

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE ORGANIZACIÓN DEPORTIVA
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TESIS

USO DE TECNOLOGÍAS PARA EVALUAR EL SALTO VERTICAL: ANÁLISIS DE
VALIDACIÓN Y FIABILIDAD

PRESENTA

MAFYD. PABLO TADEO RÍOS GALLARDO

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS DE LA CULTURA FÍSICA

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE ORGANIZACIÓN DEPORTIVA
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TESIS

USO DE TECNOLOGÍAS PARA EVALUAR EL SALTO VERTICAL: ANÁLISIS DE
VALIDACIÓN Y FIABILIDAD

PRESENTA

MAFYD. PABLO TADEO RÍOS GALLARDO

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS DE LA CULTURA FÍSICA

DIRECTORES DE TESIS

DR. LUIS ENRIQUE CARRANZA GARCÍA

DR. SAMUEL MONTALVO HERNÁNDEZ

DR. MIGUEL A. NARVÁEZ SILVA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE, 2025



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FOD

FACULTAD DE ORGANIZACIÓN DEPORTIVA

Dr. Oswaldo Ceballos Gurrola
Coordinador del Programa de
Doctorado en Ciencias de la Cultura Física
P r e s e n t e.-

Por medio de este conducto, hago de su conocimiento que el estudiante **Pablo Tadeo Ríos Gallardo** con matrícula **1937122** ha trabajado en su documento extenso de investigación el cual se titula **“USO DE TECNOLOGÍAS PARA EVALUAR EL SALTO VERTICAL: ANÁLISIS DE VALIDACIÓN Y FIABILIDAD”**

Dicho documento presenta el avance señalado en la guía de tesis doctoral para el semestre en curso, por tal motivo doy el Visto Bueno para su envío.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Dr. Luis Enrique Carranza García

Director de
Tesis

Diciembre, 2025



Dr. Samuel Montalvo Hernández, como co-director de tesis de *Stanford University* acredita que el trabajo de tesis doctoral del alumno: Pablo Tadeo Ríos Gallardo, titulado **“Uso de Tecnologías para Evaluar el Salto Vertical: Análisis de Validación y Fiabilidad”** se ha revisado y concluido satisfactoriamente, bajo los estatutos y lineamientos marcados en la guía de la escritura de tesis de doctorado, propuesta por el comité doctoral de nuestra facultad, recomendando dicha tesis para su defensa con opción al grado de **Doctor en Ciencias de la Cultura Física**.

Dr. Samuel Montalvo Hernández
Co-director de tesis

Dr. Jorge Isabel Zamarripa Rivera
Subdirector de Área de Posgrado e Investigación

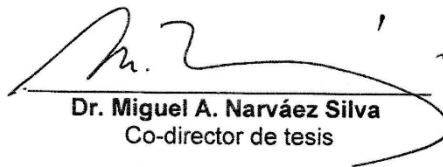


UANL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FOD
FACULTAD DE ORGANIZACIÓN DEPORTIVA

Dr Miguel A. Narváez Silva, como co-director de tesis de la *Colorado State University Pueblo* acredita que el trabajo de tesis doctoral del alumno: Pablo Tadeo Ríos Gallardo, titulado **“Uso de Tecnologías para Evaluar el Salto Vertical: Análisis de Validación y Fiabilidad”** se ha revisado y concluido satisfactoriamente, bajo los estatutos y lineamientos marcados en la guía de la escritura de tesis de doctorado, propuesta por el comité doctoral de nuestra facultad, recomendando dicha tesis para su defensa con opción al grado de **Doctor en Ciencias de la Cultura Física**.



Dr. Miguel A. Narváez Silva
Co-director de tesis



Dr. Jorge Isabel Zamarripa Rivera
Subdirector de Área de Posgrado e Investigación

Subdirector de Área de Posgrado e Investigación


PS-3.6.4 0-01/2025

VoBo. DE TESIS

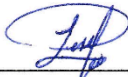
DR. JORGE ISABEL ZAMARRIPA RIVERA
SUBDIRECTOR DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
Presente.-

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que el (la) **C. PABLO TADEO RIOS GALLARDO** con no. de matrícula **1937122** ha concluido su trabajo de tesis titulado **"USO DE TECNOLOGÍAS PARA EVALUAR EL SALTO VERTICAL: ANÁLISIS DE VALIDACIÓN Y FIABILIDAD"** exitosamente, por lo que autorizamos inicie los trámites de titulación. En la siguiente página encontrará el listado con firmas de los miembros del jurado para el examen.

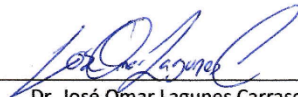
Atentamente
COMITÉ TUTORIAL



Dr. José Leandro Tristán Rodríguez



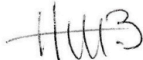
Dra. Perla Lizeth Hernández Cortés



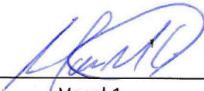
Dr. José Omar Lagunes Carrasco



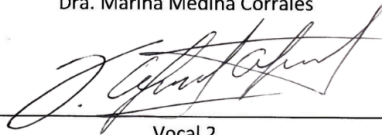
Presidente
Dr. Rubén Ramírez Nava



Secretario
Dra. Brenda González Hernández



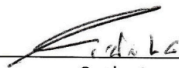
Vocal 1
Dra. Marina Medina Corrales



Vocal 2
Dr. Fernando Ochoa Ahmed



Vocal 3
Dra. Nancy Cristina Banda Saucedo



Suplente
Dr. Ricardo López García



DR. OSWALDO CEBALLOS GURROLA
Firma de enterado: COORDINADOR DEL PROGRAMA EDUCATIVO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA CULTURA FÍSICA



FACULTAD DE ORGANIZACIÓN DEPORTIVA

PS-3.6.2 0-01/2025

Constancia de Revisión Similitud

Pablo Tadeo Ríos Gallardo

Alumno

Presente.-

Por medio de la presente hacemos CONSTAR que el producto integrador: Tesis de Doctorado, con el nombre: **Uso de tecnologías para evaluar el salto vertical: análisis de validación y fiabilidad**, presentado para finalizar el programa de Doctorado en Ciencias de la Cultura Física, modalidad escolarizada, ha pasado por la revisión similitud por medio del programa *Turnitin* y se ha corroborado que el reporte de porcentaje es menor o igual al establecido de un 30% en su contenido y ha realizado de manera adecuada la citación de sus fuentes.

ATENTAMENTE

“Alere Flamman Veritatis”

Ciudad Universitaria, a 11 de noviembre del 2025



COORDINACIÓN
DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA CULTURA FÍSICA

Dr. Oswaldo Ceballos Gurrola
Coordinador

Doctorado en Ciencias de la Cultura Física



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Ciudad Universitaria S/N, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455

Tel. 81 1340 4450 y 81 1340 4451

www.fod.uanl.mx

Dedicatoria

Resulta paradójico, y a la vez profundamente humano, que una tesis forjada en el rigor del método científico se inaugure desde la espiritualidad. Esta dedicatoria es, ante todo, un acto de fe y gratitud.

Consagro el fruto de este esfuerzo a Dios, cuya presencia he reconocido siempre a través del amor y la fortaleza de mi familia. Juntos atravesamos pruebas de vida que demandaron la totalidad de nuestro ser; momentos en los que llegué a pensar que esta obra quedaría inconclusa. Hoy, con profunda humildad y sensatez, la ofrezco como un testimonio de nuestra resiliencia. A mi familia nuclear, en su integridad, dedico este trabajo que hoy culmina: lo hemos logrado. Sepan que entregué la totalidad de mí, sin escatimar un solo esfuerzo, desde el principio hasta el fin.

En un ejercicio de retrospectiva, dedico también esta obra al niño que fui, al adolescente que exploraba el mundo y a aquel joven adulto que, el 5 de diciembre de 2014, al alcanzar su primer grado profesional, ya anhelaba este nuevo peldaño. Sabía que el camino sería difícil, complejo y quizás lento; la realidad confirmó cada una de sus intuiciones. Sin embargo, el deseo de estudiar, la voluntad de crecer y esa insaciable intención de aprender y convertirse en un referente en mi campo, han sido el motor que hoy materializa aquel anhelo.

Esta es la tercera vez que alcanzo la cumbre. Deseo, con toda certeza, que sea la antesala de la cuarta.

Agradecimientos

En estas líneas deseo plasmar mi más profundo y sincero agradecimiento a cada persona que fue parte de este proceso doctoral. Tengo presente cada muestra de apoyo, cada gesto de soporte y cada palabra de aliento que me fue ofrecida. Si bien el objetivo era un grado académico, el aprendizaje más significativo que atesoró de todos ustedes ha sido, sin duda, sobre el liderazgo.

Mi gratitud primera, total y completa, es para Melissa Guerra, quien ha sido la copiloto por excelencia durante estos tres años. De ella he aprendido a interpretar el horizonte, a tomar decisiones certeras para navegar las tormentas de este viaje o, mejor aún, para evitarlas. Su apoyo en el dominio de una segunda lengua fue superlativo y crucial, y su extraordinario carisma, aunado a su habilidad para la escucha activa, fueron un faro. Infinitamente agradecido por su capacidad para tomar el control de mando en aquellos momentos en que las circunstancias exigieron, de manera abrupta, toda mi atención en otros frentes.

Deseo agradecer al mentor de esta obra, el Dr. Luis Enrique Carranza García. Gracias, Doctor, por su liderazgo, por la confianza incondicional que depositó en mí y por el respaldo firme y objetivo que siempre me demostró. Aplaudo su visión para identificar el potencial en el campo donde nació esta investigación. Reconozco y agradezco su invaluable capacidad para permitirme un proceso creativo libre; por dejarme trazar la carta y la ruta de vuelo, y soltarme a volar, actuando siempre como la torre de control precisa que interviene en los momentos justos para corregir el rumbo sin jamás perder altitud, velocidad u horizonte. Sepa que mi aprendizaje no fue solo en conocimiento, sino, y lo reitero, en el arte del liderazgo.

De manera inmediata, debo expresar mi gratitud al Dr. José Leandro Tristán Rodríguez. Recuerdo con claridad el día que le compartí mi intención de estudiar este doctorado: literalmente, me tomó del brazo y me condujo a la subdirección de posgrado, remolcándome hasta la pista de despegue. Sin embargo, el gesto que más valoro y agradezco fue su lucha por destrabar las dificultades iniciales del proceso, una etapa que fue sumamente desgastante y frustrante.

Verlo salir a defender mi causa es algo que valoro inmensamente. El liderazgo y la filantropía son cualidades raras y preciosas; gracias por demostrarlas.

Mi gratitud se extiende a ustedes, queridos y apreciables Doctores, quienes en julio de 2017 decidieron darme la oportunidad de integrarme a su gestión sin siquiera conocerme. En perspectiva, esta tesis nació en ese instante. Durante los años que siguieron, fui un observador privilegiado del liderazgo en acción: una puerta siempre abierta por la que solían entrar problemas, pero por la que indefectiblemente salían soluciones. Fue una maestría en el arte de saber seguir.

Quiero hacer una mención especial al profesor Quino, pieza clave para que este vuelo pudiera finalmente despegar hace tres años. Sin dudarlo y anteponiéndose a cualquier obstáculo, me ofreció su apoyo incondicional, facilitando los cambios laborales y personales necesarios para que mi aceptación en el programa fuera integral.

Mi agradecimiento siempre presente para Carlos Alberto Medina Molina y Luis Esquivel, socios de Sport AI. Gracias por facilitar con enorme generosidad la tecnología que fue indispensable para esta tesis y por invertir su valioso tiempo para acudir personalmente a la facultad durante la toma de datos. Su contribución es visible en esta obra y en su producción científica, pero su impacto más grande queda en mí, al demostrar una calidad humana excepcional al ayudar desinteresadamente a un estudiante a culminar su investigación.

En este mismo tenor, dejo constancia de mi gratitud a Osmar García y a Giovanni Tristán. Como estudiantes, estuvieron presentes en el cien por ciento de este trayecto, ya fuera muy temprano por la mañana o muy tarde por la noche. Su tiempo, dedicación y esfuerzo han sido fundamentales. Deseo que esta experiencia no solo quede como un recuerdo, sino como un aprendizaje valioso para sus propios caminos de posgrado. Son jóvenes de una calidad extraordinaria y confío haberles transmitido la motivación para que alcancen sus propias cumbres académicas. Han sabido seguir; pronto serán seguidos. El liderazgo es la lección más importante que espero haberles legado.

Asimismo, es un honor agradecer al Dr. Samuel Montalvo. Su trayectoria en los Estados Unidos no solo es admirable, sino que representa la materialización de esa cuarta cumbre a la que aspiro. Agradezco profundamente cada consejo, cada enseñanza y el entrenamiento en nuevas habilidades que elevaron de manera considerable el rigor científico de este proceso. Valoro enormemente su disposición para trabajar en mi proyecto en días y horas poco habituales, así como el potencial que vio en nuestro esfuerzo conjunto, el cual es un reflejo del que yo leí en sus trabajos, referentes indiscutibles en esta área. Usted refuerza aquella valiosa lección de mis mentores: la importancia de rodearse de los mejores. Gracias por clarificar mi camino y por vincularme a nuevas esferas profesionales.

Mi gratitud se dirige también a una figura capital en esta investigación: el Dr. Carlos Balsalobre-Fernández. Su excepcional trabajo no solo fue la inspiración original de este estudio, sino que su humildad lo llevó a involucrarse directamente en él. Valoro inmensamente el tiempo que dedicó a responder, analizar nuestros datos y reencaminar la investigación. Su perspectiva fue crucial para comprender tanto los aciertos como los errores, recordándome que en la ciencia, aprender el "cómo no" es tan valioso como confirmar una hipótesis. Su guía fue una lección magistral sobre la integridad del proceso científico.

Mi aprecio se extiende a otro líder a quien, antes que director, considero un amigo: el Dr. Rubén Ramírez Nava. Gracias por su perenne disposición para atender una llamada o un mensaje, por su constante interés en mi bienestar y por fungir como puente, escalón y soporte en los momentos en que fue necesario. En mí siempre ha existido la intención de aportar a su gestión, y quiero que sepa que el sentimiento de colaboración es enteramente mutuo. Usted me demostró dos facetas indisociables: primero, la del ser humano solidario y, segundo, la del líder justo, atento, sensato y humilde que la alta dirección demanda. Gracias, Doctor, por su amistad y su invaluable colaboración.

Fuera del ámbito académico, expreso mi más profundo agradecimiento al Ing. Rodolfo Sánchez y a la Ing. Carmen Jáuregui. Su calidad humana, su espiritualidad y su sabiduría son un tesoro que valoro enormemente. Gracias por su apoyo, por su presencia constante y por el respeto con el que siempre me han tratado. Su templanza y su visión de la vida me han enseñado virtudes que antes no conocía: un estilo de liderazgo particular y admirable.

No podría concluir sin agradecer a mis profesores. Cada uno aportó de manera significativa a mi formación, clase tras clase, al ver en mí a un estudiante siempre dispuesto a ser conducido por su pericia. De cada uno de ustedes he tomado lo mejor. Mi respeto hacia mis maestros es, y siempre será, innegociable. Agradezco particularmente al Dr. Raúl Hoyos, cuyas clases fueron, sencillamente, sobresalientes.

Gracias a la SECIHTI por permitirme ser acreedor a la beca federal, fueron un primer reto y aprendizaje. Su aporte permitió crear un entorno favorable para el aprendizaje siendo un maravilloso facilitador.

A todos y cada uno de los aquí mencionados, y a aquellos que una omisión involuntaria deja fuera de estas líneas, gracias por haber sido parte de este viaje. Me he permitido la extensión en este agradecimiento, aun a sabiendas de que toda palabra se queda corta para dimensionar la gratitud que siento. Cada uno es merecedor de ser nombrado por su infatigable labor, pues han sido artífices de esta tesis doctoral. Por ello, este logro no es un triunfo individual, sino una victoria que nos pertenece a todos. ¡Felicidades!

*“El primer paso es establecer que algo es posible; entonces la probabilidad
ocurrirá.”*

-Elon Musk

Abstract

Background: The quantification of vertical jump height is a cornerstone in neuromuscular assessment, yet gold-standard force platforms remain impractical for routine field use. Emerging portable methods—video-based manual analysis, infrared contact mats, and computer vision coupled with artificial intelligence (CV+AI)—offer low-cost alternatives, but their concurrent validity and reliability across diverse jump types and athlete cohorts remain underexplored.

Purpose: This thesis aimed to evaluate and compare the test–retest reliability and concurrent validity of five field technologies—two manual video analyses with My Jump Lab (A/B) at 240 fps, an infrared contact mat, MuscleLab CV+AI (My Jump Lab IA) at 30 fps, and a dual-force platform system Vald Performance—across three jump modalities (squat jump, countermovement jump, Abalakov) and four athlete cohorts (recreational, basketball, soccer, national-level volleyball).

Methods: Eighty male participants (20 per cohort) performed three maximal trials of each jump in two sessions (7–10 days apart). Jump heights were recorded simultaneously by all devices. Relative reliability and validity were quantified via ICC(2.1) and ICC(3.1) with 95% confidence intervals; absolute agreement was assessed by bias, limits of agreement, coefficient of variation, and standard error of measurement. Stratified analyses by jump type and cohort were conducted, and a post-hoc +2.5 cm anthropometric adjustment was applied to the CV+AI data to simulate footwear height.

Results: Manual video analyses achieved excellent reliability and validity (ICC(2.1)>0.95; mean bias<0.2 cm) across all jumps and cohorts. The infrared mat demonstrated high performance for CMJ and Abalakov (ICC(2.1)>0.94) but poor agreement in squat jumps (ICC≈0.26), particularly in non-athletes. CV+AI performance was highly protocol-dependent: unadjusted, it failed in squat jumps (ICC(2.1)≈0) but reached good validity in CMJ (ICC(2.1)=0.84–0.94) and moderate in Abalakov (ICC(2.1)=0.44–0.81). A +2.5 cm adjustment did not affect ICC(2.1) but improved ICC(3.1) by reducing systematic bias. Cohort stratification revealed that greater movement variability in elite athletes paradoxically reduced CV+AI accuracy.

Conclusions: High-speed manual video and infrared mats represent robust field surrogates for force platforms in CMJ and Abalakov. CV+AI methods hold promise but require strict adherence to protocol (start in upright posture, ≥60 fps) and post-processing correction, such as the +2.5 cm anthropometric adjustment analyzed in this study to compensate for footwear, to approach absolute agreement. These findings inform practitioners on selecting and implementing portable technologies for vertical jump assessment.

Keywords: vertical jump; concurrent validity; test–retest reliability; computer vision; intraclass correlation.

Resumen

Antecedentes: La cuantificación de la altura del salto vertical constituye un indicador fundamental de la capacidad neuromuscular y el rendimiento atlético, pero las plataformas de fuerza, pese a ser el “*gold standard*”, resultan poco prácticas para su uso cotidiano en el campo. En respuesta, han surgido tecnologías portátiles —análisis manual de vídeo, sistemas de alfombrilla por infrarrojos y métodos de visión por computadora con inteligencia artificial (VC+IA)— cuya validez y fiabilidad concurrente requieren evaluación sistemática.

