta investigación ofrecen una alternativa confiable y económica para estimar la masa grasa en extremidades superiores, tronco y extremidades inferiores. Estos modelos resultan especialmente útiles para iniciativas de salud pública de gran escala, contribuyendo a la detección temprana y al apoyo de estrategias de cuidado individualizado en comunidades diversas.

5.3. GENERAL CONCLUSION

In response to the general objective of this thesis, it is concluded that the different formulas and methods used to estimate body fat mass through DXA, BIA, and anthropometry show significant differences in their estimated values, highlighting the lack of agreement among them and underscoring that these methods are not interchangeable. Furthermore, sex is established as a determining factor in body fat analysis, making its consideration necessary when using any of these methods. However, hydration status and BMI did not demonstrate a significant influence on the obtained estimates. Finally, the anthropometric models developed for segmental fat estimation prove to be a robust, reliable, and cost-effective alternative in the absence of DXA, providing a valid resource for segmental adiposity evaluations.

5.4. SPECIFIC CONCLUSIONS

In response to specific objectives 1, 2, and 3, it is concluded that significant differences exist among the various formulas for adiposity estimation using anthropometry, with most of them showing low agreement. This finding confirms that the results of these formulas are not comparable, emphasizing the importance of using the same formula when comparing with references or monitoring progress in the same individual. Kerr's formula stands out as an optimal alternative, validated in cadavers and supported by a standardized protocol that includes six skinfolds from different body segments, making it one of the most widely used methodologies globally.

Regarding specific objectives 4, 5, 6, and 7, it is concluded that anthropometric and BIA formulas for fat mass evaluation may not be valid compared to the values reported by DXA, except for the Carter and Forsyth formulas in the general sample and the Evans formula in the female sample. In particular, BIA emerges as a valid alternative for fat mass estimation in women at the group level, offering an accessible and specific option for evaluations in this segment.

Finally, in response to specific objectives 8, 9, and 10, the results indicate that BIA has limited validity for segmental fat mass estimation compared to DXA. Neither BMI nor hydration status had a significant influence on the differences observed between BIA and DXA; however, sex was identified as a determining factor, highlighting the need for sex-specific approaches in both clinical and public health settings. Addressing this need, the anthropometric regression models developed in this research provide a reliable and cost-effective alternative for estimating fat mass in the upper limbs, trunk, and lower limbs. These models are particularly useful for large-scale public health initiatives, contributing to early detection and supporting individualized care strategies in diverse communities.

IX – APLICACIONES PRÁCTICAS

IX - APLICACIONES PRÁCTICAS

Las siguientes aplicaciones prácticas se derivan de los estudios realizados en esta tesis, los cuales han seguido una línea progresiva de análisis sobre los métodos de estimación de adiposidad corporal, abordando desde la evaluación general hasta la segmental. Estos hallazgos ofrecen directrices prácticas aplicables en contextos de salud, deporte y estética corporal, y resaltan la importancia de seleccionar metodologías consistentes y adaptadas al propósito de la evaluación.

En el primer estudio, se evaluaron diversas fórmulas dentro del método antropométrico para la estimación de adiposidad general y se encontraron discrepancias significativas entre ellas. Estas diferencias, junto con la baja concordancia entre fórmulas, subrayan que los resultados obtenidos mediante distintos modelos de antropometría no son intercambiables. Por lo tanto, para lograr consistencia en la evaluación de la composición corporal de un individuo a lo largo del tiempo o al compararlo con referencias, es esencial utilizar siempre la misma fórmula. En este sentido, la fórmula de Kerr se presenta como una opción óptima, especialmente para poblaciones de jóvenes activos, ya que ha sido ampliamente validada y utiliza seis pliegues cutáneos de diferentes segmentos corporales, siguiendo un protocolo estandarizado. Esta recomendación es de gran utilidad tanto en salud como en contextos deportivos y estéticos, donde la precisión y la fiabilidad en la estimación de la masa grasa son fundamentales para evaluar cambios en la composición corporal y adaptarse a los objetivos individuales.

Tras el análisis inicial de las fórmulas antropométricas, en el segundo estudio se profundizó en la comparación de la antropometría con otros métodos comúnmente empleados, como la BIA y el DXA, este último utilizado como método de referencia para la evaluación de adiposidad general. Los resultados nuevamente demostraron que ni la antropometría ni BIA son válidas en términos generales frente a DXA, lo cual enfatiza que estos métodos no son intercambiables. Este hallazgo es relevante para profesionales en nutrición, entrenamiento deportivo y estética corporal y todo profesional cuya información sobre la adiposidad corporal impacte su diagnóstico y/o intervención, ya que implica que el seguimiento de la masa grasa de un individuo debe realizarse siempre con el mismo método y

fórmula para asegurar una evaluación coherente de su progreso. Además, se observó que el sexo influye de manera significativa en los resultados, lo que indica la necesidad de utilizar protocolos y métodos específicos según el sexo de la persona evaluada. Este ajuste permite que el profesional pueda personalizar las estrategias de intervención y análisis en función de las particularidades fisiológicas de cada individuo, logrando así un enfoque más preciso en la evaluación de la composición corporal, ya sea en la monitorización de atletas, el seguimiento de pacientes, o en programas de estética corporal.

En el tercer estudio, el enfoque se centró en el análisis de la adiposidad segmental, comparando DXA y BIA, y nuevamente se encontraron diferencias notables entre estos métodos en la evaluación de grasa segmental. Ante la ausencia de modelos propuestos en la literatura para estimar la grasa segmental mediante antropometría siguiendo protocolos estandarizados, se desarrollaron modelos de regresión específicos, utilizando DXA como criterio de referencia, para ofrecer alternativas fiables que permitan evaluar la distribución de grasa en diferentes segmentos corporales. Estos modelos antropométricos para estimar los kilogramos de grasa en extremidades superiores, tronco y extremidades inferiores representan una alternativa accesible y económica frente a DXA, y tienen aplicaciones prácticas en ámbitos con recursos limitados o en situaciones donde se requieren evaluaciones regulares sin acceso a equipos de alta tecnología. En el contexto deportivo, estos modelos permiten a los entrenadores y preparadores físicos monitorear la distribución de grasa en segmentos específicos que pueden influir en el rendimiento y funcionalidad de los atletas considerando las necesidades específicas de su disciplina. En el campo de la estética corporal, estos modelos facilitan el análisis de grasa en áreas específicas del cuerpo, ayudando a definir estrategias orientadas a la reducción de grasa localizada según los objetivos estéticos de cada persona.

En conclusión, los resultados de esta tesis doctoral subrayan la importancia de un enfoque estructurado, sistematizado y adaptado a cada contexto, mostrando que la selección de un método adecuado y consistente es clave para obtener resultados precisos en la evaluación de la adiposidad. La contribución de esta tesis, desde la validación de fórmulas antropométricas hasta el desarrollo de modelos segmentarios, proporciona herramientas prácticas y accesibles tanto para

profesionales de la salud como para entrenadores deportivos y especialistas en estética corporal, mejorando así la precisión en el análisis y en las intervenciones.

X - LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

X - LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las limitaciones presentes en las investigaciones realizadas en esta tesis doctoral reflejan las complejidades inherentes a la evaluación de la adiposidad a través de diversos métodos y poblaciones. Aunque se lograron avances significativos en el análisis de adiposidad corporal mediante DXA, BIA y fórmulas antropométricas, ciertos aspectos metodológicos y de diseño limitan la generalización de los hallazgos a otros grupos de población y contextos prácticos. A continuación, se detallan las principales limitaciones de cada estudio y se proponen futuras líneas de investigación orientadas a superar estos desafíos, ampliar la aplicabilidad de los modelos desarrollados y optimizar las herramientas de evaluación de la composición corporal en diferentes ámbitos.

Artículo 1:

a. La muestra del estudio se limitó a individuos físicamente activos y saludables, sin niveles extremos de adiposidad o masa muscular, lo cual restringe la generalización de los resultados.

b. No es posible extrapolar directamente estos hallazgos a poblaciones con características corporales significativamente diferentes, como culturistas, jugadores de fútbol americano o personas con obesidad.

Artículo 2:

a. Las fórmulas utilizadas en el estudio no fueron validadas específicamente para la población analizada, aunque esta práctica es común en entornos clínicos e investigativos.

b. Se utilizaron fórmulas de regresión para convertir la fórmula de Kerr, que evalúa "tejido adiposo", en "masa grasa" para facilitar comparaciones, lo cual puede haber introducido errores en la uniformidad de los resultados.

c. La BIA se realizó en posición de pie con un dispositivo que no brinda las propiedades eléctricas completas, limitando la posibilidad de utilizar fórmulas de bioimpedancia diversas para la estimación de masa grasa.

d. El estado de hidratación de los participantes fue evaluado, pero no manipulado, por lo que su influencia en la concordancia y validez de la antropometría y BIA respecto a DXA no pudo ser analizada de forma exhaustiva.

Artículo 3:

a. La muestra incluyó únicamente individuos jóvenes con rangos normales de IMC y un estado de hidratación adecuado. Aunque los hallazgos son sólidos en el contexto de este estudio, son aplicables principalmente a individuos con perfiles demográficos y fisiológicos similares. Por lo tanto, los resultados de esta investigación no pueden generalizarse a otras poblaciones. Investigaciones futuras deberían incluir una población más heterogénea y representativa en términos de edad, niveles de adiposidad y estado de hidratación, lo cual mejoraría la validez externa de los modelos y permitiría su aplicación a grupos más amplios, como adultos mayores, niños o individuos con características extremas de composición corporal, como atletas de élite o personas con obesidad.

b. La muestra fue seleccionada por conveniencia. Sin embargo, aunque el tamaño de la muestra fue considerablemente mayor en comparación con estudios previos, se limitó a estudiantes universitarios de etnia caucásica provenientes principalmente de países del sur y este de Europa. Esto podría haber significado que la muestra no sea representativa de la población joven en general, y las características particulares de los individuos accesibles para esta investigación podrían haber influido en los resultados obtenidos. Estas cuestiones pueden limitar la generalización de los hallazgos. Esto hace necesario replicar este estudio en futuras investigaciones con muestras más diversas en términos de estado de hidratación, IMC, edad, etnia y condiciones metabólicas, entre otros, o mediante muestras seleccionadas al azar.

c. Aunque las ecuaciones generadas demostraron un fuerte poder predictivo dentro de la muestra estudiada, su rendimiento en poblaciones diversas sigue siendo una cuestión pendiente. Además, algunas de las variables mostraron alta multicolinealidad, lo que posiblemente afectó el poder predictivo del modelo. Investigaciones futuras deberían priorizar la inclusión de grupos de validación

independientes y una gama más amplia de individuos para confirmar la fiabilidad de estos modelos, tanto para el análisis grupal como para evaluaciones individuales, y también para verificar el peso específico de las variables predictivas en el modelo.

d. Se utilizó un dispositivo de BIA en posición de pie, que, aunque es ampliamente aceptado y frecuentemente utilizado en entornos clínicos y deportivos, puede producir discrepancias en comparación con sistemas de BIA en posición supina. La colocación de ocho electrodos en manos y pies, estándar en muchos dispositivos de BIA, ha demostrado una validez aceptable para la estimación de la composición corporal total, pero podría no ser óptima para análisis específicos por segmentos corporales, especialmente en poblaciones especiales, como aquellas con trastornos de retención de líquidos o asimetrías [90].

e. Los modelos predictivos desarrollados aquí deben ser evaluados en condiciones extremas de IMC o niveles anormales de hidratación, ya que estos factores influyen en las estimaciones basadas en BIA.

f. Este estudio no incluyó un análisis longitudinal. Si bien los diseños transversales ofrecen información valiosa, los estudios longitudinales podrían proporcionar evidencia más sólida sobre la capacidad predictiva de los modelos a lo largo del tiempo. Investigaciones futuras deberían adoptar enfoques longitudinales para evaluar la estabilidad y fiabilidad de estos modelos bajo diferentes condiciones fisiológicas y en distintos momentos temporales.

A partir de estas limitaciones, se identifican varias líneas de investigación que pueden contribuir a mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos de estimación de composición corporal desarrollados. En primer lugar, sería relevante investigar estas metodologías en poblaciones específicas, como atletas de élite, personas con obesidad o poblaciones con características extremas de masa muscular, para evaluar si los modelos mantienen su validez y precisión en contextos más variados. Establecer puntos de corte respecto a la adiposidad abdominal utilizando los modelos propuestos, sería de gran utilidad para el ámbito

clínico. También sería valioso establecer el mejor método para realizar un seguimiento longitudinal de la composición corporal, comparando el rendimiento de cada metodología a lo largo del tiempo y su capacidad para detectar cambios en diferentes entornos, como salud, deporte y estética.

Asimismo, se sugiere explorar el efecto del estado de hidratación sin protocolización, así como la influencia de la ingesta de alimentos en los métodos de estimación de masa grasa, especialmente en el caso de la BIA. Esta investigación permitiría evaluar la variabilidad introducida por estos factores en situaciones cotidianas, haciendo los métodos más aplicables en contextos prácticos. Además, el análisis de la influencia del consumo de fármacos y suplementación en los resultados de los métodos de estimación de composición corporal puede ofrecer una comprensión más profunda de cómo estos factores afectan la precisión de las medidas.

Por último, se recomienda incorporar un grupo de validación en futuros estudios para confirmar la generalización de las ecuaciones de masa grasa segmental desarrolladas, no solo en estudios poblacionales, sino también en evaluaciones individuales, proporcionando una base más sólida para su aplicación en diferentes contextos y poblaciones. Esta validación contribuiría a la adopción de estos modelos en la práctica clínica, deportiva y estética, optimizando la precisión y la aplicabilidad de las evaluaciones de la grasa segmental.

XI - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

XI - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Okunogbe A, Nugent R, Spencer G, Powis J, Ralston J, Wilding J. Economic impacts of overweight and obesity: current and future estimates for 161 countries. *BMJ Glob Health*. 2022 Sep 20;7(9):e009773.
2. Heymsfield SB, Wadden TA. Mechanisms, Pathophysiology, and Management of Obesity. *New England Journal of Medicine*. 2017 Jan 19;376(3):254–66.
3. Fock KM, Khoo J. Diet and exercise in management of obesity and overweight. *J Gastroenterol Hepatol*. 2013 Dec 19;28(S4):59–63.
4. Marra M, Sammarco R, De Lorenzo A, Iellamo F, Siervo M, Pietrobelli A, et al. Assessment of Body Composition in Health and Disease Using Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) and Dual Energy X-Ray Absorptiometry (DXA): A Critical Overview. *Contrast Media Mol Imaging*. 2019 May 29;2019:1–9.
5. Nana A, Slater GJ, Stewart AD, Burke LM. Methodology review: Using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) for the assessment of body composition in athletes and active people. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2015 Apr 1;25(2):198–215.
6. Lepers B, Knechtle P, Barandun U, Rosemann T. Predictor variables for half marathon race time in recreational female runners. *Clinics*. 2011;66(2).
7. Knechtle B, Tanda G. Marathon performance in relation to body fat percentage and training indices in recreational male runners. *Open Access J Sports Med*. 2013 May;141.
8. Ackerman KE, Holtzman B, Cooper KM, Flynn EF, Bruinvels G, Tenforde AS, et al. Low energy availability surrogates correlate with health and performance consequences of Relative Energy Deficiency in Sport. *Br J Sports Med*. 2019 May;53(10):628–33.

9. Keogh JWL, Hume PA, Pearson SN, Mellow PJ. Can Absolute and Proportional Anthropometric Characteristics Distinguish Stronger and Weaker Powerlifters? *J Strength Cond Res.* 2009 Nov;23(8):2256–65.
10. Manolopoulos K, Karpe F, Frayn K. Gluteofemoral body fat as a determinant of metabolic health. *Int J Obes.* 2010;34:949–59.
11. Després JP, Lemieux I, Bergeron J, Pibarot P, Mathieu P, Larose E, et al. Abdominal Obesity and the Metabolic Syndrome: Contribution to Global Cardiometabolic Risk. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2008 Jun;28(6):1039–49.
12. Davison KK, Ford ES, Cogswell ME, Dietz WH. Percentage of Body Fat and Body Mass Index Are Associated with Mobility Limitations in People Aged 70 and Older from NHANES III. *J Am Geriatr Soc.* 2002 Nov 5;50(11):1802–9.
13. Prado CMM, Wells JCK, Smith SR, Stephan BCM, Siervo M. Sarcopenic obesity: A Critical appraisal of the current evidence. *Clinical Nutrition.* 2012 Oct;31(5):583–601.
14. Narici M V., Maffulli N. Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. *Br Med Bull.* 2010 Sep 1;95(1):139–59.
15. Reas DL, Masheb RM, Grilo CM. Appearance vs. Health Reasons for Seeking Treatment Among Obese Patients with Binge Eating Disorder. *Obes Res.* 2004 May 6;12(5):758–60.
16. Robertson RJ, Goss FL, Metz KF. Perception of Physical Exertion during Dynamic Exercise: A Tribute to Professor Gunnar A. V. Borg. *Percept Mot Skills.* 1998 Feb 1;86(1):183–91.
17. Trexler ET, Smith-Ryan AE, Norton LE. Metabolic adaptation to weight loss: implications for the athlete. *J Int Soc Sports Nutr.* 2014 Aug 15;11(1).
18. Clark JE. Diet, exercise or diet with exercise: comparing the effectiveness of treatment options for weight-loss and changes in fitness for adults (18–65 years old) who are overfat, or obese; systematic review and meta-analysis. *J Diabetes Metab Disord.* 2015 Apr 17;14(1):31.