Objetivo: Este trabajo tuvo como finalidad comparar la fiabilidad test–retest y la validez concurrente de cinco sistemas de medición: dos análisis manuales de vídeo con *My Jump Lab* (A y B) a 240 *fps*, una alfombrilla infrarroja *IR-Mat*, *MuscleLab*, VC+IA (*My Jump Lab* IA) a 30 *fps*, y una doble plataforma de fuerza portátil *Vald Performance*, en tres modalidades de salto (*Squat Jump*, *Countermovement Jump* y *Abalakov*) y cuatro cohortes de atletas (recreacionales, baloncesto, fútbol y voleibol de élite).

Métodos: Ochenta varones (20 por cohorte) completaron tres ensayos máximos de cada salto en dos sesiones separadas por 7–10 días. Todas las tecnologías registraron simultáneamente la altura de salto. La fiabilidad relativa y la validez se calcularon mediante CCI(2.1) y CCI(3.1) con sus IC del 95 %; la concordancia absoluta se evaluó a través de sesgo medio, límites de acuerdo, coeficiente de variación y error estándar de la medida. Además, se aplicó un ajuste antropométrico post-hoc de +2.5 cm a los datos de VC+IA para simular el efecto del calzado.

Resultados: Los análisis manuales alcanzaron una fiabilidad y validez excelentes (CCI(2.1) > 0.95; sesgo < 0,2 cm) en todas las condiciones. La alfombrilla infrarroja obtuvo un rendimiento elevado en *CMJ* y *Abalakov* (CCI(2.1) > 0.94) pero mostró baja concordancia en *SJ* (CCI ≈ 0,26), especialmente en no deportistas. El método Vc+IA demostró ser altamente dependiente del protocolo: sin ajuste, falló en *SJ* (CCI(2.1) ≈ 0) pero alcanzó validez buena en *CMJ* (CCI(2.1) = 0,84–0.94) y moderada en *Abalakov* (CCI(2.1) = 0.44–0.81). El ajuste de +2.5 cm no modificó CCI(2.1) pero mejoró CCI(3.1) al reducir el sesgo sistemático. El análisis estratificado reveló que la elevada variabilidad cinemática de los atletas de élite redujo la precisión de VC+IA.

Conclusiones: El análisis manual de vídeo y la alfombrilla infrarroja constituyen sustitutos confiables de las plataformas de fuerza en *CMJ* y *Abalakov*. Los métodos de VC+IA ofrecen potencial, siempre que se cumpla rigurosamente el protocolo (grabación desde posición erguida, ≥ 60 *fps*) y se apliquen correcciones *post-hoc* como el ajuste antropométrico de +2.5 cm analizado en este estudio para compensar el calzado. Estos hallazgos orientan a entrenadores y clínicos en seleccionar e implementar tecnologías portátiles para la evaluación del salto vertical.

Palabras clave: salto vertical; validez concurrente; fiabilidad test–retest; visión por computadora; coeficiente de correlación intraclase.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	5
1.2. Pregunta de Investigación.....	7
1.3. Justificación.....	9
1.4. Objetivos de la Investigación.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos.....	10
1.5. Hipótesis.....	12
1.6. Estructura de la Tesis.....	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 El Salto Vertical como Herramienta de Evaluación Neuromuscular.....	18
2.1.1 Fundamentos Biomecánicos y Fisiológicos del Salto Vertical.....	19
2.1.2. Tipología y Características de los Saltos Verticales de Evaluación.....	21
2.2 Evolución de las Tecnologías para la Medición del Salto Vertical: Del Laboratorio al Campo.....	23
2.2.1. El Criterio de Referencia: Plataforma de Fuerza.....	25
2.2.2 Primeras Alternativas de Campo: Sistemas Ópticos y Alfombrillas de Contacto.....	26
2.2.3. La Revolución Móvil: Aplicaciones Basadas en Análisis de Vídeo.....	27
2.3 La Nueva Frontera: Inteligencia Artificial en la Biomecánica Deportiva.....	28
2.3.1. Principios de la Visión por Computadora para la Estimación del Movimiento.....	30
2.3.2. Discrepancias Fundamentales en la Medición: Tiempo de Vuelo vs. Desplazamiento del Centro de Masa.....	31
2.4. Fundamentos de la Evaluación Instrumental en Ciencias del Deporte.....	33
2.4.1. Concepto y Tipos de Validez.....	35
2.4.2. Concepto y Métricas de Fiabilidad.....	36
2.5. Síntesis del Estado del Arte y Brecha en el Conocimiento.....	38

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	40
3.1 Diseño del Estudio.....	42
3.2. Variables del Estudio.....	43
3.4 Instrumentos y Mediciones.....	46
3.4.1 Mediciones Antropométricas.....	46
3.4.2. Sistemas de Medición del Salto.....	47
1. Plataforma de Fuerza (ForceDecks).....	47
2. Análisis Manual de Vídeo en Cámara Lenta (App My Jump Lab).....	48
3. Análisis Automatizado con IA (My Jump Lab IA).....	49
4. Sistema de Alfombra de Contacto por Infrarrojos (MuscleLab).....	50
3.5. Procedimiento Experimental.....	51
3.6. Análisis Estadístico.....	55
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	57
4.1. Demográficos.....	58
4.1.2 Altura de Salto por Dispositivo y Cohorte.....	60
4.3 Análisis de Fiabilidad Test-Retest.....	65
4.4. Análisis de Validez Concurrente.....	69
4.4.1. Validez y concordancia en el Salto sin Contramovimiento (SJ).....	69
4.4.2 Validez y concordancia en el Salto Contramovimiento (CMJ).....	74
4.4.3. Validez y Concordancia en el Salto Abalakov.....	79
4.4.4. Validez Concurrente Estratificada por Cohorte y Tipo de Salto.....	84
4.4.5. Análisis Exploratorio Profundo de la IA.....	92
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	96
5.1. Resumen de los Hallazgos Principales.....	99
5.2. Fiabilidad y Validez de las Tecnologías Basadas en Tiempo de Vuelo.....	100
5.3. El Comportamiento de la Visión por Computadora: Un Análisis Multifactorial..	101
5.3.1. El Fallo en el Salto sin Contramovimiento (SJ): La Importancia del Protocolo.....	101
5.3.2. El “Trade-off” de FPS vs. Resolución y el Desafío del Abalakov (H4 y	

H6).....	103
5.4. El Impacto del Ajuste Antropométrico: Consistencia vs. Concordancia (H5)....	105
5.5. Influencia de la Cohorte de Atletas en la Validez de los Instrumentos.....	106
5.6. Implicaciones Prácticas y Recomendaciones.....	107
5.7. Limitaciones y Futuras Líneas de Investigación.....	110
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	112
Referencias Bibliográficas.....	115
Anexos.....	125

Índice de Tabla

Tabla 1. Características demográficas y antropométricas de los participantes....	59
Tabla 2. Estadísticas descriptivas de alturas de salto por dispositivo y cohorte..	61
Tabla 3. Fiabilidad Test-Retest: Salto sin Contramovimiento (SJ).....	66
Tabla 4. Fiabilidad Test-Retest: Salto con Contramovimiento (CMJ).....	67
Tabla 5. Fiabilidad Test-Retest: Salto Abalakov.....	68
Tabla 6. Tabla Validez vs Plataforma – SJ.....	70
Tabla 7. Validez vs Plataforma – CMJ.....	75
Tabla 8. Validez vs Plataforma – Abalakov.....	80
Tabla 9: Validez Concurrente y Sesgo por Cohorte y Tipo de Salto.....	86
Tabla 10: Análisis Detallado de la Validez del Dispositivo IA.....	93
Tabla 11: Fiabilidad Test–Retest del Dispositivo IA.....	95

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El estudio del salto vertical representa uno de los pilares en la evaluación de la potencia explosiva de las extremidades inferiores, con implicaciones directas en el rendimiento deportivo y la prevención de lesiones (Eduardo Sáez Sáez de Villarreal et al., 2011; Pedro Jiménez-Reyes et al., 2011). Tradicionalmente, las plataformas de fuerza han sido consideradas el “*gold standard*” en este ámbito, pues registran de manera directa las fuerzas de reacción al suelo y permiten calcular con precisión la altura de vuelo mediante la integración de la señal de fuerza (Zhanxin Sha et al., 2021). No obstante, su elevada complejidad técnica y coste de adquisición y mantenimiento restringe su uso al laboratorio, lo que dificulta el monitoreo sistemático en contextos aplicados, como entrenamientos de campo o clínicas deportivas (Balsalobre-Fernández et al., 2015).

Durante la última década, la masificación de dispositivos móviles y la mejora de las cámaras integradas ha propiciado el surgimiento de aplicaciones para dispositivos inteligentes que, mediante el análisis de vídeo en cámara lenta, calculan la altura del salto a partir del tiempo de vuelo (Gallardo-Fuentes et al., 2016; Montalvo et al., 2021). Estas herramientas han demostrado una validez concurrente y una fiabilidad test–retest elevadas frente al criterio de referencia, democratizando el acceso a mediciones biomecánicas (Balsalobre-Fernández et al., 2015). Sin embargo, el avance tecnológico ha ido un paso más allá con la adopción de métodos de visión por computadora (VC) e inteligencia artificial (IA) que, en lugar de inferir la altura desde el tiempo de vuelo, estiman el desplazamiento espacial del sujeto mediante algoritmos de detección de contornos y seguimiento de puntos clave del cuerpo (Balsalobre-Fernández, 2023).

Este nuevo paradigma promete un análisis más completo de la cinemática del salto incluyendo fases de impulso y aterrizaje— pero plantea interrogantes fundamentales: ¿la identificación automática del sujeto y el cálculo de la altura mediante *bounding boxes* ofrecen resultados equiparables a la señal cinética de una plataforma de fuerza? ¿Cómo inciden variables como la resolución del vídeo, la frecuencia de muestreo (*fps*) y el protocolo de inicio de grabación en la precisión de los algoritmos? Estudios recientes revelan discrepancias sustanciales en la detección de eventos de vuelo y en la estimación de métricas biomecánicas cuando se comparan métodos basados en visión con los datos de fuerza de tierra (Bishop et

al., 2022; Chavda et al., 2018), pero hasta ahora no existe un marco homogéneo para evaluar la validez y la fiabilidad de estas tecnologías emergentes en una misma muestra.

Frente a esta brecha, la presente investigación tiene por objeto abordar de manera integral la evaluación de cinco tecnologías de medición —plataforma de fuerza, dos métodos de análisis manual de vídeo (A y B), sistema infrarrojo de contacto y aplicación VC+IA— en tres tipos de salto (sin contramovimiento, con contramovimiento y Abalakov), aplicadas de forma concurrente en cuatro cohortes de atletas de distinto nivel: no deportistas, basquetbolistas, futbolistas y voleibolistas. Este diseño multifactorial permitirá no solo comparar la exactitud y precisión de cada instrumento respecto al criterio de referencia, sino también analizar cómo la experiencia deportiva y la complejidad cinemática de cada salto influyen en las métricas de fiabilidad (intra- e inter-sesión) y validez (concurrente y concordancia absoluta).

La relevancia de este estudio radica en dos vertientes. Primero, la confirmación o refutación de la hipótesis de que los métodos basados en tiempo de vuelo ofrecen una validez y fiabilidad superiores a la VC+IA, especialmente en saltos de fase de vuelo breve como el salto sin contramovimiento. Segundo, la exploración de si un ajuste antropométrico post-hoc —añadiendo 2.5 cm para compensar la altura de calzado detectada por el algoritmo de IA— puede corregir sesgos sistemáticos y mejorar la concordancia absoluta sin alterar la consistencia de las medidas. De ser así, este hallazgo constituiría un aporte práctico de gran valor para la aplicación de la IA en evaluación de rendimiento y rehabilitación.

Estructuralmente, este documento se organiza en cinco capítulos. El primero presenta el planteamiento del problema, justifica la necesidad del estudio y expone las preguntas y objetivos de investigación. El segundo describe la revisión sistemática de la literatura y los fundamentos teóricos de los métodos de medición. El tercero detalla la metodología: diseño experimental, características de la muestra, procedimientos de recolección y procesamiento de datos, y los métodos estadísticos empleados. El cuarto capítulo expone los resultados de la fiabilidad y validez, organizados en secciones que abordan cada salto y cohorte, así como los análisis exploratorios de la IA. Finalmente, el quinto capítulo discute los hallazgos, sus

implicaciones teóricas y prácticas, las limitaciones del estudio y propone líneas futuras de investigación.

En síntesis, esta tesis busca ofrecer un análisis riguroso y multidimensional de las tecnologías de campo para la evaluación del salto vertical, con el fin de guiar a investigadores y profesionales en la elección y optimización de herramientas de medición accesibles, fiables y válidas en entornos aplicados de alto rendimiento y rehabilitación deportiva.

1.1. Planteamiento del Problema

En el paradigma de las ciencias del deporte, la evaluación de la potencia de las extremidades inferiores a través del salto vertical se erige como un pilar fundamental, proveyendo un indicador crítico del rendimiento neuromuscular y de la capacidad atlética en una multitud de disciplinas (Jiménez-Reyes y González-Badillo, 2011; Sáez Sáez de Villarreal et al., 2011). La cuantificación precisa de este gesto motor ha dependido tradicionalmente de tecnologías de laboratorio, entre las cuales las plataformas de fuerza son universalmente reconocidas como el criterio de referencia o *gold standard* por su capacidad para registrar de forma directa las fuerzas de reacción del suelo (Sha y Dai, 2021). No obstante, el elevado costo, la complejidad operativa y la escasa portabilidad de dichos instrumentos imponen una barrera significativa para su implementación en el contexto aplicado del entrenamiento y la monitorización continua, generando una brecha persistente entre la necesidad de datos objetivos y la accesibilidad de las herramientas (Balsalobre-Fernández et al., 2015).

Para salvar esta brecha, la última década ha sido testigo de una revolución tecnológica impulsada por la ubicuidad de los teléfonos inteligentes. La proliferación de aplicaciones móviles que, mediante el análisis de vídeo a alta velocidad, calculan la altura del salto a partir del tiempo de vuelo, ha democratizado el acceso a la evaluación biomecánica. Una sólida base de evidencia científica ha corroborado la validez y fiabilidad de este enfoque, demostrando una alta concordancia entre aplicaciones como *My Jump* y los sistemas de laboratorio tradicionales (Barbalho et al., 2021; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Gallardo-Fuentes et al., 2016; Montalvo et al., 2021).

Sin embargo, el campo tecnológico se encuentra en una evolución perpetua, y el paradigma de evaluación está transitando desde los métodos validados basados en el tiempo de vuelo hacia enfoques más sofisticados que emplean la combinación de Visión por Computadora (VC) e Inteligencia Artificial (IA) (C. Balsalobre-Fernández et al., 2023). Este avance introduce el **problema central** de la presente investigación. La transición de un método de cálculo indirecto (tiempo de vuelo) a uno directo (desplazamiento espacial del centro de masa) genera una discrepancia metodológica fundamental. La eficacia y precisión de los algoritmos de

VC+IA no solo dependen de la calidad de la imagen, sino que son críticamente sensibles a factores contextuales y de protocolo que no han sido suficientemente estudiados, tales como la frecuencia de fotogramas (*fps*), la resolución del vídeo y, de manera crucial, el protocolo de ejecución del salto por parte del atleta.

La literatura científica más reciente ha comenzado a señalar esta laguna en el conocimiento. Investigadores como Bishop et al. (2022) han instado a la comunidad científica a realizar validaciones rigurosas de estas nuevas métricas, no sólo para establecer su fiabilidad, sino para determinar su utilidad en poblaciones de atletas de élite, cuyas estrategias de salto pueden diferir significativamente. Más aún, se ha evidenciado que la detección del inicio del movimiento puede variar sistemáticamente entre la detección visual de una aplicación y la detección cinética de una plataforma de fuerza (Chavda et al., 2018), lo que añade otra capa de complejidad al problema de la validación.

Por tanto, la comunidad científica se enfrenta a un problema multifactorial: ¿son las herramientas basadas en VC+IA lo suficientemente válidas y fiables para ser utilizadas con confianza en la práctica deportiva, y cómo se ve afectada su precisión por el tipo de salto (sin contramovimiento, contramovimiento y *Abalakov*), el protocolo de ejecución y el nivel de rendimiento del atleta?

1.2. Pregunta de Investigación

A partir del planteamiento del problema, esta tesis se propone esclarecer, de manera empírica y rigurosa, los alcances y limitaciones de cinco tecnologías de medición del salto vertical. En concreto, se buscan responder las siguientes ocho preguntas:

1. **Fiabilidad intra e inter-sesión**

¿Cuál es la consistencia ((CCI 2.1)) y la precisión absoluta (CV, EEM) de las mediciones de salto sin contramovimiento (*SJ*), contramovimiento (*CMJ*) y *Abalakov* obtenidas por análisis manual de vídeo, sistema infrarrojo y VC+IA, comparadas con la plataforma de fuerza?

2. **Validez concurrente**

¿En qué grado coinciden ((CCI 2.1)) y acuerdan (sesgo medio y Límites de Acuerdo 95%) las mediciones de cada tecnología alternativa con el *gold standard* de plataforma de fuerza para los tres tipos de salto?

3. **Comportamiento métrico de VC+IA frente al tiempo de vuelo**

¿Presenta la modalidad VC+IA un patrón de sesgo sistemático, error estándar y límites de acuerdo comparable a los métodos tradicionales basados en tiempo de vuelo, incluyendo la evaluación del salto *Abalakov*?

4. **Efecto de la cohorte deportiva**

¿Cómo influye el nivel de entrenamiento y competencia (no deportistas, basquetbolistas, futbolistas, voleibolistas) en la fiabilidad y la validez de cada instrumento para *SJ*, *CMJ* y *Abalakov*?

5. **Protocolo de inicio de grabación en SJ**

¿Modifica significativamente la validez (sesgo y Límites de Acuerdo) de la

VC+IA en *SJ* iniciar la grabación desde posición erguida en lugar de 90° de flexión de rodilla?

6. **Resolución vs. frecuencia de muestreo en VC+IA**

¿Es suficiente para la VC+IA grabar a 30 fps – 4K, o sigue siendo determinante una frecuencia ≥ 60 fps para mantener la exactitud en los tres tipos de salto?

7. **Ajuste antropométrico *post-hoc***

¿Mejora la concordancia absoluta (CCI 3.1) de la VC+IA, sin alterar su consistencia ((CCI 2.1)), aplicar un offset de +2.5 cm para compensar el calzado detectado por el algoritmo?