19. Reilly T, George K, Marfell-Jones M, Scott M, Sutton L, Wallace J. How Well do Skinfold Equations Predict Percent Body Fat in Elite Soccer Players? *Int J Sports Med.* 2009 Aug 19;30(08):607–13.
20. Siri WE. The Gross Composition of the Body. In 1956. p. 239–80.
21. Clarys JP, Martin AD, Drinkwater DT, Marfell-Jones MJ. The skinfold: Myth and reality. *J Sports Sci.* 1987;5(1):3–33.
22. Silva AM, Fields DA, Quitério AL, Sardinha LB. Are Skinfold-Based Models Accurate and Suitable for Assessing Changes in Body Composition in Highly Trained Athletes? *J Strength Cond Res.* 2009 Sep;23(6):1688–96.
23. Marfell-Jones MJ. The Value of the Skinfold – background, assumptions, cautions and recommendations on taking and interpreting skinfold measurements. :1–10.
24. Mecherques-Carini M, Esparza-Ros F, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R. Agreement and Differences between Fat Estimation Formulas Using Kinanthropometry in a Physically Active Population. *Applied Sciences.* 2022 Dec 1;12(24):13043.
25. Ackland TR, Lohman TG, Sundgot-Borgen J, Maughan RJ, Meyer NL, Stewart AD, et al. Current Status of Body Composition Assessment in Sport. *Sports Medicine.* 2012 Mar;42(3):227–49.
26. Martin AD, Ross WD, Drinkwater DT, Clarys J. Prediction of body fat by skinfold caliper: assumptions and cadaver evidence. *Int J Obes.* 1985;9(1):1–31.
27. Martin AD, Daniel MZ, Drinkwater DT, Clarys JP. Adipose tissue density, estimated adipose lipid fraction and whole body adiposity in male cadavers. *Int J Obes Relat Metab Disord [Internet].* 1994 Feb;18(2):79–83. Available from: <http://europepmc.org/abstract/MED/8148928>
28. Clarys, J; Martin, A; Drinkwater D. Gross Tissue Weights in the Human Body By Cadaver Dissection. *Hum Biol.* 1984;56(3):459–73.
29. Kushner R, Schoeller D. Estimation of total body water by bioelectrical impedance analysis. *Am J Clin Nutr.* 1986 Sep;44(3):417–24.
30. Kyle U. Bioelectrical impedance analysis?part I: review of principles and methods. *Clinical Nutrition.* 2004 Oct;23(5):1226–43.

31. Bosy-Westphal A, Danielzik S, Dörhofer RP, Piccoli A, Müller MJ. Patterns of bioelectrical impedance vector distribution by body mass index and age: implications for body-composition analysis. *Am J Clin Nutr.* 2005 Jul 1;82(1):60–8.
32. Moon JR, Eckerson JM, Tobkin SE, Smith AE, Lockwood CM, Walter AA, et al. Estimating body fat in NCAA Division I female athletes: a five-compartment model validation of laboratory methods. *Eur J Appl Physiol.* 2009 Jan 21;105(1):119–30.
33. Eston RG, Rowlands A V, Charlesworth S, Davies A, Hoppitt T. Prediction of DXA-determined whole body fat from skinfolds: importance of including skinfolds from the thigh and calf in young, healthy men and women. *Eur J Clin Nutr.* 2005 May 1;59(5):695–702.
34. Pietrobelli A, Formica C, Wang Z, Heymsfield SB. Dual-energy X-ray absorptiometry body composition model: review of physical concepts. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism.* 1996 Dec 1;271(6):E941–51.
35. Snijder M, Visser M, Dekker J, Seidell J, Fuerst T, Tylavsky F, et al. The prediction of visceral fat by dual-energy X-ray absorptiometry in the elderly: a comparison with computed tomography and anthropometry. *Int J Obes.* 2002 Jul 25;26(7):984–93.
36. Nana A, Slater GJ, Hopkins WG, Halson SL, Martin DT, West NP, et al. Importance of standardized DXA protocol for assessing physique changes in athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2016 Jun 1;26(3):259–67.
37. Wagner DR, Heyward VH. Techniques of Body Composition Assessment: A Review of Laboratory and Field Methods. *Res Q Exerc Sport.* 1999 Jun;70(2):135–49.
38. Moon JR. Body composition in athletes and sports nutrition: an examination of the bioimpedance analysis technique. *Eur J Clin Nutr.* 2013 Jan 9;67(S1):S54–9.
39. Scafoglieri A, Tresignie J, Provyn S, Marfell-Jones M, George K, Clarys JP, et al. Accuracy and concordance of anthropometry for measuring regional fat

- distribution in adults aged 20–55 years. *American Journal of Human Biology*. 2013 Jan 7;25(1):63–70.
40. Wang Z. The five-level model : a new approach to organizing. 2018;(May).
 41. Fields DA, Goran MI, McCrory MA. Body-composition assessment via air-displacement plethysmography in adults and children: a review. *Am J Clin Nutr*. 2002 Mar;75(3):453–67.
 42. Gutin B, Litaker M, Islam S, Manos T, Smith C, Treiber F. Body-composition measurement in 9–11-y-old children by dual-energy X-ray absorptiometry, skinfold-thickness measurements, and bioimpedance analysis. *Am J Clin Nutr*. 1996 Mar;63(3):287–92.
 43. Shen W, Punyanitya M, Chen J, Gallagher D, Albu J, Pi-Sunyer X, et al. Waist Circumference Correlates with Metabolic Syndrome Indicators Better Than Percentage Fat. *Obesity*. 2006 Apr 6;14(4):727–36.
 44. Blüher M. Metabolically Healthy Obesity. *Endocr Rev*. 2020 Jun 1;41(3).
 45. Després JP. Obesity and lipid metabolism: relevance of body fat distribution. *Lipidology*. 1991;2.
 46. Piché ME, Poirier P, Lemieux I, Després JP. Overview of Epidemiology and Contribution of Obesity and Body Fat Distribution to Cardiovascular Disease: An Update. *Prog Cardiovasc Dis*. 2018 Jul;61(2):103–13.
 47. Nicolás Messina D. Estimation of Arm Fat Percentage: from Segmental Bioimpedance to Anthropometry. *International Journal of Kinanthropometry*. 2024 Apr 30;4(1):24–31.
 48. Wingo BC, Barry VG, Ellis AC, Gower BA. Comparison of segmental body composition estimated by bioelectrical impedance analysis and dual-energy X-ray absorptiometry. *Clin Nutr ESPEN*. 2018 Dec;28:141–7.
 49. Van Gaal LF, Mertens IL, De Block CE. Mechanisms linking obesity with cardiovascular disease. *Nature*. 2006 Dec 13;444(7121):875–80.
 50. Frank AP, de Souza Santos R, Palmer BF, Clegg DJ. Determinants of body fat distribution in humans may provide insight about obesity-related health risks. *J Lipid Res*. 2019 Oct;60(10):1710–9.
 51. Ward LC. Segmental bioelectrical impedance analysis. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2012 Sep;15(5):424–9.

52. Daniel, M; Martin, A; Fainman C. Hormonas sexuales y distribución del tejido adiposo en mujeres fumadoras pre – menopausicas. Actualización en ciencias del deporte. 1993;1(4):9–26.
53. Chang E, Varghese M, Singer K. Gender and Sex Differences in Adipose Tissue. *Curr Diab Rep.* 2018 Sep 1;18(9):69.
54. Cavedon V, Sandri M, Venturelli M, Zancanaro C, Milanese C. Anthropometric Prediction of DXA-Measured Percentage of Fat Mass in Athletes With Unilateral Lower Limb Amputation. *Front Physiol.* 2020 Dec 23;11.
55. Lagares Alonso AM, Lagares Alonso N, Álvarez Salas M, Garcés Pérez L, Lérica Benitez L, Romero Romero B. Afección musculoesquelética asociada a amputados de miembro inferior. *Rehabilitacion (Madr).* 2012 Jan;46(1):15–21.
56. Sarin H V., Lee JH, Jauhiainen M, Joensuu A, Borodulin K, Männistö S, et al. Substantial fat mass loss reduces low-grade inflammation and induces positive alteration in cardiometabolic factors in normal-weight individuals. *Sci Rep.* 2019 Mar 5;9(1):3450.
57. Khanna D, Khanna S, Khanna P, Kahar P, Patel BM. Obesity: A Chronic Low-Grade Inflammation and Its Markers. *Cureus.* 2022 Feb 28;
58. Stubbs RJ, Hopkins M, Finlayson GS, Duarte C, Gibbons C, Blundell JE. Potential effects of fat mass and fat-free mass on energy intake in different states of energy balance. *Eur J Clin Nutr.* 2018 May 10;72(5):698–709.
59. Smith U. Abdominal obesity: a marker of ectopic fat accumulation. *Journal of Clinical Investigation.* 2015 May 1;125(5):1790–2.
60. Pluta W, Dudzińska W, Lubkowska A. Metabolic Obesity in People with Normal Body Weight (MONW)—Review of Diagnostic Criteria. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Jan 6;19(2):624.
61. Sun J, Zhang Z, Liu Z, Li J, Kang W. The Correlation of Total Percent Fat With Alterations in Cholesterol and Triglycerides in Adults. *Front Nutr.* 2022 May 31;9.
62. Zhu S, Wang Z, Shen W, Heymsfield SB, Heshka S. Percentage body fat ranges associated with metabolic syndrome risk: results based on the third

- National Health and Nutrition Examination Survey (1988–1994). *Am J Clin Nutr.* 2003 Aug;78(2):228–35.
63. Larsson SC, Spyrou N, Mantzoros CS. Body fatness associations with cancer: evidence from recent epidemiological studies and future directions. *Metabolism.* 2022 Dec;137:155326.
64. Lauby-Secretan B, Scoccianti C, Loomis D, Grosse Y, Bianchini F, Straif K. Body Fatness and Cancer – Viewpoint of the IARC Working Group. *New England Journal of Medicine.* 2016 Aug 25;375(8):794–8.
65. Zaccagni L, Rinaldo N, Bramanti B, Mongillo J, Gualdi-Russo E. Body image perception and body composition: assessment of perception inconsistency by a new index. *J Transl Med.* 2020 Dec 14;18(1):20.
66. Park S. Comparison of body composition between fashion models and women in general. *J Exerc Nutrition Biochem.* 2017 Dec 31;21(4):22–6.
67. Komici K, D’Amico F, Verderosa S, Piomboni I, D’Addona C, Picerno V, et al. Impact of Body Composition Parameters on Lung Function in Athletes. *Nutrients.* 2022 Sep 1;14(18).
68. Maciejczyk M, Wiecek M, Szymura J, Szygula Z, Brown LE. Influence of Increased Body Mass and Body Composition on Cycling Anaerobic Power. *J Strength Cond Res.* 2015 Jan;29(1):58–65.
69. Holway F. Composición corporal en nutrición deportiva. In: *Nutrición aplicada al deporte.* 1st ed. McGraw-Hill; 2011. p. 195–226.
70. Walker S, von Bonsdorff M, Cheng S, Häkkinen K, Bondarev D, Heinonen A, et al. Body composition in male lifelong trained strength, sprint and endurance athletes and healthy age-matched controls. *Front Sports Act Living.* 2023 Oct 31;5.
71. Villa M, Villa-Vicente JG, Seco-Calvo J, Mielgo-Ayuso J, Collado PS. Body Composition, Dietary Intake and the Risk of Low Energy Availability in Elite-Level Competitive Rhythmic Gymnasts. *Nutrients.* 2021 Jun 18;13(6):2083.
72. Barbieri D, Zaccagni L, Babić V, Rakovac M, Mišigoj-Duraković M, Gualdi-Russo E. Body composition and size in sprint athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 2017 Jul;57(9).

73. Sariman H, Azam Z, Diyana N, Sulaiman N, Mohamed MN, Shahudin NN, et al. Comparison of Body Fat Percentages and Power Among Male Boxers Based on Winner and Non-winner. In: Proceedings of the 2nd International Colloquium on Sports Science, Exercise, Engineering and Technology 2015 (ICoSSEET 2015). Singapore: Springer Singapore; 2016. p. 301–8.
74. González-Cano H, Martín-Olmedo JJ, Baz-Valle E, Contreras C, Schoenfeld BJ, García-Ramos A, et al. Do Muscle Mass and Body Fat Differ Between Elite and Amateur Natural Physique Athletes on Competition Day? A Preliminary, Cross-Sectional, Anthropometric Study. *J Strength Cond Res.* 2024 May;38(5):951–6.
75. Kim JH, Kim JS. Effect of bodybuilding athletes' weight loss method on performance factors and immune function. *J Exerc Rehabil.* 2023 Dec 26;19(6):357–62.
76. Escalante G, Stevenson SW, Barakat C, Aragon AA, Schoenfeld BJ. Peak week recommendations for bodybuilders: an evidence based approach. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2021 Dec 13;13(1):68.
77. Casajus JA. Body fat percentage comparisons between four methods in young football players: are they comparable? *Nutr Hosp.* 2017 Sep 14;
78. Kumaravel M, Bawa P, Murai N. Magnetic resonance imaging of muscle injury in elite American football players: predictors for return to play and performance: Authors. *Eur J Radiol* [Internet]. 2018; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.09.028>
79. Duren DL, Sherwood RJ, Czerwinski SA, Lee M, Choh AC, Siervogel RM, et al. Body composition methods: Comparisons and Interpretation. *J Diabetes Sci Technol.* 2008 Nov;2(6):1139–46.
80. Hill AM, LaForgia J, Coates AM, Buckley JD, Howe PRC. Estimating Abdominal Adipose Tissue with DXA and Anthropometry. *Obesity* [Internet]. 2007;15(2):504. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1038/oby.2007.629>
81. Shuster A, Patlas M, Pinthus JH, Mourtzakis M. The clinical importance of visceral adiposity: a critical review of methods for visceral adipose tissue analysis. *Br J Radiol.* 2012 Jan;85(1009):1–10.

82. Vaquero-Cristóbal R. Assessing fat mass from a body composition perspective: a critical review. Vol. 18, *Cultura, Ciencia y Deporte*. Universidad Católica San Antonio Murcia; 2023. p. 4–13.
83. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N, Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front Nutr*. 2024 Jun 11;11:1421950–66.
84. Coratella G, Campa F, Matias CN, Toselli S, Koury JC, Andreoli A, et al. Generalized bioelectric impedance-based equations underestimate body fluids in athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2021 Nov 1;31(11):2123–32.
85. Brožek J, Grande F, Anderson JT, Keys A. Densitometric Analysis of Body Composition: Revision of Some Quantitative Assumptions. *Ann N Y Acad Sci*. 1963;110(1):113–40.
86. Blüher M. Adipose tissue dysfunction in obesity. Vol. 117, *Experimental and Clinical Endocrinology and Diabetes*. 2009. p. 241–50.
87. Kerr D, Ross W. Fraccionamiento de la masa corporal: un nuevo método para utilizar en nutrición clínica y medicina deportiva. *Apuntes*. 1991;18.
88. Holway FE, Campa F, Petri C, Spina LR, Szydlowski NY. Kinanthropometry and dietary habits of non-professional rugby players. *Front Sports Act Living*. 2024 Jul 8;6.
89. Aragon AA, Schoenfeld BJ, Wildman R, Kleiner S, VanDusseldorp T, Taylor L, et al. International society of sports nutrition position stand: diets and body composition. *J Int Soc Sports Nutr*. 2017 Jan 3;14(1):16.
90. Han TS, Tjshuis MA, Lean ME, Seidell JC. Quality of life in relation to overweight and body fat distribution. *Am J Public Health*. 1998 Dec;88(12):1814–20.
91. Toth MJ, Tchernof A, Sites CK, Poehlman ET. Menopause-Related Changes in Body Fat Distribution. *Ann N Y Acad Sci*. 2000 May 25;904(1):502–6.
92. Després JP. Body Fat Distribution and Risk of Cardiovascular Disease. *Circulation*. 2012 Sep 4;126(10):1301–13.

93. Vaquero-Cristóbal R, Albaladejo-Saura M, Luna-Badachi AE, Esparza-Ros F. Differences in fat mass estimation formulas in physically active adult population and relationship with sums of skinfolds. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Nov 1;17(21):1–13.
94. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N, Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front Nutr*. 2024;11.
95. Nickerson BS, McLester CN, McLester JR, Kliszczewicz BM. Relative accuracy of anthropometric-based body fat equations in males and females with varying BMI classifications. *Clin Nutr ESPEN*. 2020 Feb;35:136–40.
96. Campa F, Toselli S, Mazzilli M, Gobbo LA, Coratella G. Assessment of body composition in athletes: A narrative review of available methods with special reference to quantitative and qualitative bioimpedance analysis. Vol. 13, *Nutrients*. MDPI AG; 2021.
97. Yuhasz M. *Physical Fitness Manual*. Ontario U of W, editor. London, Ontario; 1974.
98. Sloan AW. Estimation of body fat in young men. *J Appl Physiol*. 1967;23(3):307–9.
99. Peterson MJ, Czerwinski SA, Siervogel RM. Development and validation of skinfold-thickness prediction equations with a 4-compartment model. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2003;77(5):1186–91.
100. Hastuti J, Kagawa M, Byrne NM, Hills AP. Development and validation of anthropometric prediction equations for estimation of body fat in Indonesian men. *Asia Pac J Clin Nutr*. 2013;22(4):522–9.
101. Evans EM, Rowe DA, Misic MM, Prior BM, Arngrímsson SÁ. Skinfold prediction equation for athletes developed using a four-component model. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(11):2006–11.
102. Rubino F, Cummings DE, Eckel RH, Cohen R V, Wilding JPH, Brown WA, et al. Definition and diagnostic criteria of clinical obesity. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2025 Mar;13(3):221–62.

103. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Vaquero-Cristóbal R, Baglietto N, Esparza-Ros F. Validity and agreement between dual-energy X-ray absorptiometry, anthropometry and bioelectrical impedance in the estimation of fat mass in young adults. *Front Nutr*. 2024 Jun 11;11.
104. Prieto S, Pasquali M, Festa R, Mazza J. Comparison Between Anthropometric Prediction Of Fat Mass, Using Different Equations And Models. Vol. 54, *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2022. 366 p.
105. Karastergiou K, Smith SR, Greenberg AS, Fried SK. Sex differences in human adipose tissues – The biology of pear shape. *Biol Sex Differ*. 2012 Dec 31;3(1):13.
106. Lumish HS, O'Reilly M, Reilly MP. Sex Differences in Genomic Drivers of Adipose Distribution and Related Cardiometabolic Disorders. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2020 Jan;40(1):45–60.
107. Demirkan E, Kutlu M, Koz M, Özal M, Güçlüöver A, Favre M. Effects of Hydration Changes on Body Composition of Wrestlers. *International Journal of Sport Studies*. 2014;4(March 2016).
108. Laja García A, Moráis-Moreno C, Samaniego-Vaesken M, Puga A, Varela-Moreiras G, Partearroyo T. Association between Hydration Status and Body Composition in Healthy Adolescents from Spain. *Nutrients*. 2019 Nov 7;11(11):2692.
109. Kerr A, Slater GJ, Byrne N. Impact of food and fluid intake on technical and biological measurement error in body composition assessment methods in athletes. *British Journal of Nutrition*. 2017;591–601.
110. Alvero Cruz, Correas Gónes, Ronconi M, Fernandez Vazquez. La bioimpedancia electrica como metodo de estimacion de la composicion corporal. *Rev Andal Med Deport*. 2011;4(1):17–28.
111. Tinsley GM, Harty PS, Stratton MT, Smith RW, Rodriguez C, Siedler MR. Tracking changes in body composition: comparison of methods and influence of pre-assessment standardisation. *British Journal of Nutrition*. 2022 Jun 14;127(11):1656–74.
112. Esparza-Ros F, Vaquero-Cristobal R, Marfell-Jones M. *International Standards for Anthropometric Assesment*. UCAM Universidad Católica de

- Murcia, editor. Murcia: International Society for the Advancement of Kinanthropometry; 2019.
113. Mecherques-Carini M, Albaladejo-Saura M, Esparza-Ros F, Baglietto N, Vaquero-Cristóbal R. Validity between dual-energy x-ray absorptiometry and bioelectrical impedance for segmental fat analysis and a novel low-cost model developed using anthropometry in young adults. *J Transl Med.* 2025 Jan 10;23(1):40.
 114. Ling CHY, de Craen AJM, Slagboom PE, Gunn DA, Stokkel MPM, Westendorp RGJ, et al. Accuracy of direct segmental multi-frequency bioimpedance analysis in the assessment of total body and segmental body composition in middle-aged adult population. *Clinical Nutrition.* 2011 Oct;30(5):610–5.