8. **Intercambiabilidad de instrumentos**

¿Pueden considerarse intercambiables, tanto a nivel global como estratificado por cohorte, los métodos alternativos (análisis manual A/B, infrarrojo y VC+IA) con la plataforma de fuerza, en términos de sesgo medio y Límites de Acuerdo aceptables para *SJ*, *CMJ* y *Abalakov*?

1.3. Justificación

La medición precisa de la altura de salto vertical y, por extensión, de la potencia explosiva de las extremidades inferiores, constituye una herramienta esencial para evaluar la fatigabilidad neuromuscular y las adaptaciones al entrenamiento en deportistas de distintos niveles. En un entorno donde la toma de decisiones debe ser rápida y basada en evidencia tanto en entrenamientos de alta competición como en procesos de rehabilitación clínica, disponer de sistemas de evaluación accesibles, fiables y válidos fuera del laboratorio se traduce en un avance estratégico para entrenadores, preparadores físicos y fisioterapeutas.

Si las aplicaciones de Análisis Manual, los Sistemas de Infrarrojos o las soluciones de Visión por Computadora e Inteligencia Artificial (VC+IA) demuestran un grado de validez y fiabilidad comparable al *gold standard* de plataforma de fuerza, o bien si se identifica con rigor su margen de error y condiciones de uso óptimas, se abrirá la posibilidad de implementar protocolos de monitorización continua en situaciones reales de entrenamiento y competición. Este conocimiento permitirá adaptar las cargas de trabajo de manera individualizada, optimizar la progresión del rendimiento y reducir el riesgo de sobrecarga y lesión mediante un control más frecuente y objetivo de la respuesta neuromuscular.

Además, caracterizar de forma sistemática las fortalezas y limitaciones de cada tecnología en tres tipos de salto sin contramovimiento, con contramovimiento y *Abalakov* y en cuatro cohortes de deportistas brinda una guía práctica para la comunidad científica y técnica. Así, esta investigación no sólo cierra una brecha crítica en la literatura deportiva, sino que también suministra un marco de referencia sólido para la adopción, interpretación y calibración de herramientas móviles en el ámbito del entrenamiento y la salud músculo-esquelética.

1.4. Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Investigar de manera integral la validez concurrente, la fiabilidad intra- e inter-sesión y la concordancia de las tecnologías de campo para la medición del salto vertical— análisis manual de vídeo (A y B), sistema infrarrojo de contacto y aplicación VC+IA— en comparación con la plataforma de fuerza, evaluando cómo estas propiedades métricas se ven moduladas por el tipo de salto (*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*), el nivel de rendimiento deportivo (cohorte) y las variaciones en el protocolo de grabación.

Objetivos Específicos

1. **Cuantificar la fiabilidad test–retest intra e inter-sesión** de los métodos de análisis manual, sistema infrarrojo y VC+IA, mediante CCI (2.1) y CCI (3.1), así como Coeficiente de Variación y Error Estándar de la Medida, frente a la plataforma de fuerza, tanto a nivel global como estratificado por cohorte.
2. **Evaluar la validez concurrente** de cada tecnología alternativa, calculando CCI (2.1), sesgo sistemático y Límites de Acuerdo 95 % en el salto sin contramovimiento, con contramovimiento y Abalakov.
3. **Analizar el impacto del protocolo de inicio de grabación** (grabación desde posición erguida vs. a 90° de flexión de rodilla) sobre la precisión y el sesgo de las estimaciones de la aplicación VC+IA en el salto sin contramovimiento.
4. **Comparar la influencia de la configuración de vídeo** (resolución 4K a 30 *fps* vs. ≥ 60 *fps*) en la exactitud de la medición de altura de salto por VC+IA en las tres modalidades.
5. **Determinar el efecto de un ajuste antropométrico post-hoc de +2.5 cm** en la concordancia absoluta (CCI 3.1) de la aplicación VC+IA, sin comprometer su consistencia (CCI 2.1), para cada tipo de salto.

6. **Evaluar experimentalmente la aplicabilidad de VC+IA en el salto Abalakov**, proponiendo que, a pesar de no haber sido concebida inicialmente para este gesto, sus métricas de fiabilidad y validez puedan alcanzar niveles aceptables frente a la plataforma de fuerza.

7. **Explorar la intercambiabilidad de las tecnologías de campo** (análisis manual A/B, infrarrojo y VC+IA) con la plataforma de fuerza, mediante la comparación de sesgo medio y Límites de Acuerdo, tanto para la muestra global como por cohorte, en los tres tipos de salto.

1.5. Hipótesis

- **H1 (Fiabilidad TFV):** Los métodos basados en tiempo de vuelo —análisis manual de vídeo (A y B) y sistema infrarrojo— presentarán fiabilidad de “buena” a “excelente” ($CCI \geq 0.75$) y alta concordancia con la plataforma de fuerza en los tres tipos de salto (*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*).
- **H2 (VC+IA):** El desempeño métrico de la herramienta VC+IA será heterogéneo, con validez concurrente y fiabilidad significativamente moduladas por el tipo de salto y el nivel de la cohorte, mostrando especial dificultad en el salto *Abalakov* debido al movimiento de brazos y a la complejidad del *bounding box*.
- **H3 (Protocolo SJ):** Iniciar el seguimiento (*tracking*) del salto sin contramovimiento desde la flexión a 90° de rodilla, en lugar de desde la posición erguida, reducirá la validez concurrente de la VC+IA (mayor sesgo y límites de acuerdo más amplios).
- **H4 (Vídeo 30 fps vs. 60 fps):** A pesar de la mayor resolución espacial de una grabación en 4K, una frecuencia de muestreo de 30 *fps* degradará la precisión de la VC+IA en *SJ*, *CMJ* y *Abalakov* más que una grabación a 60 *fps*, evidenciando la primacía de la tasa de muestreo sobre la resolución.
- **H5 (Ajuste antropométrico):** La aplicación de un offset *post-hoc* de +2.5 cm no modificará la consistencia ((CCI 2.1)) de la VC+IA, pero mejorará su concordancia absoluta (CCI 3.1) en los tres tipos de salto al compensar el calzado detectado por el algoritmo.
- **H6 (Validez y fiabilidad en Abalakov):** Dado que la VC+IA no fue diseñada originalmente para el salto *Abalakov*, se anticipa que sus métricas de validez concurrente ((CCI 2.1) y CCI 3.1) y su fiabilidad intra- e inter-sesión serán significativamente inferiores a las obtenidas en *SJ* y *CMJ*.

- **H7 (Intercambiabilidad de métodos):** Sólo los métodos de tiempo de vuelo (análisis manual A/B y sistema infrarrojo) serán intercambiables con la plataforma de fuerza —definido como sesgo medio < 2 cm y Límites de Acuerdo dentro de $\pm 1.96 \cdot DE$ — en *CMJ* y *Abalakov*, pero no en *SJ*. Por el contrario, la VC+IA no alcanzará la intercambiabilidad en *SJ* y, pese al ajuste de +2.5 cm, sólo logrará una intercambiabilidad marginal en *CMJ* y *Abalakov*.

1.6. Estructura de la Tesis

Para abordar de manera sistemática los objetivos y preguntas planteadas, esta tesis doctoral se estructura en cinco capítulos interrelacionados:

- **Capítulo I. Introducción**

Se expone el contexto y la motivación del estudio, se delimita el problema de investigación, se justifican las aportaciones esperadas, se formulan las preguntas e hipótesis de trabajo, y se describen los objetivos generales y específicos.

- **Capítulo II. Marco Teórico**

Se revisa la literatura sobre la biomecánica del salto vertical, los fundamentos del análisis de tiempo de vuelo y de los métodos de visión por computadora e IA, así como los conceptos de validez, fiabilidad y concordancia en la medición deportiva. También se discuten estudios previos y vacíos de conocimiento.

- **Capítulo III. Metodología**

Se detalla el diseño experimental: caracterización de la muestra, procedimientos de recolección de datos, protocolos de salto y grabación, procesamiento de las señales de fuerza y de vídeo, definición de los criterios de inclusión/exclusión, y los métodos estadísticos empleados para los análisis de fiabilidad y validez.

- **Capítulo IV. Resultados**

Se presentan de forma ordenada los hallazgos cuantitativos: estadísticos descriptivos, análisis de fiabilidad intra- e inter-sesión, validez concurrente y concordancia global y estratificada, así como el estudio exploratorio del ajuste antropométrico para la VC+IA. Las tablas y figuras ilustran las métricas de

CCI, sesgo y Límites de Acuerdo por cohorte y tipo de salto.

- **Capítulo V. Discusión y Conclusiones**

Se interpretan los resultados a la luz de la literatura existente, evaluando el cumplimiento de las hipótesis. Se abordan las implicaciones prácticas para entrenamiento y rehabilitación, se reconocen las limitaciones del estudio y se plantean líneas de investigación futuras para profundizar en la aplicación de tecnologías móviles en la evaluación del rendimiento vertical.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Este capítulo despliega los fundamentos conceptuales y empíricos que sostienen la presente investigación. En primer lugar, se revisan los principios biomecánicos y fisiológicos que subyacen al salto vertical, detallando las fases cinemática y de producción de fuerza que lo convierten en un indicador robusto de la potencia explosiva de las extremidades inferiores. A continuación, se examina la evolución histórica y técnica de las herramientas de medición, desde los equipos de laboratorio —plataforma de fuerza y sistemas de contacto por infrarrojos— hasta las soluciones portátiles basadas en análisis manual de vídeo y las más recientes propuestas de Visión por Computadora e Inteligencia Artificial. Este recorrido permite identificar las discrepancias metodológicas y las fortalezas y limitaciones inherentes a cada enfoque. Finalmente, se clarifican los conceptos de validez concurrente, fiabilidad (consistencia y precisión) y concordancia, no en el sentido de indicadores psicométricos, sino como criterios métricos fundamentales para evaluar la calidad de las mediciones deportivas. Esta base teórica justifica y orienta el diseño metodológico que se detalla en el capítulo siguiente.

2.1 El Salto Vertical como Herramienta de Evaluación Neuromuscular

El salto vertical constituye una manifestación directa de la potencia explosiva de las extremidades inferiores, al requerir la generación de la máxima fuerza en un intervalo temporal mínimo. Este gesto motor integra de manera sinérgica la activación neuromuscular, la coordinación intermuscular y la rigidez elástica de los tejidos, aspectos que resultan determinantes para el rendimiento en disciplinas que exigen desplazamientos rápidos, cambios de dirección y absorción de impactos (Nogueira et al., 2020; Sheppard et al., 2007).

Desde un punto de vista biomecánico, el salto vertical puede descomponerse en tres fases principales: (1) fase de carga excéntrica, en la que la musculatura del cuádriceps, glúteos e isquiotibiales absorbe la energía mediante la flexión de rodilla y cadera; (2) fase de impulso concéntrico, donde estos mismos grupos musculares convierten la energía almacenada en fuerza propulsora, acelerando el centro de masa hacia arriba; y (3) fase de vuelo y aterrizaje, que pone a prueba el control postural y la capacidad de amortiguación del sistema musculoesquelético (Maarten F. Bobbert et al., 2001; Thomas A. McMahon et al., 1990).

Fisiológicamente, la velocidad de desarrollo de la fuerza (*Rate of Force Development, RFD*) y la capacidad de reclutamiento rápido de unidades motoras constituyen variables clave que sustentan la altura alcanzada en el salto (Cormie et al., 2010). Estudios con electromiografía han demostrado que atletas de alto rendimiento exhiben patrones de activación muscular más tempranos y sincronizados, lo que se traduce en una mayor RFD y, por ende, en saltos más altos (Shi Zhou et al., 1995).

Por su sencillez de ejecución y por el bajo costo de implementación en campo, el salto vertical se emplea no solo como prueba de laboratorio, sino también en entornos de entrenamiento y rehabilitación. La métrica más comúnmente utilizada es la altura de vuelo, obtenida tradicionalmente a través del tiempo de contacto con el suelo o mediante cámaras de alta velocidad (Lees et al., 2004). Sin embargo, las variantes del salto —con o sin contramovimiento, y el salto *Abalakov* que incorpora un balanceo de brazos— aportan información adicional sobre la

coordinación intersegmentaria y la contribución del ciclo de estiramiento-acortamiento muscular (CSAM) (Eamonn P. Flanagan et al., 2008).

En conjunto, la robustez del salto vertical como indicador de la función neuromuscular y su relativa facilidad de medición lo convierten en una herramienta idónea para evaluar, monitorear y comparar la potencia explosiva en atletas de diferentes disciplinas y niveles de rendimiento. Este capítulo, por tanto, sienta las bases para entender por qué la precisión y la fiabilidad de las tecnologías de medición del salto vertical resultan críticas para la aplicación práctica en el deporte y la rehabilitación.

2.1.1 Fundamentos Biomecánicos y Fisiológicos del Salto Vertical

El salto vertical se sustenta en la ley de la conservación de la energía y la dinámica de la interacción fuerza–tiempo con el suelo. Biomecánicamente, la altura de salto viene determinada por la velocidad de despegue del centro de masa al finalizar la fase de impulso, la cual a su vez depende del impulso neto —integral de la fuerza de reacción del suelo frente al tiempo de contacto— generado durante la contracción concéntrica (Linthorne, 2001).

Más allá de la capacidad pura de contracción muscular, la eficiencia del Ciclo de Estiramiento–Acortamiento (CEA) emerge como factor clave en la producción de fuerza explosiva. Según Paavo V. Komi & Komi (2000), el CEA aprovecha dos mecanismos principales: (1) el almacenamiento de energía elástica en los tendones durante la fase excéntrica y su liberación en la fase concéntrica; y (2) la facilitación refleja mediante los husos neuromusculares, que potencian la activación muscular (Bas Van Hooren et al., 2017). Esta sinergia aumenta la fuerza generada y acelera la capacidad de desarrollar tensión, dotando al salto vertical de su característica explosividad (Wolfgang Seiberl et al., 2021).

En la práctica, las variables más representativas del rendimiento en salto vertical son:

- **Fuerza máxima:** el pico de tensión que el sujeto puede generar.
- **Potencia:** el producto de fuerza por velocidad de contracción.
- **Tasa de desarrollo de la fuerza (RFD):** pendiente de la curva fuerza–tiempo durante los primeros milisegundos de contracción, indicador de la rapidez de reclutamiento neuromuscular.

A su vez, **variables temporales** como el **tiempo de vuelo** y el **tiempo de contacto** actúan como sustitutos indirectos para estimar la altura de salto y valorar la reactividad neuromuscular al suelo (Balsalobre-Fernández et al., 2014; McCurdy et al., 2010). Por ejemplo, una mayor relación vuelo/Contacto suele asociarse a una mejor utilización del CEA y una mayor potencia explosiva en deportes que demandan cambios rápidos de dirección y despegues reiterados.

En conjunto, esta fundamentación subraya que el salto vertical no solo mide un desplazamiento vertical, sino que refleja la integración de procesos mecano-eléctricos, elásticos y neuromusculares que son críticos para el rendimiento deportivo y la rehabilitación funcional.

2.1.2. Tipología y Características de los Saltos Verticales de Evaluación

Para descomponer y cuantificar con precisión los distintos componentes de la función neuromuscular, se emplean tres modalidades estandarizadas de salto vertical, cada una diseñada para resaltar mecanismos fisiológicos específicos:

1. Salto sin Contramovimiento (*Squat Jump, SJ*).

El SJ se inicia desde una postura estática de sentadilla (aproximadamente 90° de flexión de rodilla), sin fase excéntrica previa. Al eliminar el pre estiramiento muscular del Ciclo de Estiramiento–Acortamiento (CEA), esta prueba aísla la capacidad de generación de fuerza concéntrica pura de los extensores de rodilla y cadera (Domire & Challis, 2007; Hoffman et al., 2005). La altura alcanzada en el SJ se correlaciona estrechamente con la fuerza isométrica máxima de las extremidades inferiores, lo que lo convierte en un indicador fiable de la fuerza explosiva basal (Ştef & Grosu, 2021).

2. Salto con Contramovimiento (*Countermovement Jump, CMJ*).

Partiendo de posición erguida, el CMJ incorpora un ciclo de estiramiento previo: el atleta desciende rápidamente, almacenando energía elástica en los tendones, y sin interrupción invierte el movimiento hacia la fase concéntrica de propulsión. Este mecanismo realza la evaluación de la potencia reactiva y la eficiencia del CEA, siendo el estándar de facto en campo para medir la explosividad neuromuscular (Gathercole et al., 2015; McLellan et al., 2011). La comparación entre altura de CMJ y SJ permite calcular un índice de reutilización del CEA, que refleja la habilidad de transformar energía almacenada en fuerza propulsora.

3. Salto Abalakov (*CMJ con Balanceo de Brazos, CMJas*).

Mecánicamente semejante al CMJ, esta variante añade un balanceo explosivo de brazos durante el contramovimiento y la fase de impulso. El movimiento de miembros superiores amplifica el impulso total y optimiza el

desplazamiento del centro de masa, resultando en una mayor altura de salto (Goran Marković et al., 2007). Este gesto integral involucra toda la cadena cinética, ofreciendo una evaluación más completa de la potencia del cuerpo entero. Estudios recientes demuestran aumentos de hasta un 15 % en la altura del salto al incorporar el balanceo de brazos, subrayando su relevancia en el análisis de atletas de disciplinas dinámicas (František Vaverka et al., 2016; Vanegas et al., 2021).

Al combinar estas tres modalidades —*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*— se logra un diagnóstico diferencial exhaustivo de la potencia neuromuscular: desde la fuerza concéntrica aislada hasta la máxima expresión de la potencia reactiva y la coordinación intersegmentaria. Esta triada de pruebas constituye, por tanto, la base metodológica para comparar la validez y la fiabilidad de las tecnologías de medición evaluadas en esta tesis.

2.2 Evolución de las Tecnologías para la Medición del Salto Vertical: Del Laboratorio al Campo

La medición de la altura de salto vertical ha transitado de soluciones de laboratorio, sofisticadas pero de difícil acceso, a herramientas de campo cada vez más portátiles y asequibles. En sus orígenes, las plataformas de fuerza constituyeron el gold standard, proporcionando lecturas directas de la fuerza de reacción del suelo y permitiendo calcular con gran exactitud impulso e impulso neto (H. Hatze & Hatze, 1998). Sin embargo, su elevado coste y la necesidad de infraestructuras especializadas limitaron su uso al ámbito de la investigación y de centros de alto rendimiento.

Para superar estas barreras, surgieron las alfombrillas de contacto —incluyendo tanto las variantes electromecánicas como los sistemas por infrarrojos— capaces de estimar la altura de salto a partir del tiempo de contacto con el suelo, reduciendo drásticamente el tamaño y la complejidad de los equipos (Bjørn Johansen et al., 2025; Markovic et al., 2004; Villalon-Gasch et al., 2023). Aunque menos precisas que las plataformas de fuerza, estas soluciones ofrecieron una fiabilidad “buena” a “excelente” en contextos de campo (Balsalobre-Fernández et al., 2015).