XII – ANEXOS

XII - ANEXOS

ANEXO 1. APROBACIÓN DEL COMITÉ DE ÉTICA



COMITÉ DE ÉTICA DE LA UCAM

DATOS DEL PROYECTO

Título:	"Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría"	
Investigador Principal	Nombre	Correo-e
Dr.	Francisco Esparza Ros	fesparza@ucam.edu

INFORME DEL COMITÉ

Fecha	25/06/2021	Código	CE062103
--------------	------------	---------------	----------

Tipo de Experimentación

Investigación experimental clínica con seres humanos	
Investigación experimental no clínica con seres humanos	X
Utilización de tejidos humanos procedentes de pacientes, personas sanas, tejidos embrionarios o fetales	
Utilización de tejidos humanos, tejidos embrionarios o fetales procedentes de bancos de muestras o tejidos	
Investigación observacional, psicológica o comportamental en humanos	
Uso de datos personales, información genética, etc.	X
Experimentación animal	
Utilización de agentes biológicos de riesgo para la salud humana, animal o las plantas	
Uso de organismos modificados genéticamente (OMGs)	

Comentarios Respecto al Tipo de Experimentación

Nada Obsta

Comentarios Respecto a la Metodología de Experimentación

Nada Obsta





COMITÉ DE ÉTICA DE LA UCAM

Sugerencias al Investigador

A la vista de la solicitud de informe adjunto por el Investigador y de las recomendaciones anteriormente expuestas el dictamen del Comité es:

Emitir Informe Favorable	X
Emitir Informe Desfavorable	
Emitir Informe Favorable condicionado a Subsanación	

MOTIVACIÓN

Incrementará conocimientos en su área

Vº Bº El Presidente,

Fdo.: José Alberto Cánovas Sánchez

El Secretario,

Fdo.: José Alarcón Teruel

ANEXO 2. CONSENTIMIENTO INFORMADO ADULTOS

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo,, con DNI:.....
 DECLARO:

Haber sido informado/a del estudio y procedimientos de la investigación del Proyecto titulado: "Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría".

Los investigadores que van a acceder a nuestros datos personales y a los resultados de las pruebas son: Dr. D. Francisco Esparza Ros, Dra. D^a. Raquel Vaquero Cristóbal y MSc Malek Mecherques Carini.

Asimismo, he podido hacer preguntas del estudio, comprendiendo que me presto de forma voluntaria al mismo y que en cualquier momento puedo abandonarlo sin que me suponga perjuicio de ningún tipo.

CONSIENTO:

1.-) Someterme a las siguientes pruebas exploratorias: Estudio cineantropométrico.

2.-) El uso de los datos obtenidos según lo indicado en el párrafo siguiente:

En cumplimiento del Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016 y Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y Garantía de los Derechos Digitales, le comunicamos que la información que ha facilitado y la obtenida como consecuencia de las exploraciones a las que se va a someter pasará a formar parte del fichero automatizado INVESALUD, cuyo titular es la FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN ANTONIO, con la finalidad de INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA EN LAS ÁREAS DE CONOCIMIENTO CIENCIAS EXPERIMENTALES Y CIENCIAS DE LA SALUD. Tiene derecho a acceder a esta información y cancelada o rectificadas, dirigiéndose al domicilio de la entidad, en Avda. de los Jerónimos de Guadalupe 30107 (Murcia). Esta entidad le garantiza la adopción de las medidas oportunas para asegurar el tratamiento confidencial de dichos datos.

En Guadalupe (Murcia) a de de 2021

El investigador,

Fdo:.....

Fdo:

ANEXO 3. REVOCACIÓN CONSENTIMIENTO INFORMADO ADULTOS**REVOCACIÓN DEL CONSENTIMIENTO INFORMADO**

Yo,, con DNI:.....

REVOCO MI CONSENTIMIENTO PARA PARTICIPAR EN EL PROYECTO

Proyecto titulado: **"Estimación de la adiposidad corporal mediante antropometría"**.

En Guadalupe (Murcia) a de de 2021

El / La participante,

El investigador,

Fdo:.....

Fdo:.....

ANEXO 4. HOJA INFORMATIVA


**DOCUMENTO DE INFORMACIÓN PARA SUJETOS SOMETIDOS A ESTUDIO
(HOJA INFORMATIVA)**


- 1. EN QUÉ CONSISTE:**
Con la realización del presente estudio se pretende conocer los valores de adiposidad. Para ello se tomarán variables antropométricas no invasivas.
- 2. CÓMO SE REALIZA:**
En primer lugar, se realizará un protocolo de marcación para determinar los sitios de toma de medida. Luego, se llevará a cabo la valoración cineantropométrica, incluyendo la medición de peso, talla, pliegues cutáneos y perímetros de cintura y cadera.
- 3. EN QUÉ LE BENEFICIARÁ:**
Participando en este estudio podrá conocer sus valores de grasa corporal y su distribución en el cuerpo. Esto resulta de gran relevancia para conocer si se encuentra en un rango de adiposidad saludable. Teniendo en cuenta la asociación de valores excesivos tanto a diversas patologías como a sus comorbilidades, este estudio permite detectar la necesidad de realizar cambios en la nutrición, entrenamiento, etc. para disminuirlo.
- 4. QUÉ RIESGOS TIENE:**
Esta investigación no comporta ningún riesgo para los sujetos que decidan participar.
- 5. OTRAS INFORMACIONES DE INTERÉS:**
Para la valoración antropométrica los hombres deberán acudir con pantalón corto deportivo, las mujeres con top deportivo y mallas de juego cortas. Es importante que antes de la medición antropométrica no hayan utilizado ningún tipo de crema o aceite corporal.
Al finalizar el estudio, se otorgará el informe antropométrico correspondiente.
Cualquier duda o pregunta que pueda surgir pueden ponerse en contacto con el equipo de investigación a través del correo mecherquesm@gmail.com.

ANEXO 5. CUESTIONARIO DE DATOS PERSONALES DE LOS VOLUNTARIOS

Cuestionario Estudio UCAM

La cumplimentación de este cuestionario implica que he sido informado/a del estudio y procedimientos de la investigación del Proyecto titulado: "**ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL CON MÉTODOS: UN ANÁLISIS COMPARATIVO**" y de los procedimientos de la investigación. La cumplimentación del presente cuestionario será considerado el consentimiento informado para participar en la presente investigación. Los datos recogidos serán tratados en cumplimiento con el Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, el Real Decreto-Ley 5/2018, de 27 de julio y Ley Orgánica 15/1999, de 13 de Diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal. Si tiene alguna duda a este respecto consúltela con el asistente de investigación que hay en la sala antes de continuar con el cuestionario.

mecherquesm@gmail.com [Cambiar cuenta](#) 

 No compartido

*** Indica que la pregunta es obligatoria**

Nombre y apellido completo *

Tu respuesta

DNI, NIE o PASAPORTE *

Tu respuesta

ID (Número identificador) *

Tu respuesta

[Siguiente](#) [Borrar formulario](#)

ANEXO 6. CUESTIONARIO DE ALIMENTACIÓN

Cuestionario de alimentación 24hs.

El objetivo de esta sección es conocer tu consumo de alimentos y bebidas en las últimas 24 horas.

Anota con la mayor precisión posible todos los alimentos y bebidas (incluido el agua) consumidos durante el día de ayer. Puedes empezar con la primer ingesta del día y continuar hacia delante en el tiempo hasta completar el día entero. Anota también los alimentos y bebidas consumidos entre horas. Debes completar un cuadro por cada hora la que comiste o ingeriste algo. Cuando hayas terminado el día, deja en blanco los cuadros restantes.

Describe lo más detalladamente posible el alimento/bebida que consumió (nombre del alimento/bebida, tipo y marca; ejemplo: leche de vaca, desnatada, marca Hacendado). Estima la cantidad consumida en medidas caseras o en raciones (grande, mediana, pequeña, ejemplo: 1 taza de leche grande; 1 plato hondo hasta arriba; 2 cazos). Indique si la cantidad se refiere al alimento crudo o cocinado; al alimento entero (tal como se compra en el mercado) o a la parte comestible (ej. naranja pelada). Registra el método de preparación empleado (cocido, frito, asado, etc.).

No olvides anotar el aceite empleado en las preparaciones (cantidad y tipo, ejemplo: una cucharada grande de aceite de oliva extra virgen), el pan, el azúcar o las bebidas consumidas (agua, refrescos, leche, cafés, bebidas alcohólicas, etc.).

Ejemplo completo:

Comida/Bebida 1:

- Hora: 07:00 am.

- Lugar de la ingesta: Cocina de mi casa.

- Comida o bebida ingerida: Tostadas de jamón ibérico, tomate y queso; y un vaso de leche fría con azúcar.

- Marcas de los productos: Pan de molde tostado (Bimbo), jamón ibérico (Hacendado), fetas de queso light (Hacendado), tomate (mercado), leche desnatada (Hacendado), azúcar (hacendado).

- Descripción del método de preparación: Todo sin cocinar.

- Cantidad consumida. 2 rebanadas medianas de pan, 2 lonchas de jamón ibérico, 1 feta mediana de queso light, medio tomate grande, 1 taza grande de leche desnatada, 1 cucharada pequeña de azúcar.

Comida/Bebida 2:

- Hora: 10:00 am.

- Lugar de la ingesta: Universidad.

- Comida o bebida ingerida: Agua.

- Marcas de los productos: Lanjarón.

- Descripción del método de preparación: No procede.

- Cantidad consumida. 2 vasos de agua (medio litro).

Comida/Bebida 1 *

Detallar:

- Hora.
- Lugar de la ingesta.
- Comida o bebida ingerida.
- Marcas de los productos.
- Descripción del método de preparación.
- Cantidad consumida.

Tu respuesta

Comida 2

Detallar:

- Hora.
- Lugar de la ingesta.
- Comida o bebida ingerida.
- Marcas de los productos.
- Descripción del método de preparación.
- Cantidad consumida.

Tu respuesta

ANEXO 7. CUESTIONARIO DE CONSUMO DE SUPLEMENTOS**Consumo de suplementos deportivos.**

El siguiente cuestionario trata sobre su consumo de suplementos deportivos.

Indique el nombre del suplemento consumido (ejemplo: Creatina), marca del suplemento (ejemplo: Proxis), formato consumido (en polvo, comprimidos, etc.). Mencione la frecuencia de su consumo (diaria, semanal, mensual), dosis (1 gramos, 10.000 UI, 1 comprimido), momento de su consumo (en ayunas previo a desayunar, antes del entrenamiento, etc.), tiempo desde que consume el suplemento (hace 1 año, 1 mes, etc.) y razón por la que consume el suplemento (aumento de masa muscular, descenso de grasa, etc.).

Estos son algunos de los productos considerados suplementos deportivos:

- Multivitamínicos y minerales: Vitamina C, D, B12, complejos multivitamínicos.
- Creatina.
- Cafeína: Mencionar sólo su consumo en comprimidos o formato diferente a la bebida.
- Proteína en polvo.
- Pre entrenos.
- Bebidas deportivas: Gatorade, Powerade.
- Barras energéticas.
- Diuréticos.
- Beta alanina.
- Glicerol.

* Si considera que consume un producto que no se encuentra dentro de los mencionados inclúyalo describiendo los aspectos solicitados.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo tiene que completar esta sección:

- Nombre del suplemento: Creatina.
- Marca: Proxis.
- Formato consumido: En polvo.
- Frecuencia de consumo: Diario.
- Dosis: 5 gr/día.
- Momento de consumo: Pre entreno.
- Tiempo desde que hace que lo consume: hace 4 meses.
- Razón de su consumo: Aumentar masa muscular.

Rellene un cuadro por cada suplemento. Deje en blanco los cuadros que no necesite.

1- ¿Consume algún suplemento deportivo? *

Si la respuesta es "No", pase a la sección 4.

Sí.

No.

Suplemento 1.

Describir:

-Nombre del suplemento.

-Marca.

-Formato consumido.

-Frecuencia de consumo.

-Dosis.

-Momento de consumo.

-Tiempo desde que hace que lo consume.

- Razón de su consumo.

Tu respuesta

ANEXO 8. CUESTIONARIO INTERNACIONAL DE ACTIVIDAD FÍSICA (IPAQ)

CUESTIONARIO INTERNACIONAL DE ACTIVIDAD FISICA

Estamos interesados en averiguar acerca de los tipos de actividad física que hace la gente en su vida cotidiana. Las preguntas se referirán al tiempo que usted destinó a estar físicamente activo en los últimos 7 días. Por favor responda a cada pregunta aún si no se considera una persona activa. Por favor, piense acerca de las actividades que realiza en su trabajo, como parte de sus tareas en el hogar o en el jardín, moviéndose de un lugar a otro, o en su tiempo libre para la recreación, el ejercicio o el deporte.

Piense en todas las actividades **intensas** que usted realizó en los **últimos 7 días**. Las actividades físicas **intensas** se refieren a aquellas que implican un esfuerzo físico intenso y que lo hacen respirar mucho más intensamente que lo normal. Piense *solo* en aquellas actividades físicas que realizó durante por lo menos **10 minutos** seguidos.

1. Durante los **últimos 7 días**, ¿en cuántos realizó actividades físicas **intensas** tales como levantar pesos pesados, cavar, hacer ejercicios aeróbicos o andar rápido en bicicleta?

_____ días por semana

Ninguna actividad física intensa → *Vaya a la pregunta 3*

2. Habitualmente, ¿cuánto tiempo en total dedicó a una actividad física intensa en uno de esos días?

_____ horas por día

_____ minutos por día

No sabe/No está seguro

Piense en todas las actividades **moderadas** que usted realizó en los **últimos 7 días**. Las actividades **moderadas** son aquellas que requieren un esfuerzo físico moderado que lo hace respirar algo más intensamente que lo normal. Piense *solo* en aquellas actividades físicas que realizó durante por lo menos **10 minutos** seguidos.

3. Durante los **últimos 7 días**, ¿en cuántos días hizo actividades físicas **moderadas** como transportar pesos livianos, andar en bicicleta a velocidad regular o jugar dobles de tenis? **No** incluya caminar.

_____ días por semana

Ninguna actividad física moderada → *Vaya a la pregunta 5*

4. Habitualmente, ¿cuánto tiempo en total dedicó a una actividad física moderada en uno de esos días?

_____ horas por día

_____ minutos por día

No sabe/No está seguro

Piense en el tiempo que usted dedicó a **caminar** en los **últimos 7 días**. Esto incluye caminar en el trabajo o en la casa, para trasladarse de un lugar a otro, o cualquier otra caminata que usted podría hacer solamente para la recreación, el deporte, el ejercicio o el ocio.

5. Durante los últimos 7 días, ¿En cuántos caminó por lo menos 10 minutos seguidos?

_____ días por semana

Ninguna caminata  *Vaya a la pregunta 7*

6. Habitualmente, ¿cuánto tiempo en total dedicó a caminar en uno de esos días?

_____ horas por día

_____ minutos por día

No sabe/No está seguro

La última pregunta es acerca del tiempo que pasó usted **sentado** durante los días hábiles de los **últimos 7 días**. Esto incluye el tiempo dedicado al trabajo, en la casa, en una clase, y durante el tiempo libre. Puede incluir el tiempo que pasó sentado ante un escritorio, visitando amigos, leyendo, viajando en ómnibus, o sentado o recostado mirando la televisión.

7. Durante los últimos 7 días ¿cuánto tiempo pasó **sentado** durante un día hábil?

_____ horas por día

_____ minutos por día

No sabe/No está seguro

ANEXO 9. CUESTIONARIO DE EJERCICIO FÍSICO 48HS. PREVIAS**Cuestionario de ejercicio físico de las 48 horas previas.**

Con las siguientes preguntas buscamos conocer cuales han sido tus niveles de actividad física en los últimos 2 días. Tanto tipo, como volumen e intensidad de la actividad realizada.

1- ¿Entrenaste **antes de ayer**? *

Si la respuesta es "NO", pasar a la pregunta 5.

Sí

No

2- Si tu respuesta fue "Sí"
¿Qué actividad realizaste?

Tu respuesta _____

3- Según la escala de abajo, ¿Cuán intensa fue la actividad?

ZONA	RPE	PERCEPCIÓN	% FCM
5	10	Ritmo máximo Carga máxima Sudoración alta Respiración muy exigente	90-100%
4	8-9	Ritmo muy alto Carga alta Sudoración alta Respiración muy exigente	80-90%
3	6-7	Ritmo alto Carga media Sudoración alta Respiración exigente	70-80%
2	4-5	Ritmo medio Carga menos ligera Empieza la sudoración Respiración activa	60-70%
1	1-2-3	Ritmo bajo Carga ligera Poca sudoración Respiración controlada	50-60%

4- ¿Cuánto tiempo entrenaste? (en minutos).

Tu respuesta _____

5- ¿Entrenaste **ayer**? *

Si la respuesta es "No", puedes dar por finalizado el cuestionario y enviarlo.

Sí.

No.

6- Si tu respuesta fue "Sí"
¿Qué actividad realizaste?

Tu respuesta _____

7- Según la escala de abajo, ¿Cuán intensa fue la actividad?