Posteriormente, el advenimiento de los *smartphones* y de cámaras de alta velocidad dio pie a aplicaciones móviles de análisis manual de vídeo —por ejemplo, *My Jump Lab*— que utilizan el tiempo de vuelo para calcular la altura de salto con una exactitud comparable a la de las alfombrillas, abaratando aún más la tecnología y democratizando su uso (Gallardo-Fuentes et al., 2016; Gençoğlu et al., 2023).

La frontera más reciente incorpora Visión por Computadora e Inteligencia Artificial (VC+IA), donde algoritmos de detección de pose y aprendizaje profundo estiman el desplazamiento del centro de masa a partir de la secuencia de imágenes. Estas soluciones prometen un salto cualitativo en autonomía y velocidad de procesado, pero plantean nuevos retos de validación, al depender críticamente de la calidad de la grabación —resolución, *fps*, condiciones de iluminación— y de protocolos estandarizados de grabación (Balsalobre-Fernández, 2024; C. Balsalobre-Fernández et al., 2023; Tan et al., 2024).

En conjunto, este recorrido histórico subraya la tensión intrínseca entre precisión y portabilidad, y pone de manifiesto la urgencia de validar cada nuevo método frente al criterio de referencia en condiciones de uso reales.

2.2.1. El Criterio de Referencia: Plataforma de Fuerza

Las plataformas de fuerza constituyen el estándar de oro para la cuantificación del salto vertical debido a su capacidad para registrar, con frecuencias de muestreo superiores a 1.000 Hz, la fuerza de reacción del suelo (*Ground Reaction Force, GRF*) a lo largo del tiempo (Lake et al., 2018). A partir de estos datos se aplica el método de impulso-momento para derivar la altura alcanzada por el centro de masa.

En primer lugar, se integra el área bajo la curva de fuerza-tiempo, tras restar el peso corporal (masa \times g), para obtener el impulso neto (N·s) durante la fase de propulsión. Dividiendo dicho impulso por la masa del sujeto se calcula la velocidad de despegue (v_{to}). A partir de esta velocidad inicial, la altura (h) se determina mediante la ecuación cinemática de caída libre invertida:

$$h = \frac{v_{to}^2}{2g}$$

donde g representa la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) (Zhanxin Sha et al., 2021). Este procedimiento no solo proporciona una estimación precisa de la altura de salto, sino que también genera un conjunto de métricas cinéticas de gran riqueza —tales como la tasa de desarrollo de fuerza (*RFD*), los picos de fuerza y los perfiles de impulso— que sirven de referencia insustituible para validar y calibrar tecnologías de campo emergentes (Donahue et al., 2021).

2.2.2 Primeras Alternativas de Campo: Sistemas Ópticos y Alfombrillas de Contacto

Como respuesta al alto costo y la inmovilidad de las plataformas de fuerza, surgieron las primeras tecnologías de campo, como las alfombrillas de contacto y los sistemas de fotocélulas infrarrojas (e.g., *Optojump*, *MuscleLab IR-Mat*). El principio de funcionamiento de estos dispositivos es fundamentalmente diferente y más simple: miden directamente una única variable, el **tiempo de vuelo** (Bjørn Johansen et al., 2025; Julia F. Glatthorn et al., 2011; Sergej M. Ostojić et al., 2010; Villalon-Gasch et al., 2023). Estos sistemas registran el instante en que los pies del atleta pierden contacto con la superficie y el instante en que vuelven a hacer contacto. Asumiendo que el desplazamiento vertical del centro de masa es el de un proyectil bajo la influencia de la gravedad, la altura del salto (h) se deriva mediante la fórmula cinemática (Bosco et al., 1983):

$$h = g \cdot t_{\text{vuelo}}^2 / 8$$

A pesar de su simplicidad —al limitarse a una única variable— estos sistemas han demostrado una validez y fiabilidad sorprendentemente elevadas en contextos de campo (Marie Hilmersson et al., 2015). Asimismo, su bajo coste, facilidad de uso y rápida obtención de resultados los convirtieron en la primera opción práctica para equipos y laboratorios con recursos limitados, sentando las bases para posteriores evoluciones tecnológicas.

2.2.3. La Revolución Móvil: Aplicaciones Basadas en Análisis de Vídeo.

La era de los teléfonos inteligentes trajo consigo la siguiente etapa evolutiva. Aplicaciones como *My Jump Lab* aprovecharon las cámaras capaces de grabar vídeo a alta velocidad (e.g., 240 *fps*) para replicar, de manera costo-efectiva, el método del tiempo de vuelo. En su modalidad manual, el usuario identifica visualmente los fotogramas exactos de despegue y aterrizaje. La aplicación cuenta el número de fotogramas transcurridos y, conociendo la frecuencia de grabación, calcula el tiempo de vuelo con alta precisión. Posteriormente, aplica la misma fórmula cinemática:

$$h = g \cdot t_{\text{vuelo}}^2 / 8$$

para estimar la altura del salto (Balsalobre-Fernández et al., 2015). Numerosos estudios han validado este enfoque, demostrando que, cuando se utiliza correctamente, ofrece una excelente concordancia con las plataformas de fuerza y sistemas ópticos, democratizando así la evaluación del rendimiento neuromuscular (Haynes et al., 2019; Montalvo et al., 2021; Stanton et al., 2017; Yingling et al., 2018).

2.3 La Nueva Frontera: Inteligencia Artificial en la Biomecánica Deportiva

La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y técnicas avanzadas de visión por computadora (VC) en la evaluación del salto vertical constituye un verdadero cambio de paradigma: deja de depender exclusivamente de la deducción de la altura a partir de un único parámetro temporal (tiempo de vuelo) y abraza el análisis directo del desplazamiento corporal en cada fotograma. Estos sistemas emplean modelos de aprendizaje profundo para detectar y seguir automáticamente puntos clave anatómicos (por ejemplo, articulaciones de cadera, rodilla y tobillo), construir estimaciones continuas de la posición del centro de masa y derivar la trayectoria vertical completa del salto (C. Balsalobre-Fernández et al., 2023).

A diferencia de las aplicaciones manuales, que requieren la intervención del usuario para marcar el inicio y el fin del vuelo, las soluciones de VC+IA automatizan todo el proceso: desde la segmentación inicial del sujeto en la imagen hasta la reconstrucción del modelo cinemático en 3D, según protocolos entrenados con miles de patrones de movimiento. Esta automatización promete reducir el sesgo humano y ampliar las posibilidades de análisis —por ejemplo, permitiendo la extracción de variables adicionales como ángulos articulares, velocidades de segmentos o asimetrías bilaterales— sin necesidad de equipos de laboratorio costosos y laboriosos procesos de digitalización (John F. Dražan et al., 2021; Ke Song et al., 2023; M. Boldo et al., 2024).

No obstante, esta revolución conlleva nuevos desafíos de validación. La precisión de los algoritmos de *pose estimation* depende críticamente de la calidad de las imágenes (iluminación, resolución, ángulo de cámara) y de la robustez del modelo frente a variaciones en vestimenta, equipamiento (p. ej., uso de calzado) y ruido de fondo. Del mismo modo, el protocolo de captura —frecuencia de fotogramas, distancia focal y posición relativa de la cámara— puede influir marcadamente en la estabilidad del seguimiento del centro de masa y en la estimación de la altura máxima (Robert M. Kanko et al., 2021). En consecuencia, resulta imprescindible someter estas nuevas herramientas a un riguroso examen de fiabilidad y validez concurrente frente al gold standard (plataforma de fuerza), así como evaluar su comportamiento bajo distintos tipos de salto, cohortes de

rendimiento y condiciones de uso real. Solo de este modo podrá determinarse su idoneidad para la monitorización continua del rendimiento y la prevención de lesiones en entornos deportivos y clínicos.

2.3.1. Principios de la Visión por Computadora para la Estimación del Movimiento

La visión por computadora (VC), rama especializada de la inteligencia artificial, faculta a los sistemas para “comprender” de manera autónoma contenidos visuales —imágenes y secuencias de vídeo— mediante técnicas de aprendizaje profundo. En el ámbito de la evaluación del salto vertical, algoritmos de “*human pose estimation and tracking*” se entrenan con vastos conjuntos de datos anotados para reconocer con gran precisión los contornos y articulaciones clave del sujeto en cada fotograma (Szegedy, Christian et al., 2014).

Inicialmente, el modelo detecta la silueta íntegra del atleta y la ajusta a un *bounding box* (cuadro delimitador). A continuación, aplica redes neuronales convolucionales para identificar puntos de interés anatómicos—cadera, rodilla, tobillo y hombro—y rastrear su posición a lo largo de la secuencia. La estimación de la altura del salto ya no reposa en el tiempo de vuelo, sino en el desplazamiento vertical máximo de un punto de referencia dentro del *bounding box* (por ejemplo, su centroide) entre la posición de partida y el pico de elevación.

Para convertir esta magnitud, originalmente en píxeles, a unidades métricas, se utiliza un factor de escala personalizado: el sistema calibra previamente la altura real del atleta (sin calzado) con la dimensión del *bounding box* en posición estática, de modo que cada píxel corresponde a un valor conocido en centímetros (Balsalobre-Fernández, 2024; C. Balsalobre-Fernández et al., 2023). Gracias a este procedimiento, los algoritmos pueden calcular de forma continua la trayectoria del centro de masa, generar curvas de desplazamiento y extraer variables cinemáticas adicionales—como velocidades angulares y aceleraciones segmentarias—sin intervención manual.

No obstante, la robustez de la estimación depende críticamente de la calidad de la imagen (resolución, tasa de fotogramas, iluminación), de la orientación de la cámara y de la generalización del modelo ante variaciones en indumentaria o fondo. Estos factores se convierten en fuentes potenciales de error que deben cuantificarse para validar su equivalencia con métodos tradicionales.

2.3.2. Discrepancias Fundamentales en la Medición: Tiempo de Vuelo vs. Desplazamiento del Centro de Masa

La incursión de sistemas basados en IA revela un desfase metodológico de fondo que constituye la piedra angular de esta investigación. En esencia, las tecnologías de campo convencionales (alfombrillas de contacto, fotocélulas infrarrojas y aplicaciones de vídeo manual) cuantifican la altura del salto a partir del tiempo de vuelo, mientras que la plataforma de fuerza emplea el impulso-momento, y las soluciones de computer vision intentan estimar directamente el desplazamiento del centro de masa.

1. Método de Tiempo de Vuelo

Fundamental para alfombrillas, fotocélulas y apps manuales, este enfoque asume que el centro de masa parte y retorna a la misma altura vertical, de modo que:

$$h = g \cdot t_{\text{vuelo}}^2 / 8$$

No obstante, la mecánica de aterrizaje introduce un sesgo sistemático: si el sujeto flexiona rodillas y caderas al caer, el tiempo de vuelo se reduce artificialmente y la altura calculada subestima la elevación real alcanzada (James L. Nuzzo et al., 2011).

2. Método de Impulso-Momento

Utilizado por la plataforma de fuerza —el gold standard de la cinética—, este procedimiento integra la diferencia entre la fuerza de reacción del suelo y el peso corporal para calcular la velocidad de despegue (v_{to}), a partir de la cual se deriva la altura. Al no depender del aterrizaje, este método es inmune a las estrategias de flexión post-vuelo y captura con fidelidad el desplazamiento real del centro de masa (Zhanxin Sha et al., 2021).

3. Método de Desplazamiento por IA

Las modernas soluciones de VC+IA procuran reconstruir la trayectoria vertical del centro de masa (o proxies corporales, p. ej., cabeza, caderas) directamente desde secuencias de vídeo, aplicando algoritmos de “*pose estimation*” entrenados con redes neuronales profundas. Teóricamente, esta táctica supera la limitación del aterrizaje, pero su rendimiento está condicionado por la resolución y tasa de fotogramas, la calidad de la iluminación, la robustez frente a vestimenta y ruido, y la precisión de la calibración antropométrica (Nobuyasu Nakano et al., 2019; Szegedy, Christian et al., 2014).

Dado que cada paradigma —temporal, cinético y espacial— se asienta en supuestos y fuentes de error distintos, no puede presumirse la equivalencia de sus resultados sin una evaluación empírica detallada. Es precisamente esta falta de intercambiabilidad y la urgente necesidad de cuantificar sesgo y límites de acuerdo entre enfoques lo que justifica el presente estudio de validación rigurosa y su diseño estratificado por tipo de salto y cohorte de rendimiento.

2.4. Fundamentos de la Evaluación Instrumental en Ciencias del Deporte

Toda tecnología aplicada a la medición biomecánica debe evaluarse bajo dos principios esenciales: validez y fiabilidad. Aunque originados en la teoría de la medición en ciencias sociales, estos conceptos se adaptan plenamente a la cuantificación del movimiento humano, donde su correcta aplicación resulta determinante para garantizar la interpretación fidedigna de los datos obtenidos.

Validez se refiere al grado en que un instrumento realmente mide lo que pretende medir. En el contexto del salto vertical, implica demostrar que la altura registrada por un sistema alternativo (p. ej., VC+IA o plataformas de infrarrojos) se corresponde con la verdadera elevación del centro de masa, tal como lo define el gold standard de la plataforma de fuerza. La validez concurrente—evaluada mediante coeficientes de correlación intraclase (CCI) y análisis de Bland–Altman—es la métrica clave para establecer cuán próxima está cada medición al criterio de referencia (Leslie G. Portney & Mary P. Watkins, 2015).

Fiabilidad, por su parte, alude a la consistencia y estabilidad de las mediciones bajo condiciones repetidas. Se descompone en:

- **Fiabilidad intra-sesión**, que valora la variabilidad de múltiples intentos consecutivos en una misma sesión.
- **Test-retest** (fiabilidad inter-sesión), que examina la reproducibilidad de las mediciones en sesiones separadas temporalmente.

La fiabilidad relativa se cuantifica con el CCI (modelos 2.1 y 3.1), mientras que la fiabilidad absoluta utiliza el Coeficiente de Variación (CV) y el Error Estándar de la Medida (EEM). Un sistema robusto debe exhibir CCI elevados (> 0.75) y CV bajos ($< 10\%$) para considerarse adecuado a nivel aplicado (Greg Atkinson et al., 1998).

El diseño de un estudio de validación y fiabilidad debe, por tanto, incluir:

1. **Selección de la muestra** (tamaño y heterogeneidad de cohortes).
2. **Estándares de referencia** claramente definidos (plataforma de fuerza).
3. **Procedimientos de medición estandarizados** (protocolo de salto, frecuencia de vídeo, calibración antropométrica).
4. **Análisis estadísticos apropiados**, que combinen métodos de correlación, análisis de sesgo y modelos de efecto mixto para intervalos de confianza.

Solo mediante la aplicación rigurosa y simultánea de estos fundamentos—validez y fiabilidad—podremos asegurar que las tecnologías emergentes, desde sistemas de visión por computadora hasta aplicaciones móviles, ofrezcan resultados válidos, reproducibles y, en última instancia, útiles para entrenadores, investigadores y clínicos en el ámbito deportivo.

2.4.1. Concepto y Tipos de Validez

La **validez** de un instrumento se define como el grado en que mide de manera fiel y exacta el atributo o constructo de interés, en este caso la verdadera altura del salto vertical (Denny Borsboom et al., 2004). A diferencia de la fiabilidad, que evalúa la consistencia de las medidas, la validez cuestiona su corrección: un dispositivo puede repetir sistemáticamente un error y, por tanto, ser fiable pero no ser válido.

En las pruebas instrumentales deportivas se distinguen varias dimensiones de validez, pero la que adquiere relevancia central al comparar una tecnología emergente con un estándar establecido es la **validez de criterio**. Esta se subdivide en:

- **Validez concurrente**, donde las mediciones del nuevo método y las del criterio de referencia (plataforma de fuerza) se realizan simultáneamente, permitiendo evaluar su grado de concordancia en tiempo real.
- **Validez predictiva**, que examina hasta qué punto las lecturas de un instrumento anticipan resultados futuros, menos aplicable en el contexto de medición directa de salto.

En esta tesis, la **validez concurrente** constituye el foco primario: las alturas registradas por cada sistema alternativo (análisis manual, infrarrojo, VC+IA) se cotejan directamente con las obtenidas por la plataforma de fuerza en la misma sesión y bajo las mismas condiciones experimentales. El coeficiente de correlación intraclase (CCI 2.1) y el análisis de Bland–Altman proporcionan métricas complementarias para cuantificar la fuerza de asociación y el sesgo sistemático, respectivamente (Heale & Twycross, 2015).

Al centrar el estudio en la validez de criterio concurrente, esta investigación garantiza que cualquier discrepancia detectada entre métodos no responda a variaciones temporales o de protocolo, sino a diferencias intrínsecas en el principio de medición de cada tecnología.

2.4.2. Concepto y Métricas de Fiabilidad

La **fiabilidad** de un instrumento se define como la capacidad de este para proporcionar medidas consistentes y reproducibles bajo condiciones similares (Nahid Golafshani & Golafshani, 2015; Tony Long et al., 2000; Vu Thi Thanh Nha, 2021). En otras palabras, la fiabilidad responde a la cuestión crítica: si repetimos la prueba en un mismo sujeto bajo idéntico protocolo, ¿obtendremos resultados muy semejantes? Un método carece de valor práctico si sus lecturas son erráticas, pues sólo sobre una base estable puede edificarse la validez de las conclusiones obtenidas.

En la evaluación deportiva del salto vertical, la fiabilidad se aborda en dos dimensiones complementarias:

1. **Fiabilidad Relativa**

Mide la capacidad del instrumento para mantener la posición relativa de los sujetos en una serie de mediciones repetidas. Se expresa mediante el **Coefficiente de Correlación Intraclase (CCI)**, que cuantifica la concordancia y consistencia de las lecturas, considerando tanto la variabilidad entre sujetos como la variabilidad residual de las mediciones (Patrick E. Shrout et al., 1979). Un CCI próximo a 1 indica que las diferencias observadas se deben casi exclusivamente a las diferencias reales entre los participantes, y no al error de medida.

2. **Fiabilidad Absoluta**

Evalúa la magnitud del error de medición en las mismas unidades del test, permitiendo estimar la variabilidad esperada al repetir la evaluación en un mismo sujeto. Las dos métricas clave son:

- **Coefficiente de Variación (CV%)**: razón de la desviación estándar sobre la media, multiplicada por 100, que contextualiza el error en relación con el tamaño de la medición.

- **Error Estándar de la Medida (EEM):** se calcula como $EEM = DE \times \sqrt{(1 - CCI)}$ donde DE es la desviación estándar de las mediciones; refleja la mínima diferencia que puede interpretarse como un cambio verdadero y no atribuible al azar.

Estos indicadores se aplican tanto a la **fiabilidad intra-sesión**—evaluando la repetibilidad de los tres intentos dentro de la misma sesión—como a la **fiabilidad inter-sesión** o test–retest—comparando las medias de las sesiones de Test y Retest separadas temporalmente. Sólo si un instrumento exhibe altos CCI (generalmente > 0.75) y bajos CV% ($< 10\%$) y EEM reducido, puede considerarse adecuado para monitorizar cambios significativos en el rendimiento de salto a lo largo del tiempo (Greg Atkinson et al., 1998).