ZONA	RPE	PERCEPCIÓN	% FCM
5	10	Ritmo máximo Carga máxima Sudoración alta Respiración muy exigente	90-100%
4	8-9	Ritmo muy alto Carga alta Sudoración alta Respiración muy exigente	80-90%
3	6-7	Ritmo alto Carga media Sudoración alta Respiración exigente	70-80%
2	4-5	Ritmo medio Carga menos ligera Empieza la sudoración Respiración activa	60-70%
1	1-2-3	Ritmo bajo Carga ligera Poca sudoración Respiración controlada	50-60%

8- ¿Cuánto tiempo entrenaste? (En minutos).

Tu respuesta

[Atrás](#)

[Enviar](#)

[Borrar formulario](#)

ANEXO 10. INFORME EJEMPLO DE DXA

Nombre: [REDACTED] ID del paciente: 106 DOB: August 18, 2004	Sexo: Hombre Raza: Blanca	Height: 178.7 cm Peso: 69.1 kg Edad: 18
--------------------------------------------------------------------	------------------------------	-----------------------------------------------

Médico remitente:

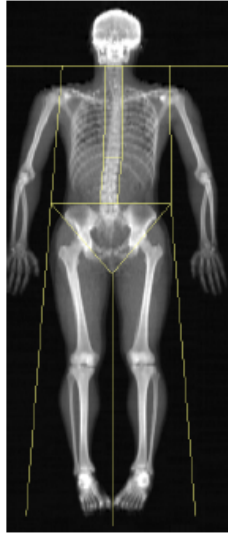
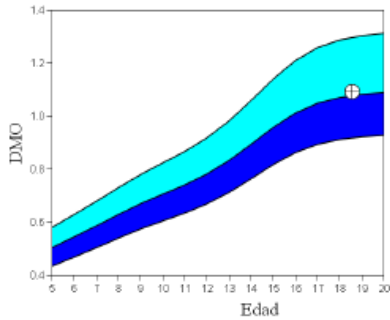


Imagen no válida para uso diagnóstico
k = 1.188, d0 = 50.8
318 x 150
DAP: 20.5 cGy*cm²

Subtotal



Información de la exploración:

Scan Date: March 09, 2023 ID: A03092306
 Tipo exploración: a Cuerpo entero
 Analysis: March 09, 2023 09:47 Version 13.6.0.5:5
 Auto Whole Body
 Operador:
 Modelo: Horizon Wi (S/N 302464M)
 Comentario:

Resumen de resultados DEXA:

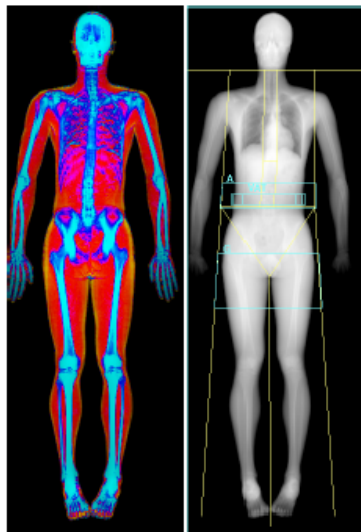
Región	Área (cm²)	CMO (g)	DMO (g/cm²)	T - score	RM (%)	Z - score	EC (%)
Brazo I	213.93	166.11	0.776				
Brazo D	220.92	181.09	0.820				
Cost. I	128.51	94.58	0.736				
Cost. D	137.44	98.24	0.715				
Colum. D	135.11	119.76	0.886				
Colum. L	72.22	93.54	1.295				
Pelvis	243.44	325.29	1.336				
Pierna I	440.29	563.25	1.279				
Pierna D	442.23	578.75	1.309				
Subtotal	2034.10	2220.62	1.092			0.2	102
Cabeza	243.83	538.63	2.209				
Total	2277.92	2759.25	1.211			0.4	103

CV de DMO Total 1.0%, ACF = 1.030, BCF = 1.010

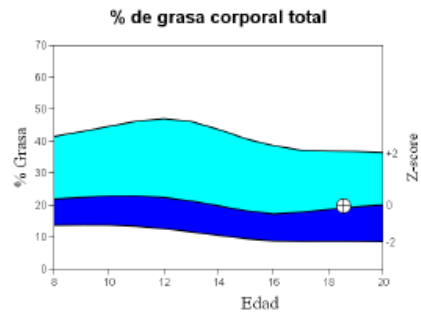
Comentario:

-score vs. White Male. Source:2012 BMDCS Z-score vs. White Male. Source:2012 MDCS

Nombre: ██████████	Sexo: Hombre	Height: 178.7 cm
ID del paciente: 106	Raza: Blanca	Peso: 69.1 kg
DOB: August 18, 2004		Edad: 18



Imágenes no válidas para uso diagnóstico
Grasa Inclinación Hueso



Origen: NHANES Classic White Male.

Resultados de composición corporal

Región	Grasa	Inclinación + CMO (g)	Total Masa (g)	Total % de grasa	Percentil de % de grasa YN	EC
Brazo I	688	3313	4001	17.2		55
Brazo D	677	3445	4122	16.4		49
Tronco	4809	23454	28263	17.0		47
Pierna I	3094	10237	13330	23.2		59
Pierna D	3230	10652	13882	23.3		59
Subtotal	12497	51101	63598	19.6		54
Cabeza	970	3613	4583	21.2		
Total	13467	54715	68181	19.8		54
Androide (A)	792	3425	4217	18.8		
Ginoide (G)	2784	8420	11203	24.8		

Índices adiposos

Medida	Resultado	Percentil YN	EC
% de grasa corporal total	19.8		54
Masa grasa/altura ² (kg/m ²)	4.22		43
Proporción androide/ginoide	0.76		
% gras. en tron./% gras. en pier.	0.73		31
Prop. de masa grasa de tron./estr.	0.63		9
Est. VAT Mass (g)	302		
Est. VAT Volume (cm ³)	327		
Est. VAT Area (cm ²)	62.7		

Lean Indices

Medida	Resultado	Percentil YN	EC
Lean/Height ² (kg/m ²)	16.3		9
Appen. Lean/Height ² (kg/m ²)	8.19		31

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue
YN = Jóvenes normales
AM = Edad coincidente

Nombre: [REDACTED]	Sexo: Hombre	Height: 178.7 cm
ID del paciente: 106	Raza: Blanca	Peso: 69.1 kg
DOB: August 18, 2004		Edad: 18

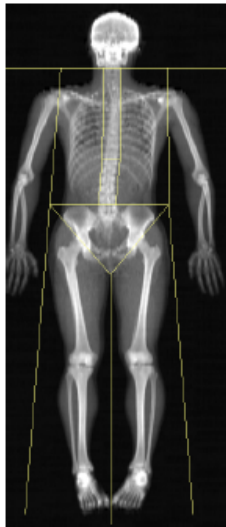


Imagen no válida para uso diagnóstico
 k = 1.188, d0 = 50.8
 318 x 150
 DAP: 20.5 cGy*cm²

Información de la exploración:

Scan Date: March 09, 2023 ID: A03092306
 Tipo exploración: a Cuerpo entero
 Analysis: March 09, 2023 09:47 Version 13.6.0.5
 Auto Whole Body
 Operador:
 Modelo: Horizon Wi (S/N 302464M)
 Comentario:

Resumen de resultados DEXA:

Región	Grasa Masa (g)	Inclinación + CMO (g)	% de grasa
Brazo I	688.0	3313.5	17.2
Brazo D	676.6	3445.2	16.4
Tronco	4808.6	23453.9	17.0
Pierna I	3093.6	10236.8	23.2
Pierna D	3230.2	10651.8	23.3
Subtotal	12497.0	51101.2	19.6
Cabeza	969.7	3613.5	21.2
Total	13466.7	54714.6	19.8

TBAR1209

Nombre: ██████████	Sexo: Hombre	Height: 178.7 cm
ID del paciente: 106	Raza: Blanca	Peso: 69.1 kg
DOB: August 18, 2004		Edad: 18

Información de la exploración:

Scan Date: March 09, 2023 ID: A03092306

Tipo exploración: a Cuerpo entero

Analysis: March 09, 2023 09:47 Version 13.6.0.5

Auto Whole Body

Operador:

Modelo: Horizon Wi (S/N 302464M)

Comentario:

Resumen de resultados DEXA:

Región	CMO (g)	Grasa Masa (g)	Inclinación Masa (g)	Inclinación + CMO (g)	Total Masa (g)	% de grasa
Brazo I	166.11	688.0	3147.4	3313.5	4001.5	17.2
Brazo D	181.09	676.6	3264.1	3445.2	4121.8	16.4
Tronco	731.42	4808.6	22722.5	23453.9	28262.6	17.0
Pierna I	563.25	3093.6	9673.5	10236.8	13330.4	23.2
Pierna D	578.75	3230.2	10073.0	10651.8	13882.0	23.3
Subtotal	2220.62	12497.0	48880.6	51101.2	63598.2	19.6
Cabeza	538.63	969.7	3074.8	3613.5	4583.2	21.2
Total	2759.25	13466.7	51955.4	54714.6	68181.4	19.8

TBAR1209

ANEXO 11. INFORME EJEMPLO DE BIA GENERAL

Composición Corporal
 TANITA MC 780-MA
 FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM) Lunes, 6 Marzo 2023

Estudio de la Composición Corporal

Del día 06/03/2023

Compartimentos Corporales



Estado Fisiológico

Obesidad

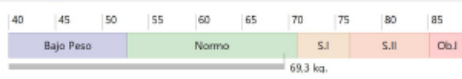


Interpretación de los datos obtenidos

Peso según el IMC

(Criterio SEEDO 2000)

Estado: Normo Peso



El IMC resultante es de **24,4** y su Metabolismo Basal diario es de **1.646** kCal. Según el **Criterio SEEDO 2000** se considera **Normo Peso**.

Masa Grasa

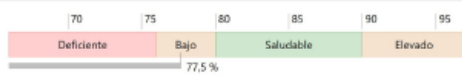
Estado: Alto



15,6 Kg. de Masa Grasa supone un **22,5%** de su peso. Esto le sitúa en un estado **Alto**. El rango saludable está **entre el 10 y el 20%**.

Masa Libre de Grasa

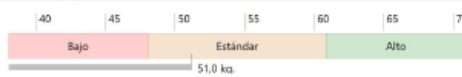
Estado: Bajo



53,7 Kg. de Masa Libre de Grasa supone un **77,5%** de su peso. Su estado es **Bajo**. El rango saludable está **entre el 80 y el 90%**.

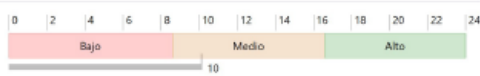
Masa Magra

Estado: Estándar



Índice de Masa Muscular

Estado: Medio



La Masa Muscular es de **51 Kg.** que equivale a un Índice Muscular de **10**.

Calidad Muscular

Estado: Estándar



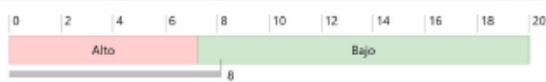
Composición Corporal

TANITA MC 780-MA
FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM)

Lunes, 6 Marzo 2023

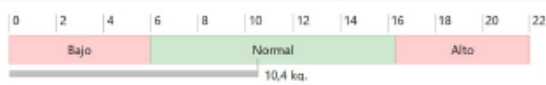
Índice de Riesgo de Sarcopenia

Estado: Riesgo Bajo



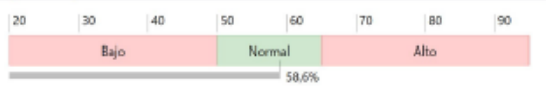
Proteínas

Estado: Normal



Agua Corporal Total

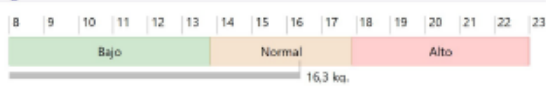
Estado: Normal



El **58,6%** equivale a 40,6 Kg. Se encuentra **dentro** del rango de referencia en los hombres que es entre 50 y 65% del peso.

Agua Extra Celular

Estado: Normal



El agua extra-celular es de 16,3 kg., un **40,1%** del ACT. Este valor se considera **Normal**.

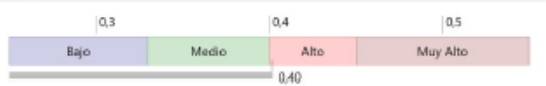
Agua Intra Celular

Estado: Normal



AEC/ACT

Estado: Medio



La relación entre el ACT y la AEC puede ser un indicativo de la calidad de la Masa Libre de Grasa.

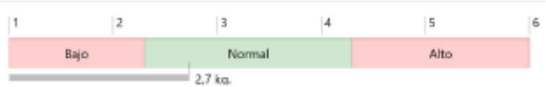
Índice ECMe/BCMe

Estado: Saludable



Mineral Óseo

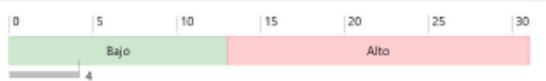
Estado: Normal



La masa ósea es de **2,7 Kg.**, encontrándose el mismo **dentro** del rango estimado.

Índice de Grasa Visceral

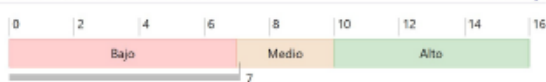
Estado: Bajo



El índice de Grasa Visceral es **4** lo que lo sitúa en un estado de **Bajo**.

Índice de Tasa Metabólica

Estado: Bajo



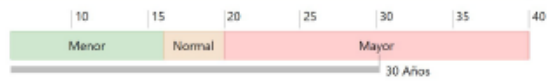
De su Índice de Tasa Metabólica de **7** se determina que su edad metabólica equivale a una persona de **30** años.

Composición Corporal

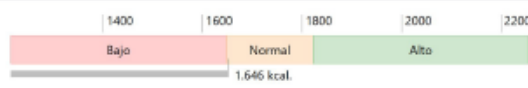
TANITA MC 780-MA
FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM)

██████████
Lunes, 6 Marzo 2023

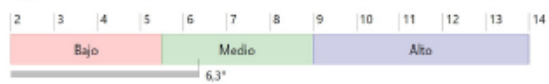
Edad Metabólica Edad Real = 18 Años Estado: Mayor



Metabolismo Basal Estado: Bajo



Angulo de Fase Estado: Medio



ANEXO 12. INFORME EJEMPLO DE BIA SEGMENTAL

Composición Corporal Segmental
 TANITA MC 780-MA
 FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM) Lunes, 6 Marzo 2023

Composición Corporal Segmental Del día 06/03/2023



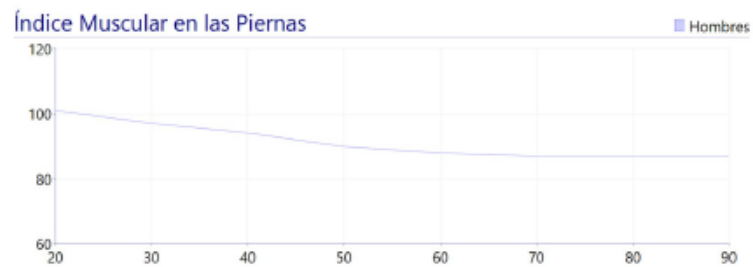
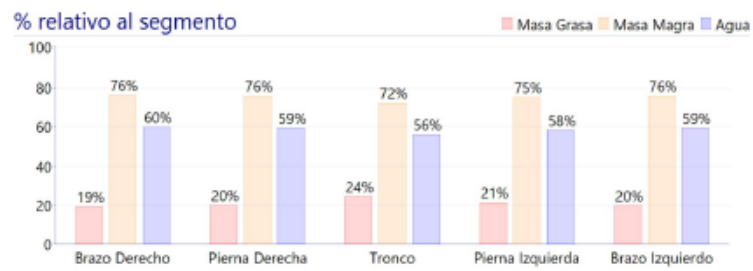
% respecto al compartimento



Composición Corporal Segmental

TANITA MC 780-MA
FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM)

Lunes, 6 Marzo 2023



ANEXO 13. INFORME EJEMPLO DE BIA DATOS BRUTOS

Tabla de Datos	
TANITA MC 780-MA	
FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM)	
	Lunes, 6 Marzo 2023

Tabla de Datos 06/03/2023

Altura	168,40 cm.
Peso	69,3 kg.
IMC	24,4
Metabolismo Basal	1.646 kcal.

Composición Corporal

Tipo Cuerpo	Normal
Masa Grasa	15,6 kg.
% Masa Grasa	22,5 %
Masa Libre de Grasa	53,7 kg.
% Masa Libre de Grasa	77,5 %
Masa Magra	51,0 kg.
% Masa Magra	73,6 %
Masa Celular e.	34,7 kg.
Masa ExtraCelular e.	19,0 kg.
Masa Muscular Esquelética	30,4 kg.
Índice ECMe/BCMe	0,5
Índice de Masa Muscular	10
Calidad Muscular	63
Mineral Óseo	2,7 kg.
Proteínas	10,4 kg.
Grado de Obesidad	11,10%
Agua Corporal Total	40,6 kg.
% ACT	58,6 %
Agua IntraCelular	24,3 kg.
Agua ExtraCelular	16,3 kg.
Índice de Grasa Visceral	4
Índice Muscular Piernas	85
Índice de Tasa Metabólica	7
Edad Metabólica	30 años
Masa Muscular Esq. apend.	22,8 kg.
% M. Muscular Esq. apend.	32,9 %
Ratio MMEa/MLG	42,5 %
ÍMM/m ²	18,0
Índice MM/k	0,7
ÍMMsK/m ²	8,0
Índice MMsK/k	0,3

Composición Corporal Segmental

%MG Tronco	24,3 %
MG Tronco	9,5 kg.
MLG Tronco	29,6 kg.
MME Tronco	28,2 kg.
%MG Pierna Derecha	19,9 %
MG Pierna Derecha	2,2 kg.
MLG Pierna Derecha	8,9 kg.
MME Pierna Derecha	8,4 kg.
%MG Pierna Izquierda	21,3 %
MG Pierna Izquierda	2,3 kg.
MLG Pierna Izquierda	8,5 kg.
MME Pierna Izquierda	8,1 kg.
%MG Brazo Derecho	18,7 %
MG Brazo Derecho	0,8 kg.
MLG Brazo Derecho	3,4 kg.
MME Brazo Derecho	3,2 kg.

Tabla de DatosTANITA MC 780-MA
FUNDACION UNIVERSITARIA (UCAM)[REDACTED]
Lunes, 6 Marzo 2023**Tabla de Datos** 06/03/2023

%MG Brazo Izquierdo	19,5 %
MG Brazo Izquierdo	0,8 kg.
MLG Brazo Izquierdo	3,3 kg.
MME Brazo Izquierdo	3,1 kg.