2.5. Síntesis del Estado del Arte y Brecha en el Conocimiento

La evolución de las técnicas de medición del salto vertical ha transitado desde sistemas de laboratorio altamente precisos —pero de uso restringido— hacia dispositivos portátiles y aplicaciones móviles basadas en el tiempo de vuelo, cuyas propiedades de validez y fiabilidad han sido ampliamente demostradas (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Gallardo-Fuentes et al., 2016; Montalvo et al., 2021). Estos métodos constituyen hoy en día alternativas viables a las plataformas de fuerza en escenarios de campo, gracias a su bajo costo y facilidad de uso.

No obstante, la irrupción de soluciones que incorporan visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) introduce un cambio de paradigma metodológico: se abandona la deducción indirecta de la altura a partir de un parámetro temporal para abrazar la estimación directa del desplazamiento espacial del centro de masa (C. Balsalobre-Fernández et al., 2023). Esta innovación promete una nueva riqueza de variables cinemáticas y un reducido sesgo humano, pero simultáneamente genera una **brecha de conocimiento** crítica:

1. **Discrepancia conceptual entre principios de medición.** Los sistemas basados en tiempo de vuelo asumen igualdad de altura en despegue y aterrizaje, hipótesis que se ve comprometida por la variación en la flexión articular al contacto (Julia F. Glatthorn et al., 2011). En contraste, la plataforma de fuerza mide impulso cinético (Zhanxin Sha et al., 2021) y los algoritmos de VC+IA rastrean directamente la trayectoria corporal fotogramétrica, un enfoque cuya precisión depende de la calidad de captación de imagen y de la robustez del modelo de “*pose estimation*” (Robert M. Kanko et al., 2021).
2. **Vacío en la validación de VC+IA.** Pese a su creciente adopción, existen escasos estudios que cuantifiquen su **fiabilidad test–retest** y su **validez concurrente** frente al *gold standard* en poblaciones heterogéneas de atletas (Balsalobre-Fernández, 2024; Ke Song et al., 2023; Tan et al., 2024). Particularmente, no se ha explorado sistemáticamente su rendimiento en variantes de salto más complejas, como el *Abalakov*, donde el balanceo de

brazos y la dinámica del centro de masa plantean desafíos únicos.

3. **Necesidad de evaluaciones estratificadas.** Los primeros trabajos sobre VC+IA han reportado resultados prometedores en muestras recreativas, pero la influencia del nivel de rendimiento —y, por ende, de la técnica de salto— en la fiabilidad y el sesgo de estas mediciones no ha sido suficientemente caracterizada.

En virtud de lo anterior, surge la justificación de la presente tesis: realizar un estudio de validación **multidimensional**, que no solo compare las métricas de VC+IA y de tiempo de vuelo con la plataforma de fuerza, sino que además cuantifique su **intercambiabilidad** y **sesgo** en cada modalidad de salto (*SJ*, *CMJ*, *Abalakov*) y en cohortes de distinto nivel deportivo. Solo a través de este enfoque riguroso podrá determinarse con solidez científica si las nuevas tecnologías de visión por computadora constituyen herramientas confiables para la práctica cotidiana de entrenadores, clínicos e investigadores.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Este capítulo expone de manera exhaustiva el diseño metodológico aplicado para alcanzar los objetivos de esta tesis. En primer lugar, se describe la tipología del estudio y el proceso de selección de la muestra, incluyendo criterios de inclusión y exclusión. A continuación, se detallan los instrumentos de medición empleados —plataforma de fuerza; sistemas de tiempo de vuelo (doble observación manual por dos evaluadores independientes, A y B, y alfombrilla infrarroja)— y la aplicación VC+IA, junto con sus características técnicas y protocolos de calibración. Seguidamente, se expone el procedimiento experimental: la organización de las sesiones de test y retest, el orden de ejecución de los saltos (*SJ*, *CMJ*, *Abalakov*), las condiciones de captura de vídeo (resolución, *fps*, posición de cámara) y el protocolo de filtrado de datos (gestión de outliers en el análisis IA). Finalmente, se describen con precisión las técnicas estadísticas implementadas en R —coeficientes de correlación intraclase, coeficiente de variación, EEM, regresiones y Bland–Altman—, así como los criterios de significancia y los procedimientos de estratificación por cohorte. Todos los pasos se presentan con el detalle necesario para garantizar la transparencia, la reproducibilidad y la validez interna de la investigación, minimizando el sesgo de interpretación mediante el uso de dos observadores en el análisis manual.

3.1 Diseño del Estudio

Este estudio se enmarca en un paradigma cuantitativo no experimental, de carácter instrumental y de medidas repetidas intra-sujeto. Se empleó un protocolo de validación con test–retest para evaluar la validez concurrente y la fiabilidad de cinco sistemas de medición del salto vertical: *My Jump Lab* (análisis manual realizado por dos observadores independientes y análisis automático por IA), alfombrilla infrarroja y plataforma de fuerza *ForceDecks* (criterio de referencia).

La comparación incluyó tres modalidades estandarizadas de salto —Salto sin Contramovimiento (*SJ*), Salto con Contramovimiento (*CMJ*) y Salto *Abalakov*—, analizadas tanto en conjunto como estratificadas por cohorte de rendimiento (no deportistas, basquetbolistas, futbolistas y voleibolistas). Se cuantificó la fiabilidad test–retest mediante coeficientes de correlación intraclase ((CCI 2.1) y 3.1), coeficiente de variación y error estándar de la medida; y la validez concurrente a través de (CCI 2.1), sesgo sistemático y límites de acuerdo (Bland–Altman) de cada método alternativo frente a la plataforma de fuerza.

El protocolo de recolección y análisis de datos fue aprobado por el Comité de Bioética e Investigación de la Facultad de Organización Deportiva de la Universidad Autónoma de Nuevo León (registro **REPRINT-FOD-151**) y se ajustó a los principios de la Declaración de Helsinki para la investigación en seres humanos.

3.2. Variables del Estudio

Para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación, se definieron y operacionalizaron las siguientes variables:

- **Variable Dependiente**

1. **Altura del salto vertical (cm):** Representa la máxima elevación vertical del centro de masa del participante durante la fase de vuelo de cada salto. Se estimó a partir de cinco sistemas de medición distintos y se comparó con la plataforma de fuerza como criterio de referencia.

- **Variables Independientes (Factores de Estudio)**

1. **Tecnología de medición:** Categórica, con cinco modalidades:

- Plataforma de Fuerza (*ForceDecks; gold standard*)
- Análisis Manual A (*My Jump Lab, observador 1*)
- Análisis Manual B (*My Jump Lab, observador 2*)
- Análisis con IA (*My Jump Lab, algoritmo automatizado*)
- Alfombrilla de Infrarrojos (*IR-Mat*)

2. **Tipo de salto:** Categórica, con tres modalidades estandarizadas:

- *SJ* (*Squat Jump* o salto sin contramovimiento)
- *CMJ* (*Countermovement Jump* o salto con contramovimiento)
- *Abalakov* (*CMJ* con balanceo de brazos)

3. **Nivel de rendimiento (cohorte):** Categórica, para evaluar el efecto del perfil deportivo sobre la precisión de las mediciones:

- Recreacional (no deportistas)
- Basquetbolistas
- Futbolistas
- Voleibolistas

Cada variable independiente se analizó tanto de forma global (muestra completa) como estratificada, con el fin de explorar interacciones entre tecnología, tipo de salto y nivel de rendimiento en los indicadores de validez y fiabilidad.

3.3. Participantes

Ochenta varones universitarios ($N = 80$; edad: 20.7 ± 1.7 años; estatura: 1.77 ± 0.07 m; masa corporal: 75.9 ± 11.7 kg; IMC: 24.1 ± 4.0 kg/m²) fueron reclutados mediante muestreo por conveniencia en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Con el fin de explorar el impacto del nivel de práctica deportiva sobre la validez y fiabilidad de los sistemas de medición, los sujetos se dividieron en cuatro cohortes homogéneas de 20 participantes cada una:

1. **Recreacionalmente activos:** Estudiantes que realizan actividad física no competitiva de forma regular (3–4 sesiones semanales), sin historia de entrenamiento organizado.
2. **Basquetbolistas universitarios:** Miembros de un equipo de baloncesto a nivel facultad, con un régimen de tres entrenamientos semanales y participación en un torneo interno semanal.
3. **Futbolistas universitarios:** Integrantes del equipo representativo de la universidad, sometidos a cinco entrenamientos semanales y competiciones en la liga universitaria nacional.
4. **Voleibolistas de élite:** Atletas afiliados a la Selección Nacional de México, con un programa de 5–6 sesiones de entrenamiento semanal y presencia en eventos internacionales.

Solo se incluyeron varones para garantizar la coherencia de los calendarios deportivos y la disponibilidad de los equipos en el intervalo de test–retest (7–10 días). Todos los participantes estaban exentos de cualquier patología neuromuscular o musculoesquelética que pudiera comprometer su seguridad o alterar la calidad de los datos. Previamente al estudio, cada voluntario firmó un consentimiento informado, en conformidad con la Declaración de Helsinki y la aprobación del Comité de Bioética e Investigación (registro REPRINT-FOD-151).

3.4 Instrumentos y Mediciones

3.4.1 Mediciones Antropométricas

Antes de las pruebas de salto, se obtuvieron medidas antropométricas con el fin de calibrar con exactitud los distintos sistemas de evaluación y garantizar la comparabilidad entre métodos. Todas las mediciones fueron realizadas por un único evaluador certificado, siguiendo protocolos estandarizados, y duplicadas para verificar la fiabilidad intra-observador, promediando los valores finales.

- **Estatura:** Registrada sin calzado, en posición erecta y con talones, glúteos y región escapular en contacto con la columna del estadiómetro Seca® 206 (CE0123, Hamburgo, Alemania). La lectura se tomó al máximo punto de inspiración y se expresó en centímetros (cm).
- **Longitud de pierna:** Determinada midiendo la distancia lineal desde el borde superior del trocánter mayor hasta la punta del pie, con el sujeto en decúbito supino y la cadera y rodilla en extensión completa.
- **Altura en sentadilla (90°):** Obtenida en posición de sentadilla hasta exactamente 90° de flexión de rodilla, midiendo la vertical desde el trocánter mayor hasta la superficie de apoyo, lo cual permitió calibrar la posición inicial del Salto sin Contramovimiento (SJ).
- **Palanca (*leverage*):** Definida como la distancia vertical entre la cabeza y la rodilla con el sujeto en posición de rodillas, con la parte superior del cuerpo erguida. Este parámetro se empleó para ajustar el factor de escala de la aplicación My Jump Lab en sus estimaciones de torque y trayectoria corporal.

Todas las longitudes se midieron con una cinta métrica flexible Hoehchstmass® Hobby 3 m (Alemania), con una resolución de 1 mm, y se registraron por duplicado, manteniendo la desviación entre mediciones por debajo de 5 mm.

3.4.2. Sistemas de Medición del Salto

1. Plataforma de Fuerza (*ForceDecks*)

Para registrar de forma directa las fuerzas de reacción del suelo (*GRF*) durante el salto vertical, se empleó un sistema de doble plataforma de fuerza portátil *ForceDecks* FD4000 (Vald Performance, Brisbane, Australia), que muestrea a 1000 Hz mediante sensores piezoeléctricos integrados. Los datos se transmitieron vía *Bluetooth* 4.2 a un iPad Pro (*app ForceDecks* v 1.8.4).

La altura del salto se calculó con el **método de impulso–momento**, que consta de dos pasos:

1. **Cálculo de la velocidad de despegue** (v_{to}) integrando el impulso neto (fuerza registrada menos el peso corporal) sobre la masa del sujeto (m) durante la fase de propulsión, es decir:

$$v_{to} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (F_v(t) - BW) dt}{m}$$

donde $F(t)$ es la fuerza de reacción del suelo en el tiempo t , BW el peso corporal y los tiempos t_1 – t_2 delimitan la fase en que el sujeto empuja contra la plataforma.

2. **Determinación de la altura máxima** (h), a partir de la velocidad de despegue y la constante gravitatoria ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$), mediante la ecuación cinemática:

$$h = \frac{v_{to}^2}{2g}$$

(convertido a centímetros).

Este procedimiento, reconocido como gold standard en biomecánica del salto, es insensible a variaciones en la estrategia de aterrizaje y proporciona la medida más fidedigna del desplazamiento real del centro de masa.

2. Análisis Manual de Vídeo en Cámara Lenta (*App My Jump Lab*)

Para las mediciones basadas en tiempo de vuelo, se empleó la aplicación *My Jump Lab* (v. 4.5.9) instalada en dos teléfonos inteligentes distintos, con el fin de estimar el error de interpretación humana. Las grabaciones se realizaron en cámara lenta a 240 *fps* y resolución 1080*p* usando un iPhone 14 Pro (Análisis Manual A) y un iPhone 13 (Análisis Manual B). Ambos dispositivos se fijaron sobre trípodes situados a 3 m de distancia de la línea de salto y a 33 cm de altura respecto al plano del suelo, garantizando ángulos de visión comparables.

Dos observadores entrenados e independientes identificaron manualmente en cada vídeo los fotogramas correspondientes al despegue (último en que ambos pies estaban en contacto) y al aterrizaje (primer contacto tras el vuelo). A partir del número de fotogramas transcurridos (Δf) y la frecuencia de muestreo ($f_s=240$ *fps*), la aplicación calculó el tiempo de vuelo (t) según:

$$t = \frac{\Delta f}{f_s}$$

Posteriormente, se estimó la altura del salto (h , en cm) mediante la fórmula cinemática estándar para un proyectil bajo aceleración constante:

$$h = \frac{gt^2}{8} \times 100$$

donde $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$

La doble observación permitió cuantificar la **fiabilidad interobservador**, mientras que la comparación con los demás métodos sirvió para evaluar la **validez concurrente** de esta modalidad basada en tiempo de vuelo.

3. Análisis Automatizado con IA (*My Jump Lab IA*)

Paralelamente, se empleó la función de análisis automatizado por inteligencia artificial (IA) integrada en la aplicación My Jump Lab. El vídeo para este análisis se grabó utilizando la aplicación de cámara nativa del dispositivo a 30 fotogramas por segundo (*fps*) y se procesó directamente con el módulo de detección y estimación de salto de la aplicación.

El modo de IA calcula la altura del salto mediante un proceso de dos pasos. Primero, determina el desplazamiento vertical en píxeles (*px*) basándose en los cambios en la coordenada "y" de un cuadro delimitador (*bounding box*) que detecta y encierra la silueta del participante durante el movimiento. A continuación, este desplazamiento en píxeles se convierte a metros (*m*) aplicando un factor de escala que se deriva de la estatura conocida del participante y la altura en píxeles de su *bounding box* en un fotograma de referencia (Balsalobre-Fernández, 2024). Este proceso se rige por los siguientes principios matemáticos:

$$AlturaSalto(m) = AlturaSalto(px) \times factor$$

donde el factor de conversión se calcula como:

$$factor = \frac{AlturaSalto(px)}{Estatura(m)}$$

Este método, fundamentado en el desplazamiento espacial y la escala antropométrica, representa un enfoque de cuantificación fundamentalmente distinto al de los métodos manuales y de infrarrojos, que se basan en el tiempo de vuelo.

4. Sistema de Alfombrilla de Contacto por Infrarrojos (*MuscleLab*)

Para complementar las mediciones anteriores, se empleó una alfombrilla de contacto por infrarrojos (*MuscleLab* 4010, Ergotest Innovation, Langesund, Noruega) que registra el tiempo de vuelo (TV) con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz. Este dispositivo consta de un emisor y un receptor infrarrojo montados a 6.5 cm de altura, alineados con la superficie de la plataforma de fuerza para garantizar la adquisición simultánea y sincrónica de datos (Figura Suplemental 1).

El cálculo de la altura del salto (h , en metros) se basa en la fórmula cinemática estándar para caída libre, idéntica a la utilizada en las aplicaciones de vídeo manual y en los sistemas de fotocélulas:

$$h = \frac{gTV^2}{8}$$

donde:

- TV es el tiempo de vuelo (en segundos) medido por los sensores infrarrojos;
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

El software propietario de *MuscleLab* procesa automáticamente la señal de interrupción del haz infrarrojo para determinar con precisión los instantes de despegue y aterrizaje, calcula TV, y aplica la ecuación anterior para generar la altura del salto en centímetros. Este método, aunque simplificado—puesto que asume simetría en la posición del centro de masa al despegue y al aterrizaje—ha demostrado excelente fiabilidad y validez concurrente frente a plataformas de fuerza en múltiples estudios de campo (Julia F. Glatthorn et al., 2011; Sergej M. Ostojic et al., 2010)

3.5. Procedimiento Experimental

Los participantes completaron **dos sesiones de evaluación** (Test y Retest), separadas por **7–10 días** y programadas a la misma hora para controlar posibles fluctuaciones circadianas. Se les solicitó mantener idéntica vestimenta y calzado, abstenerse de ejercicio intenso en las 48h previas y conservar sus hábitos habituales de sueño y alimentación, de modo que las diferencias entre sesiones reflejaran únicamente la variabilidad de los instrumentos y no factores externos.

Cada sesión siguió este protocolo estandarizado (véase Figura 1A y 1B):

1. Calentamiento guiado (10 min):

- **Movilidad dinámica y estiramientos activos** (5 min), orientados a todo el cuerpo.
- **Ejercicios preparatorios**: estocadas alternadas, balanceos de cadera y sentadillas con peso corporal (2 min) para activar la musculatura implicada en el salto.
- **Salto submáximos progresivos** (3 min), iniciando con baja intensidad y aumentando gradualmente, para optimizar la activación neuromuscular sin fatigar.

2. Bloque de saltos máximos (≈ 30 min):

- **Tres intentos al fallo** de cada modalidad de salto (*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*), con **2 min de descanso** entre saltos para garantizar la recuperación neuromuscular.
- El **orden de las pruebas** se rotó aleatoriamente entre sujetos para eliminar sesgos de orden y fatiga secuencial.

- Se impartieron **instrucciones verbales estandarizadas** y se supervisó que la técnica fuera la prescrita:
 - *SJ*: manos en caderas, posición estática en 90° de flexión de rodilla, sin contramovimiento.
 - *CMJ*: manos en caderas, contramovimiento rápido desde posición erguida.
 - *Abalakov*: idéntico al CMJ, pero permitiendo balanceo de brazos libre para maximizar el impulso.

3. Recolección sincrónica de datos:

- Cada salto fue registrado **simultáneamente** por los cinco sistemas de medición:
 - Plataforma de fuerza (*ForceDecks*).
 - Alfombrilla de contacto por infrarrojos (*MuscleLab*).
 - Dos análisis manuales independientes en *My Jump Lab* (iPhone 14 Pro e iPhone 13 a 240 fps).
 - Análisis automatizado por IA en *My Jump Lab* (30 fps).
- Para **sincronizar temporalmente** todos los dispositivos, se generó un pulso de inicio común (un ligero golpe visible en vídeo) que sirvió de marca de tiempo en cada fuente de datos.

Todos los procedimientos fueron supervisados por dos investigadores entrenados, quienes verificaron la correcta ejecución de cada salto.

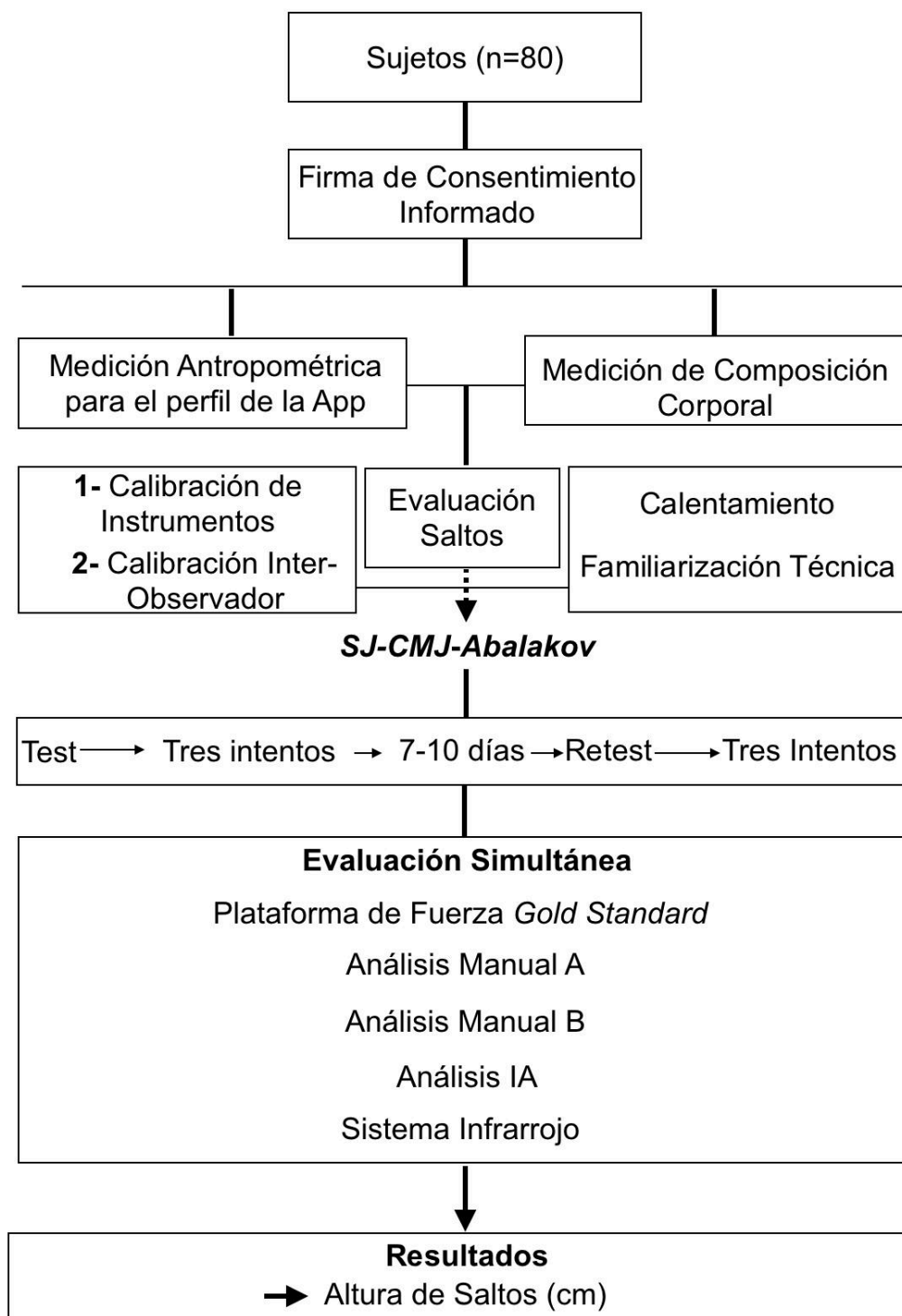


Figura 1A. Protocolo de intervención consentimiento, mediciones antropométricas, calibración de instrumentos, tres saltos (*SJ*, *CMJ*, *Abalakov*) en test–retest con cinco sistemas simultáneos.

Posicionamiento de herramientas

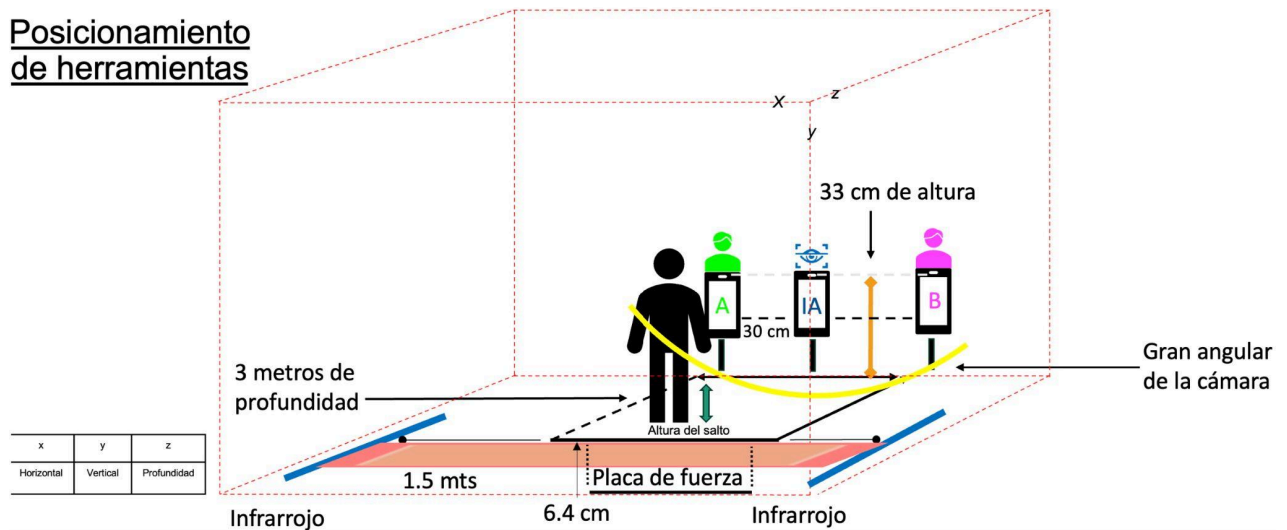


Figura 1B. Configuración experimental de los instrumentos para la evaluación concurrente del salto vertical. En el centro se sitúa un sistema de doble plataforma de fuerza portátil (*ForceDecks* FD4000, Vald Performance) conectado vía *Bluetooth* a un dispositivo iOS, flanqueado por dos alfombrillas de contacto por infrarrojos (*MuscleLab IR-Mat*) separadas 6.4 cm y alineadas con la superficie de la plataforma. A 1.5 m en profundidad y 3 m de distancia lateral se disponen tres cámaras móviles montadas en trípodes a 33 cm de altura: Análisis Manual A (iPhone 14 Pro, 240 fps; verde), módulo de IA (iPad Pro, 30 fps; azul) y Análisis Manual B (iPhone 13, 240 fps; magenta). El sistema de referencia tridimensional define los ejes X (horizontal), Y (vertical) y Z (profundidad). Esta disposición garantiza la adquisición sincronizada de señales cinéticas (fuerza-tiempo), temporales (tiempo de vuelo) y espaciales (desplazamiento del centro de masa), bajo condiciones estandarizadas de iluminación y ángulo de captura, facilitando la comparación directa de validez y fiabilidad entre tecnologías.

3.6. Análisis Estadístico

Los datos de altura de salto (cm) obtenidos de las cinco tecnologías de medición plataforma de fuerza, análisis manual A y B, aplicación con IA y sistema infrarrojo se volcaron inicialmente en archivos CSV y se consolidaron en RStudio (v. 4.4.2; Posit Software) (Citing RStudio, 2024) mediante el paquete **tidyverse** (J. B. Engler, 2025). Tras una cuidadosa depuración (identificación y exclusión de valores atípicos o sesiones fallidas, tratados como datos faltantes), se calcularon dos niveles de promedios: el promedio de los tres saltos válidos de cada sesión (test y retest) para los análisis inter-sesión y validez, y los saltos individuales para la fiabilidad intra-sesión.

Previo a cualquier contraste, se verificó la normalidad de las diferencias mediante pruebas de *Shapiro–Wilk* y se inspeccionó la homogeneidad de varianzas con Levene, aunque la robustez de los métodos CCI y Bland–Altman mitiga la dependencia de supuestos estrictos. El umbral de significancia se fijó en $\alpha = 0.05$ y los resultados se expresan como media \pm desviación estándar, con intervalos de confianza al 95 % cuando procede.

Fiabilidad intra- y entre-sesiones. La fiabilidad relativa se evaluó con el Coeficiente de Correlación Intraclase (CCI) modelo de dos vías, consistencia, medida única ((CCI 2.1)), calculado con el paquete **irr**, tanto para los tres intentos de cada sesión (intra-sesión) como para la comparación de medias test vs. retest (inter-sesiones). La fiabilidad absoluta se cuantificó con el Coeficiente de Variación ($CV = DE/Media \cdot 100$) y el Error Estándar de la Medida ($EEM = DE \times \sqrt{1 - CCI}$). Estos análisis se realizaron sobre la muestra total y estratificados por cohorte (no deportistas, basquetbolistas, futbolistas, voleibolistas), de modo que se pudo valorar si el nivel de rendimiento influye en la repetibilidad de cada método.

Validez concurrente global. Para cada tipo de salto (*SJ*, *CMJ*, *Abalakov*), se contrastaron los promedios de cada sistema frente a la plataforma de fuerza. La validez relativa se midió con (CCI 2.1) (modelo de dos vías, consistencia), y la concordancia absoluta con gráficos de *Bland–Altman* generados mediante **blandr**, extrayendo el sesgo medio y los límites de acuerdo ($\pm 1.96 \cdot DE$ de las diferencias). Además, se examinó la presencia de sesgo proporcional mediante regresión lineal

de las diferencias contra las medias ($[\text{método alternativo} + \text{referencia}]/2$), evaluando la pendiente y su significancia.

Validez concurrente estratificada. Para profundizar en la interacción entre cohorte y tipo de salto, se repitieron los (CCI 2.1) y los gráficos de *Bland–Altman* dentro de cada combinación de grupo deportivo y modalidad de salto. Este enfoque permitió visualizar y comparar la robustez de cada instrumento en función del nivel de destreza y de la complejidad biomecánica del salto, poniendo de manifiesto diferencias que no resultan evidentes en el análisis agregado.

Análisis exploratorio de la IA. Dado el hallazgo de un sesgo sistemático en los cálculos de altura por IA —motivando un ajuste antropométrico de +2.5 cm—, se realizó un análisis comparativo de (CCI 2.1) (consistencia) e CCI 3.1 (concordancia absoluta) antes y después del ajuste, estratificado por cohorte y tipo de salto. Se emplearon funciones personalizadas en *purrr* y *dplyr* para iterar sobre cada subgrupo y se generaron tablas resumen con *gt*, de manera que se cuantificara cómo la corrección impactaba en la fiabilidad intrínseca y en la proximidad absoluta de las mediciones de IA con respecto al *gold standard*.

Todos los códigos, las transformaciones de datos y las visualizaciones (diagramas de dispersión con ajuste de regresión, *Bland–Altman*, diagramas de puntos con CCI y sus IC) fueron implementados en R con *ggplot2*, *ggprism* y *ggpubr*, garantizando reproducibilidad y control total sobre el estilo gráfico.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Demográficos

La Tabla 1 presenta el perfil antropométrico de los 80 participantes (20 por cohorte: Baloncesto, Fútbol, No Deportista y Voleibol). Todos los grupos tienen una edad media muy similar (20–21 años), lo que asegura que cualquier diferencia en el rendimiento de salto no obedezca a variaciones de madurez. En cambio, hay claras adaptaciones morfológicas según la modalidad deportiva: los voleibolistas son los más altos ($1.87 \text{ m} \pm 0.11$) y poseen la palanca corporal más larga ($135.33 \text{ cm} \pm 7.44$), lo que facilita la generación de momento de fuerza; por el contrario, futbolistas y no deportistas miden alrededor de 1.71 m , con palancas corporales en torno a $127\text{--}128 \text{ cm}$.

La masa corporal y su composición también reflejan exigencias específicas. Los jugadores de vóleibol y baloncesto registran pesos elevados (82.35 kg y 79.72 kg , respectivamente) y la mayor masa muscular absoluta ($> 62 \text{ kg}$ en baloncesto), pero los voleibolistas presentan el porcentaje de grasa más bajo ($10.61 \% \pm 1.71$), optimizando su relación potencia–peso. Los futbolistas, con $64.78 \text{ kg} \pm 6.58$ y un $16.03 \% \pm 4.96$ de grasa, muestran un perfil más ligero y aeróbico. El grupo de no deportistas exhibe la mayor variabilidad en grasa corporal ($20.31 \% \pm 6.70$) y masa muscular ($53.96 \text{ kg} \pm 6.69$), indicando menor especialización física.

Finalmente, las medidas de hidratación ($58\text{--}61 \%$ de agua) y grasa visceral ($\sim 4\%$) son homogéneas y dentro de rangos saludables en todos los grupos. En conjunto, estos datos confirman que, aunque los sujetos comparten edad, difieren significativamente en estatura, palanca y composición corporal según su deporte. Cualquier comparación de la validez o fiabilidad de los dispositivos de medición debe tener en cuenta estas diferencias anatómicas para aislar el rendimiento del efecto de la tecnología.

Tabla 1. Características demográficas y antropométricas de los participantes.

Característica	Basquetbol N = 20¹	Fútbol N = 20¹	No Deportista N = 20¹	Voleibol N = 20¹	Total N = 80¹
Edad (años)	20.00 ± 1.52	20.15 ± 1.73	21.30 ± 2.03	21.20 ± 1.70	20.66 ± 1.82
Estatura (m)	1.79 ± 0.08	1.71 ± 0.06	1.71 ± 0.05	1.87 ± 0.11	1.77 ± 0.10
Masa Corporal (kg)	79.72 ± 9.88	64.78 ± 6.58	75.40 ± 16.61	82.35 ± 15.15	75.56 ± 14.18
IMC (kg/m²)	24.96 ± 3.49	22.28 ± 2.61	25.60 ± 6.25	23.49 ± 3.55	24.08 ± 4.32
Grasa Corporal (%)	19.11 ± 8.34	16.03 ± 4.96	20.31 ± 6.70	10.61 ± 1.71	16.51 ± 6.95
Grasa Corporal (kg)	16.60 ± 9.68	10.73 ± 3.80	15.44 ± 7.56	8.83 ± 2.56	12.90 ± 7.20
Masa Muscular (%)	76.98 ± 8.00	77.51 ± 12.77	75.68 ± 6.34	47.43 ± 8.21	69.40 ± 15.62
Masa Muscular (kg)	62.39 ± 5.59	51.70 ± 8.22	53.96 ± 6.69	38.84 ± 6.55	51.72 ± 10.82
Agua Corporal (%)	58.78 ± 6.43	60.60 ± 6.00	57.50 ± 6.82	61.38 ± 1.31	59.56 ± 5.70
Agua Corporal (kg)	47.51 ± 3.80	41.17 ± 6.43	41.09 ± 5.03	50.72 ± 8.39	45.12 ± 7.34
Grasa Visceral (%)	4.55 ± 4.19	2.25 ± 1.37	4.35 ± 3.75	5.00 ± 4.26	4.04 ± 3.68
Longitud de Pierna (cm)	109.10 ± 5.10	105.04 ± 6.61	109.15 ± 17.56	117.15 ± 6.67	110.11 ± 11.01
Altura a 90° (cm)	68.40 ± 9.57	70.89 ± 6.19	66.35 ± 4.88	76.25 ± 6.65	70.47 ± 7.84
Palanca (cm)	133.88 ± 4.90	127.17 ± 4.89	128.03 ± 4.39	135.33 ± 7.44	131.10 ± 6.50

¹ Media ± DE

4.1.2 Altura de Salto por Dispositivo y Cohorte

La Tabla 2 muestra que, para los tres métodos basados en tiempo de vuelo (plataforma de fuerza y los dos análisis manuales de vídeo), las alturas medias de salto son virtualmente idénticas en cada cohorte: por ejemplo, en baloncesto rondan los 37.5 cm con desviaciones estándar cercanas a 8 cm, mientras que los voleibolistas alcanzan alrededor de 45 cm con una dispersión semejante. Este estrecho solapamiento entre plataforma y análisis manual confirma que el método tradicional de vídeo reproduce fielmente el criterio cinético sin sesgos apreciables.

El sistema infrarrojo (*IR-Mat*) mantiene esa misma concordancia en la media diferencias inferiores a 1 cm respecto a la plataforma en basquetbol, fútbol y voleibol pero su variabilidad aumenta notablemente en el grupo de no deportistas (desviación estándar de 14 cm frente a 7.8 cm), lo que sugiere que la detección de contacto resulta más inestable cuando la técnica de salto es menos depurada.

Por su parte, la estimación por visión por computadora e IA exhibe un marcado sesgo positivo y una dispersión muy superior: sobrestima la altura en 5–6 cm en basquetbol, fútbol y no deportistas (y en unos 2 cm en voleibol) y multiplica por casi dos la desviación estándar de los métodos de tiempo de vuelo (12–15 cm vs. 7–8 cm). Estos resultados reflejan claramente las limitaciones del “*bounding box*” y la sensibilidad de la IA a parámetros del protocolo (inicio de captura, *fps*, resolución).

En conjunto, las diferencias por cohorte con los voleibolistas saltando sistemáticamente más alto que los demás validan la especialización deportiva como factor clave en la potencia de piernas, mientras que la consistencia de la plataforma, el análisis manual y, en menor medida, el Sistema Infrarrojo resalta su solidez frente a la gran variabilidad que aún exhibe el VC+IA. Estos hallazgos justifican los análisis de fiabilidad y validez que siguen, orientados a cuantificar hasta qué punto esas diferencias descriptivas se traducen en cambios en CCI, sesgo y límites de acuerdo.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de alturas de salto por dispositivo y cohorte

Dispositivo	Basquetbol N = 20	Fútbol N = 20	No Deportista N = 20	Voleibol N = 20	Total N = 80
Plataforma de Fuerza	37.6 ± 8.1	34.3 ± 6.2	33.5 ± 7.8	45.2 ± 8.0	37.6 ± 8.8
Análisis Manual A	37.5 ± 8.0	34.2 ± 6.1	33.4 ± 7.7	45.3 ± 8.0	37.6 ± 8.9
Análisis Manual B	37.2 ± 8.2	34.4 ± 6.1	33.1 ± 7.7	45.3 ± 7.9	37.5 ± 8.9
Análisis IA	43.3 ± 15.7	39.5 ± 13.0	39.9 ± 14.3	47.1 ± 12.0	42.5 ± 14.1
Sistema Infrarrojo	36.8 ± 8.1	33.4 ± 6.4	36.8 ± 14.0	44.9 ± 8.1	38.0 ± 10.5

4.2. Análisis de Distribución de los Saltos

La Figura 2A revela con claridad dos realidades bien diferenciadas. Por un lado, los tres métodos basados en tiempo de vuelo—la plataforma de fuerza y los dos análisis manuales de vídeo—generan distribuciones casi idénticas: medianas en torno a los 37–38 cm, rangos intercuartílicos ajustados y colas moderadas. Este solapamiento refuerza la intercambiabilidad de la medición manual con el gold standard y su capacidad para capturar de forma consistente la potencia de salto en toda la muestra.

El Sistema Infrarrojo, si bien mantiene una mediana central muy cercana a la plataforma (≈ 38 cm), muestra colas ligeramente más largas, lo que indica una menor precisión en los casos extremos—probablemente cuando la técnica de despegue o aterrizaje es menos uniforme.

En contraste, el método de visión por computadora e IA aparece como un claro outlier: su mediana se sitúa cerca de 45 cm, muy por encima de los otros dispositivos, y su rango intercuartílico es el doble de ancho. Además, las colas se extienden hacia valores extremos (por encima de 70 cm), evidenciando una variabilidad interna excesiva y un sesgo positivo sistemático.

En conjunto, este gráfico pone de manifiesto que las aproximaciones tradicionales al tiempo de vuelo ofrecen una distribución fiable y coherente, mientras que la estimación basada en VC+IA, sin ajustes, tiende a sobrevalorar la altura de salto y presenta una dispersión que compromete su uso inmediato en entornos de campo sin calibración previa.

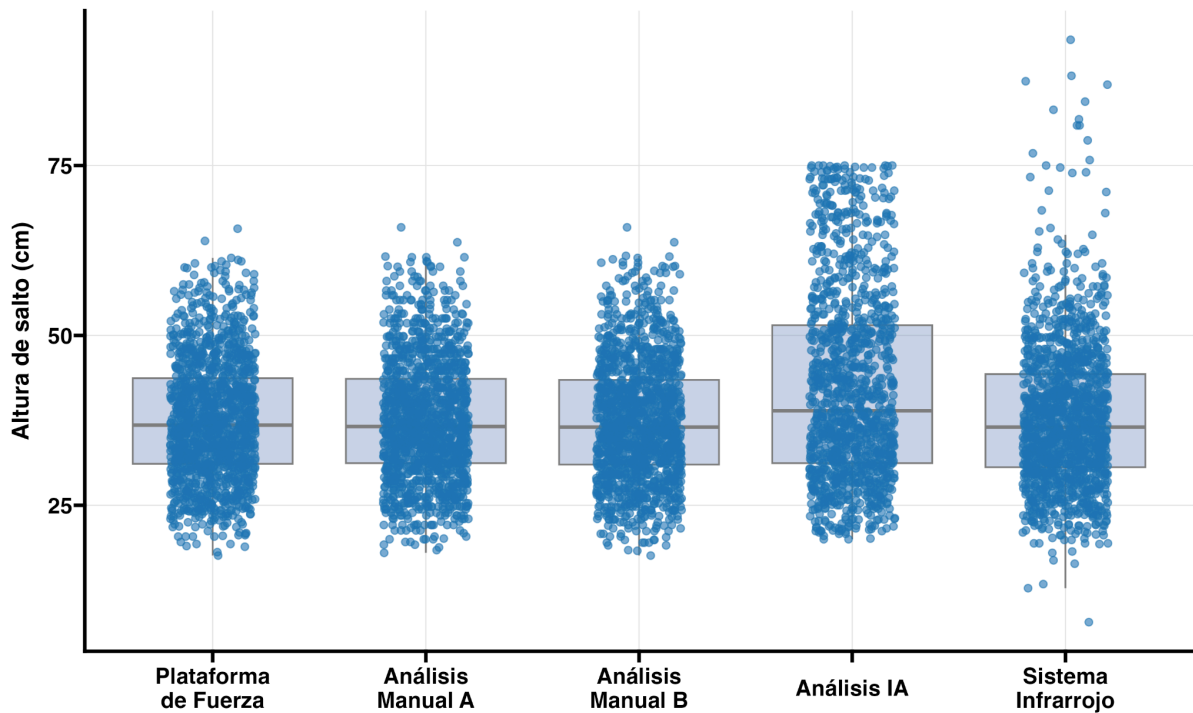


Figura 2A. Distribución global de las alturas de salto (mediana, IQR y puntos individuales) registradas por cada dispositivo en las 320 observaciones. La plataforma de fuerza y los análisis manuales A y B presentan medianas y rangos prácticamente superpuestos (~37–38 cm), mientras que el sistema infrarrojo muestra una mayor dispersión en los extremos. El método de visión por computadora e IA destaca por un sesgo positivo (mediana \approx 45 cm) y un rango intercuartílico ampliado, lo que evidencia sobrestimación sistemática y variabilidad interna elevada.

La Figura 2B pone de manifiesto que, independientemente de la cohorte, la plataforma de fuerza y los análisis manuales A y B mantienen una distribución muy parecida: medianas cercanas a los 32–35 cm en no deportistas y ascensos progresivos hasta los 45 cm en voleibolistas, con rangos intercuartílicos ajustados que reflejan una alta consistencia metodológica. En contraste, el sistema infrarrojo conserva la mediana de altura pero su dispersión se amplía de manera notable en el grupo de no deportistas, sugiriendo que la detección de los eventos de despegue y aterrizaje pierde precisión cuando la técnica de salto es menos depurada. Por último, el método de visión por computadora e IA sobrestima sistemáticamente la altura en cada cohorte (entre +4 cm y +8 cm) y exhibe rangos intercuartílicos significativamente más amplios, evidenciando tanto un sesgo positivo como una variabilidad interna elevada en todos los niveles de rendimiento.

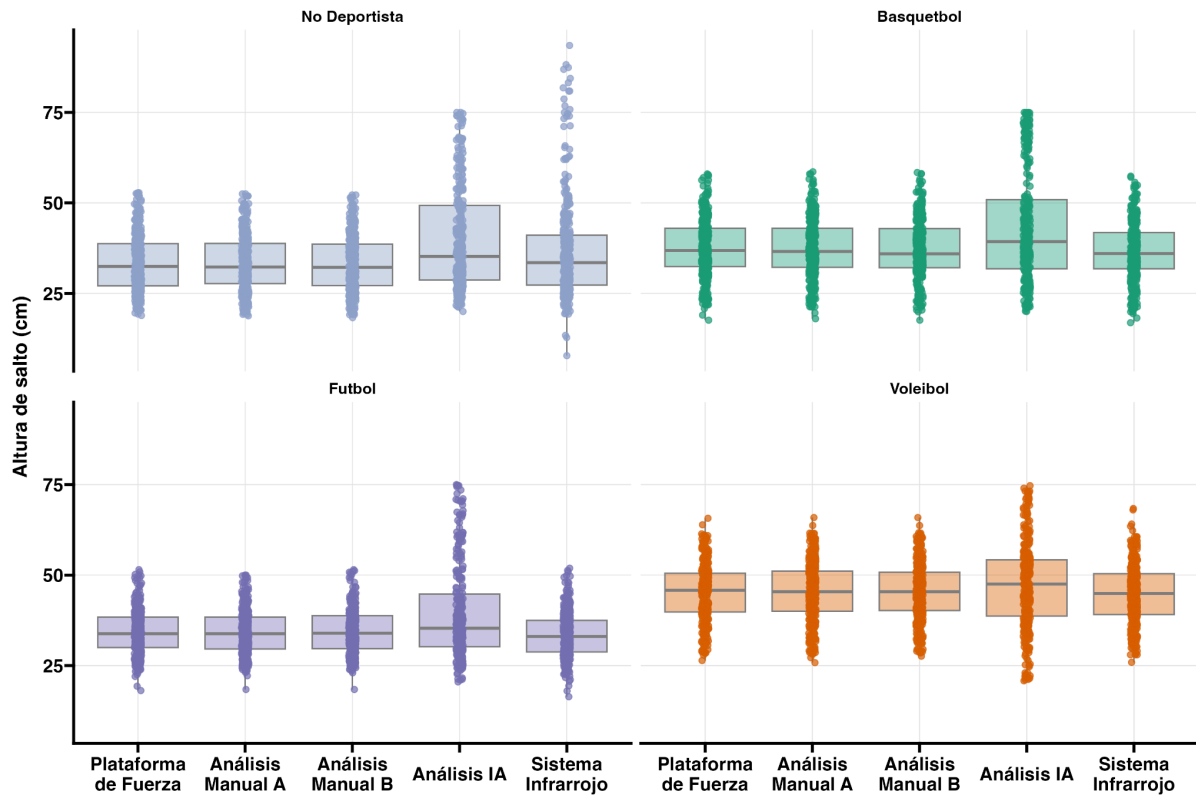


Figura 2B. Distribución de la altura de salto (boxplot y puntos individuales) según dispositivo, desglosada por cohorte (No Deportista, Baloncesto, Fútbol y Voleibol). La plataforma de fuerza y los análisis manuales A/B muestran medianas y rangos muy consistentes en cada grupo; el sistema infrarrojo coincide en el centro pero exhibe mayor dispersión en no deportistas; y el método VC+IA presenta un sesgo positivo sistemático y un rango intercuartílico ampliado en todas las cohortes.

4.3 Análisis de Fiabilidad Test-Retest

La Tabla 3 muestra que, en el salto sin contramovimiento (SJ), la plataforma de fuerza y ambos análisis manuales alcanzan coeficientes de correlación intraclase excelentes (CCI \approx 0.95–0.96) con intervalos de confianza muy ajustados (0.93–0.97). Su error estándar de medida es reducido (\sim 1.5 cm) y el coeficiente de variación se sitúa en torno al 21 %, lo que indica una estabilidad inter-sesión sobresaliente y una variabilidad residual mínima.

En contraste, la fiabilidad de la medición basada en visión por computadora e IA es claramente moderada: su CCI de 0.55 (IC 95 %: 0.34–0.71) revela que apenas la mitad de la variación total se debe a diferencias verdaderas entre sujetos, mientras que el resto responde a error intra-sujeto. El SEM para IA se eleva a 8 cm, aunque su CV (21.5 %) es similar al de los métodos de tiempo de vuelo, lo que sugiere que este error es proporcional al rango dinámico del salto.

Finalmente, el sistema infrarrojo presenta una fiabilidad insuficiente para SJ (CCI = 0.26; IC 95 %: 0.05–0.46), con un SEM de 6.4 cm y un CV de casi 30 %, evidenciando que sus mediciones no se repiten de forma consistente entre test y retest, especialmente en técnicas menos uniformes.

En conjunto, estos resultados confirman que, si el objetivo es cuantificar la consistencia test–retest del salto SJ, los métodos de tiempo de vuelo (plataforma e análisis manual) son claramente superiores, mientras que las tecnologías emergentes en particular el Sistema Infrarrojo y VC+IA requieren ajustes o protocolos más rigurosos antes de poder considerarse fiables para usos longitudinales.

Tabla 3. Fiabilidad Test-Retest: Salto sin Contramovimiento (SJ)

Dispositivo	CCI IC 95%	SEM (cm)	CV (%)
Plataforma de Fuerza	0.95 (0.93 – 0.97)	1.51	21.51
Análisis Manual A	0.95 (0.93 – 0.97)	1.52	21.33
Análisis Manual B	0.96 (0.93 – 0.97)	1.48	21.45
Análisis IA	0.55 (0.34 – 0.71)	8.01	21.46
Sistema Infrarrojo	0.26 (0.05 – 0.46)	6.39	30.46

La Tabla 4 revela que, en el salto con contramovimiento (*CMJ*), los métodos de tiempo de vuelo mantienen una fiabilidad test–retest excelente: la plataforma de fuerza alcanza un CCI de 0.97 (IC 95 %: 0.95–0.98) con un SEM de apenas 1.4 cm y un CV de 20.5 %, mientras que los dos análisis manuales reportan CCI de 0.96 (IC 95 %: 0.94–0.98), SEM \approx 1.5 cm y CV en torno al 20.6–20.9 %.

El desempeño de la inteligencia artificial mejora notablemente respecto al SJ: el CCI sube a 0.81 (IC 95 %: 0.72–0.88), el SEM se reduce a 3.4 cm y el CV se sitúa en 19.7 %, lo que indica una consistencia aceptable para estudios longitudinales cuando se emplea en *CMJ*.

Por su parte, el sistema infrarrojo exhibe una fiabilidad muy alta, con un CCI de 0.94 (IC 95 %: 0.90–0.96), un SEM de 1.96 cm y un CV de 21.4 %, confirmando que en este tipo de salto su reproducibilidad se aproxima a la del *gold standard*.

En conjunto, estos resultados apuntan a que, aunque los métodos tradicionales siguen siendo los más sólidos, tanto la IA como el sistema infrarrojo alcanzan fiabilidades robustas en el *CMJ*, lo que sugiere su viabilidad práctica para monitorizar la potencia de salto en esta modalidad más dinámica que el *SJ*.

Tabla 4. Fiabilidad Test-Retest: Salto con Contramovimiento (CMJ)

Dispositivo	CCI	IC 95%	SEM (cm)	CV (%)
Plataforma de Fuerza	0.97	(0.95 – 0.98)	1.40	20.49
Análisis Manual A	0.96	(0.94 – 0.97)	1.52	20.62
Análisis Manual B	0.96	(0.94 – 0.98)	1.51	20.94
Análisis IA	0.81	(0.72 – 0.88)	3.41	19.69
Sistema Infrarrojo	0.94	(0.9 – 0.96)	1.96	21.42

La Tabla 5 evidencia que, incluso en el salto *Abalakov* el más complejo por la implicación de los brazos, los métodos de tiempo de vuelo mantienen una fiabilidad test–retest de primer nivel. La plataforma de fuerza y el análisis manual A alcanzan CCI de 0.96 y 0.97 respectivamente, con intervalos de confianza muy estrechos (≥ 0.94) y errores estándar de medida inferiores a 1.7 cm (CV ≈ 20.5 %). El análisis manual B presenta prestaciones prácticamente idénticas, confirmando que la valoración visual del vídeo sigue siendo extraordinariamente estable, aún en condiciones cinemáticas más variables.

El sistema infrarrojo también muestra un comportamiento sólido: CCI de 0.95 (IC 0.93–0.97), SEM de 1.99 cm y CV de 21.7 %, lo que prueba su capacidad para reproducir de forma consistente el criterio de referencia en el salto *Abalakov*.

En contraste, la fiabilidad de la IA disminuye de forma importante: su CCI se sitúa en 0.67 (IC 0.52–0.78), con un SEM de 6.2 cm y un CV elevado (29.8 %), lo que denota que gran parte de la variabilidad proviene del error intra-sujeto. Este comportamiento moderado subraya que, si bien la IA aporta ventajas de accesibilidad, aún requiere refinamientos de protocolo o calibración adicional para ser una alternativa fiable en saltos

Tabla 5. Fiabilidad Test-Retest: Salto *Abalakov*

Dispositivo	CCI IC 95%	SEM (cm)	CV (%)
Plataforma de Fuerza	0.96 (0.94 – 0.98)	1.68	20.48
Análisis Manual A	0.97 (0.95 – 0.98)	1.56	20.51
Análisis Manual B	0.96 (0.94 – 0.98)	1.68	20.66
Análisis IA	0.67 (0.52 – 0.78)	6.20	29.78
Sistema Infrarrojo	0.95 (0.93 – 0.97)	1.99	21.72

4.4. Análisis de Validez Concurrente

En este apartado se presentan los resultados del análisis de validez concurrente y concordancia entre los dispositivos de medición alternativos y la plataforma de fuerza, considerada el criterio de referencia. Los análisis se presentan de forma secuencial para cada uno de los tres tipos de salto evaluados: Salto sin Contramovimiento (SJ), Salto con Contramovimiento (CMJ) y Salto Abalakov.

4.4.1. Validez y concordancia en el Salto sin Contramovimiento (SJ)

La Tabla 6 revela que, en el salto sin contramovimiento, ambos análisis manuales presentan una validez concurrente prácticamente perfecta frente a la plataforma de fuerza: sus CCI alcanzan 0.99, con un sesgo medio inferior a 0.2 cm y límites de acuerdo muy estrechos (aproximadamente ± 1.5 cm), lo cual indica que reproducen casi idénticamente la medición cinética.

Por el contrario, la estimación por visión por computadora e IA falla estrepitosamente en este contexto: su CCI de -0.04 no solo denota ausencia de correlación, sino que el sesgo positivo de 26.3 cm y los límites de acuerdo que van de -2.8 a $+55.5$ cm ponen de manifiesto una sobrestimación masiva e impredecible, incompatible con cualquier uso aplicado sin corrección.

El sistema infrarrojo queda en una posición intermedia: aunque su CCI es baja (0.26), su sesgo moderado (4.9 cm) y límites de acuerdo muy amplios (desde -20.4 hasta $+30.2$ cm) sugieren que, si bien puede seguir la tendencia central de la plataforma, carece de precisión suficiente para considerarse un método intercambiable sin ajustes o filtros adicionales.

En síntesis, sólo los métodos de análisis manual ofrecen una validez robusta para el SJ, mientras que tanto IA como el sistema infrarrojo requieren optimizaciones profundas antes de poder confiar en sus medidas para estudios o aplicaciones prácticas.

Tabla 6. Tabla Validez vs Plataforma – SJ

Dispositivo	CCI	Sesgo (cm)	Límite Inf. (cm)	Límite Sup. (cm)
Análisis Manual A	0.99	-0.16	-1.78	1.46
Análisis Manual B	0.99	-0.13	-1.79	1.53
Análisis IA	-0.04	26.32	-2.84	55.47
Sistema Infrarrojo	0.26	4.90	-20.44	30.24

En la Figura 3 se observa de forma inequívoca la excelente concordancia entre la plataforma de fuerza y el análisis manual A en el salto sin contramovimiento. En el panel izquierdo de la Figura 3, el diagrama de dispersión con la línea de regresión ajustada ($y = 0.674 + 0.975 x$) y un R^2 de 0.99 pone de manifiesto que casi la totalidad de la variabilidad en los valores manuales se explica por el criterio cinético. Esta pendiente casi unitaria y un intercepto muy próximo a cero reflejan un sesgo sistemático prácticamente inexistente.

El panel derecho de la misma figura corresponde al gráfico de Bland–Altman, donde el sesgo medio de -0.16 cm (línea continua) y los límites de acuerdo situados en ± 1.62 cm (líneas punteadas) demuestran que las diferencias puntuales se distribuyen homogéneamente sin mostrar dependencia del tamaño del salto. Este comportamiento confirma que el análisis manual A no solo es consistente en términos de clasificación (alta correlación relativa), sino también absolutamente concordante con la plataforma de fuerza, con un error aleatorio mínimo y estable a lo largo de todo el rango de mediciones.

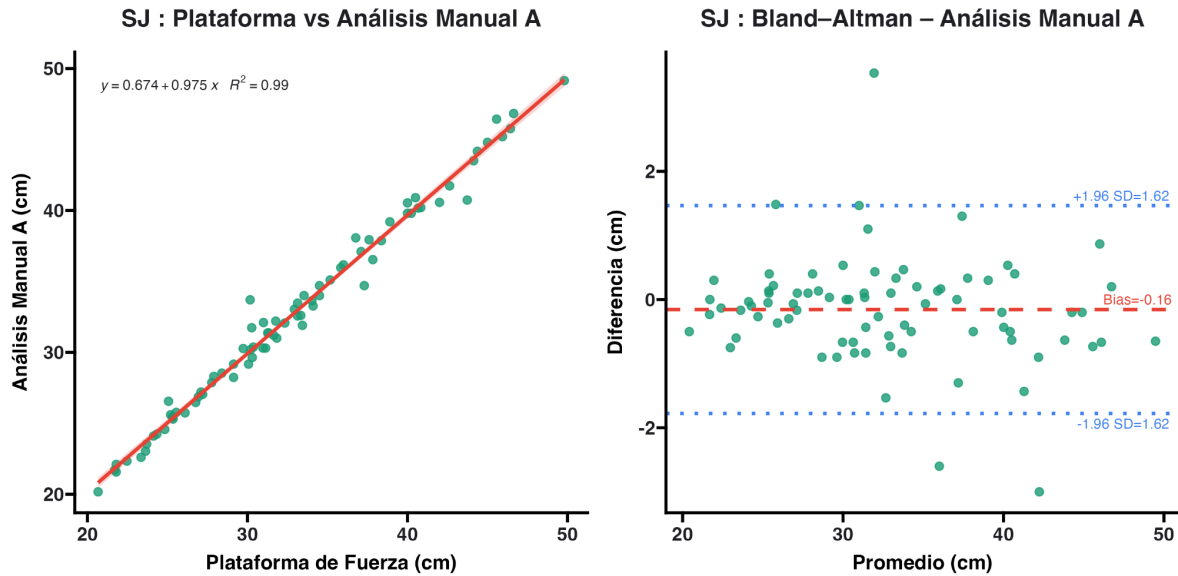


Figura 3. Gráficos de (a) dispersión con línea de regresión y R^2 y (b) Bland–Altman para la comparación entre la plataforma de fuerza y el análisis manual A en el salto sin contramovimiento (SJ), que evidencian una correlación casi perfecta ($R^2 = 0.99$), un sesgo medio prácticamente nulo (-0.16 cm) y límites de acuerdo muy reducidos (± 1.62 cm), reflejando una validez concurrente y una concordancia absoluta de nivel excepcional.

En la Figura 4 se confirma que el análisis manual B reproduce con extraordinaria precisión las mediciones de la plataforma de fuerza en el salto sin contramovimiento. En el diagrama de dispersión (panel izquierdo de la Figura 4), la regresión lineal ($y = 0.771 + 0.972 \cdot x$) explica el 99 % de la variabilidad ($R^2 = 0.99$), con una pendiente prácticamente unitaria y un intercepto cercano a cero, lo que indica una mínima desviación sistemática entre ambos métodos.

En el gráfico de Bland–Altman (panel derecho), el sesgo medio es de -0.13 cm y sus límites de acuerdo se establecen en ± 1.66 cm. Las diferencias individuales se distribuyen de forma homogénea alrededor del sesgo, sin mostrar un patrón de amplificación del error a medida que aumenta la altura del salto. Esto revela que el análisis manual B no solo ofrece una correlación relativa excelente, sino también una concordancia absoluta muy estrecha con la plataforma de fuerza, con un error aleatorio insignificante.

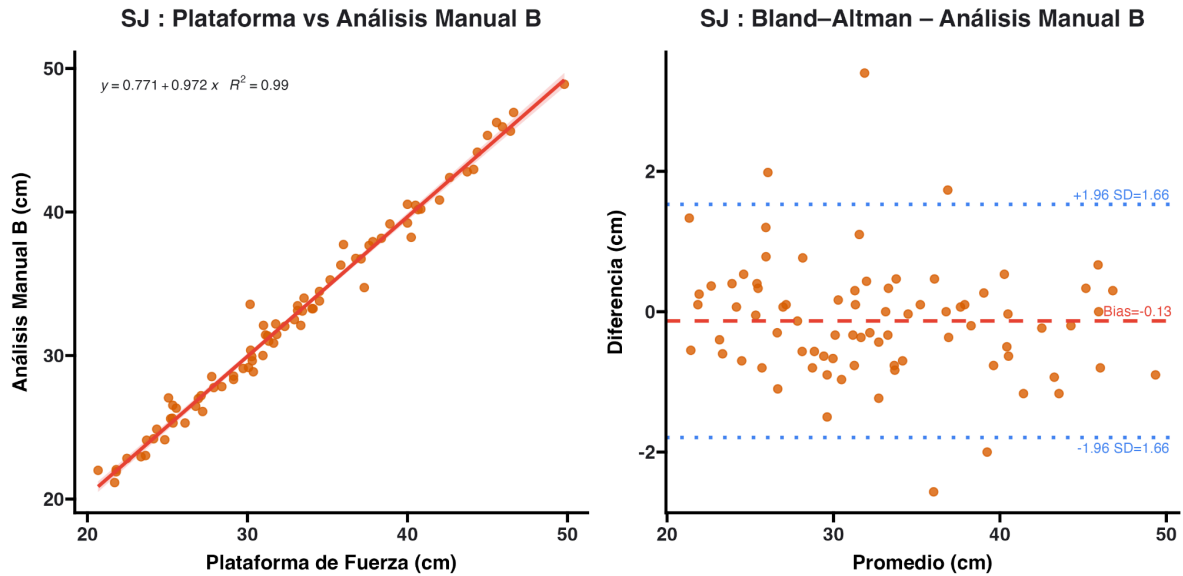


Figura 4. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis manual B en salto sin contramovimiento (SJ). Panel izquierdo: dispersión con línea de regresión ($y = 0.771 + 0.972 \cdot x$; $R^2 = 0.99$). Panel derecho: gráfico Bland–Altman con sesgo medio de -0.13 cm y límites de acuerdo a ± 1.66 cm, mostrando una concordancia absoluta de nivel excepcional.

En la Figura 5 se pone de manifiesto la completa falta de concordancia entre la plataforma de fuerza y el análisis por visión computarizada e IA en el salto sin contramovimiento. En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión exhibe una pendiente casi nula ($y = 58.5 - 0.0706 \cdot x$) y un coeficiente de determinación menor que 0.01, lo que indica que prácticamente no existe relación lineal entre ambas mediciones.

En el panel derecho, el gráfico de Bland–Altman muestra un sesgo medio extremadamente elevado (≈ 23.8 cm) y límites de acuerdo que se extienden aproximadamente ± 29 cm, con diferencias que no se concentran alrededor de cero sino que abarcan un rango muy amplio sin patrón de heteroscedasticidad claro.

Estos resultados confirman que, en el SJ, el método VC+IA no solo sobrestima sistemáticamente la altura de salto, sino que además presenta una imprecisión tal que lo hace inadecuado para aplicaciones prácticas sin una calibración o ajuste profundo.

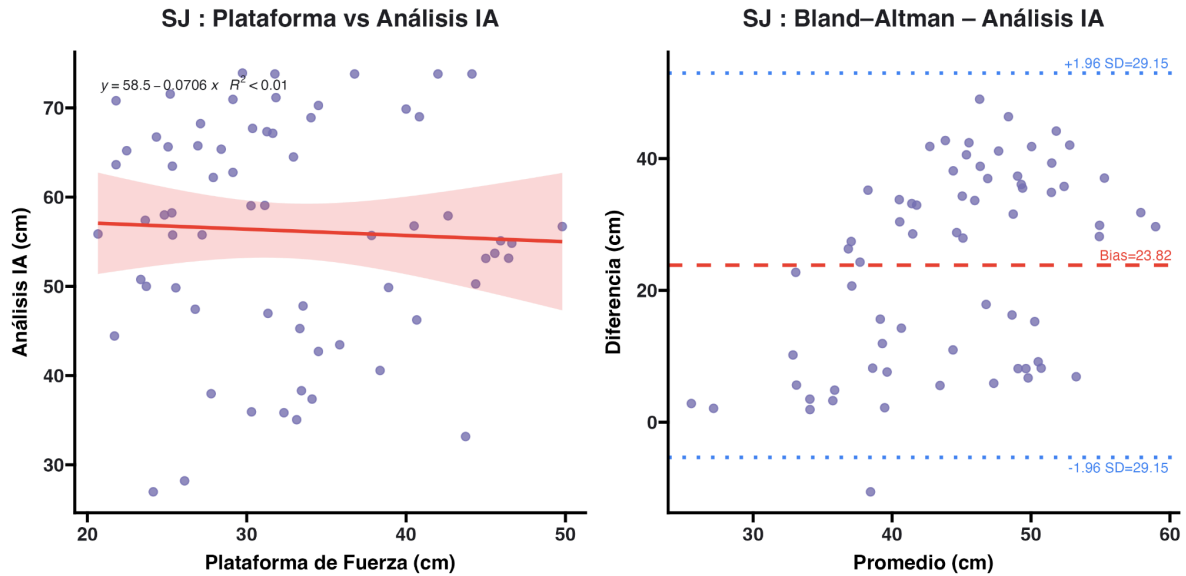


Figura 5. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis IA en salto sin contramovimiento (SJ). A la izquierda, dispersión con línea de regresión ($y = 58.5 - 0.0706 \cdot x$; $R^2 < 0.01$), que evidencia ausencia de correlación. A la derecha, gráfico Bland-Altman con sesgo medio de $+23.8$ cm y límites de acuerdo ± 29.15 cm, mostrando una sobrestimación masiva y una variabilidad interna excesiva.

En la Figura 6 se aprecia que el sistema infrarrojo ofrece una relación lineal muy débil con la plataforma de fuerza en el salto sin contramovimiento: en el panel izquierdo, la regresión ($y = 18.9 + 0.57 \times x$) explica apenas el 10 % de la variabilidad ($R^2 = 0.10$), lo cual revela que las mediciones de altura por infrarrojo no siguen de forma consistente el patrón cinético.

El panel derecho —gráfico de Bland-Altman— muestra un sesgo medio de $+4.9$ cm y límites de acuerdo amplios (± 25.34 cm). Las diferencias puntuales se distribuyen de manera dispersa y sin tendencia clara a lo largo del rango de medias, lo que indica un elevado error aleatorio.

En conjunto, estos hallazgos confirman que, aunque el sesgo promedio del sistema infrarrojo es moderado, su precisión absoluta es insuficiente para considerarlo intercambiable con la plataforma de fuerza en el salto sin contramovimiento sin aplicar ajustes metodológicos o de calibración específicos.

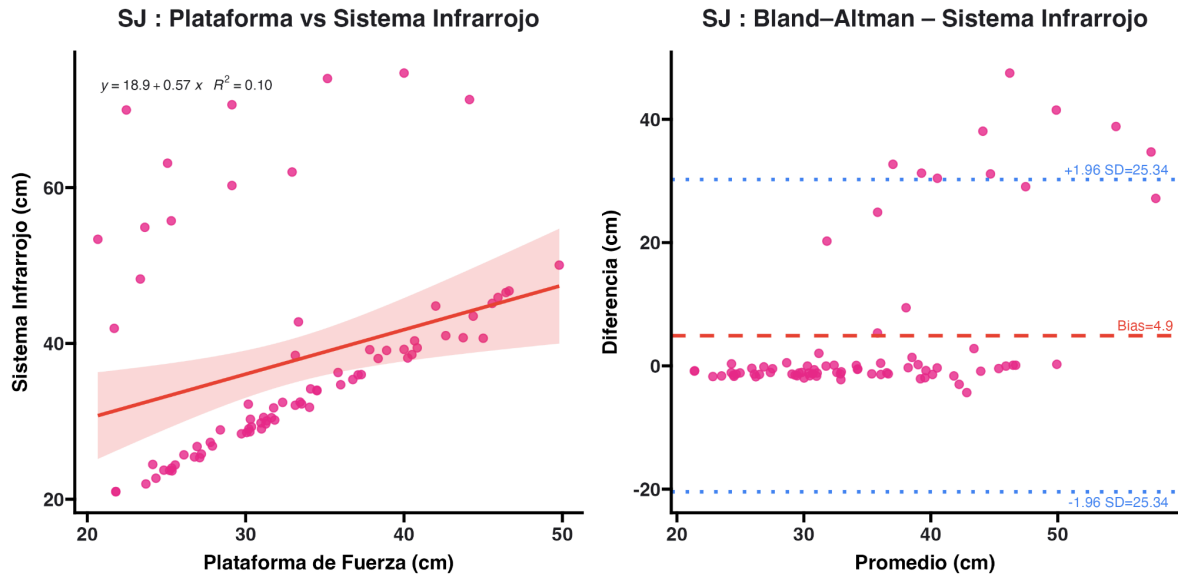


Figura 6. Comparación entre plataforma de fuerza y sistema infrarrojo en salto sin contramovimiento (SJ). En el diagrama de dispersión (panel izquierdo), la pendiente reducida y el bajo R^2 (0.10) describen una correlación débil. En el gráfico de Bland-Altman (panel derecho), el sesgo medio de +4.9 cm y los límites de acuerdo extendidos a ± 25.34 cm evidencian una variabilidad interna excesiva y subrayan la falta de concordancia absoluta entre ambos métodos.

4.4.2 Validez y concordancia en el Salto Contramovimiento (CMJ)

En el salto con contramovimiento (CMJ), la Tabla 7 revela que los análisis manuales alcanzan niveles de validez casi ideales: el Análisis Manual A presenta un CCI de 1.00 con un sesgo medio de -0.10 cm y límites de acuerdo estrechos (-1.51 a $+1.30$ cm), mientras que el Análisis Manual B reporta un CCI de 0.99, un ligero sesgo positivo ($+0.09$ cm) y límites de acuerdo de -2.24 a $+2.43$ cm. Estos resultados confirman que, para CMJ, la valoración visual reproduce de modo casi idéntico la plataforma de fuerza, con un error absoluto reducido.

El método de visión por computadora e IA muestra una validez también sólida (CCI = 0.89), pero introduce un sesgo positivo de 7.25 cm y límites de acuerdo que parten en cero y alcanzan $+14.51$ cm, lo que indica una sobrestimación sistemática del salto y una variabilidad mucho mayor que los métodos de tiempo de vuelo.

Finalmente, el sistema infrarrojo mantiene un desempeño excelente (CCI = 0.98), con un sesgo moderado de -1.01 cm y límites de acuerdo relativamente ajustados (-3.78 a $+1.75$ cm), evidenciando que ofrece una buena concordancia absoluta con la plataforma cuando se evalúa CMJ.

Tabla 7. Validez vs Plataforma – CMJ

Dispositivo	CCI	Sesgo (cm)	Límite Inf. (cm)	Límite Sup. (cm)
Análisis Manual A	1.00	-0.10	-1.51	1.30
Análisis Manual B	0.99	0.09	-2.24	2.43
Análisis IA	0.89	7.25	0.00	14.51
Sistema Infrarrojo	0.98	-1.01	-3.78	1.75

En la Figura 7 se ilustra la excepcional validez del análisis manual A frente a la plataforma de fuerza en el salto con contramovimiento (*CMJ*). En el gráfico de dispersión (panel izquierdo de la Figura 7), la línea de regresión describe una pendiente unitaria (1.01) con un intercepto cercano a cero (-0.33 cm) y un R^2 de 0.99, lo que evidencia que prácticamente toda la variabilidad de las mediciones manuales se explica por la plataforma de fuerza.

El diagrama de Bland–Altman (panel derecho) muestra un sesgo medio de -0.10 cm y límites de acuerdo ajustados a ± 1.40 cm, con las diferencias individuales distribuidas homogéneamente alrededor de la media sin dependencia del tamaño del salto. Este patrón confirma que el análisis manual A no solo refleja de forma precisa la tendencia central de la plataforma, sino que también mantiene un error aleatorio muy reducido y estable a lo largo de todo el rango de alturas de salto.

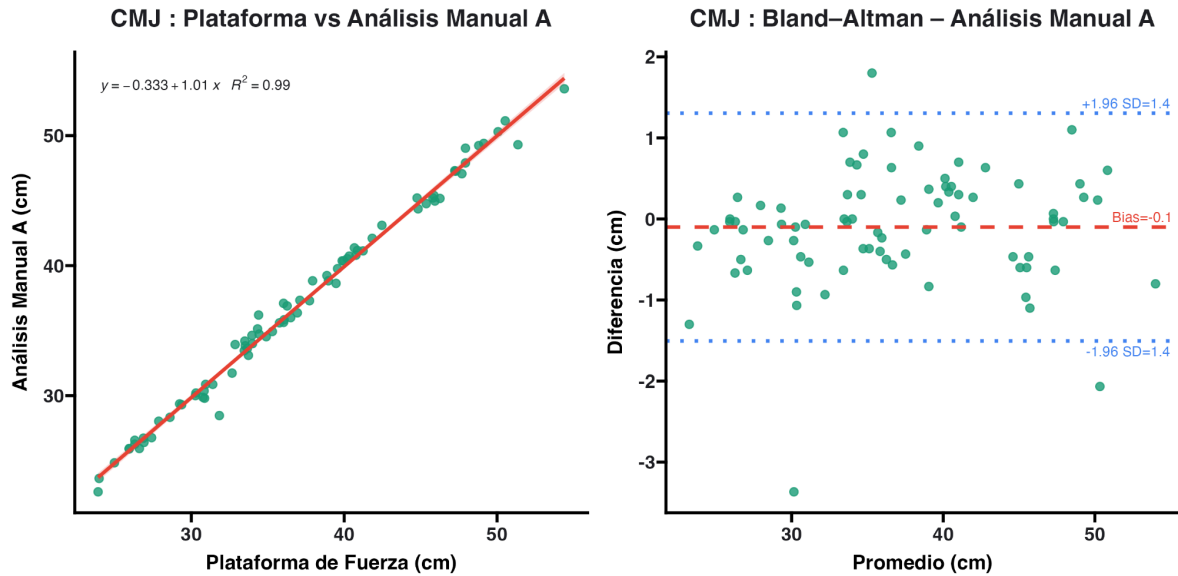


Figura 7. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis manual A en salto con contramovimiento (CMJ). El panel izquierdo presenta el diagrama de dispersión con línea de regresión ($y = -0.333 + 1.01 \cdot x$; $R^2 = 0.99$), y el panel derecho el gráfico de Bland–Altman con sesgo medio de -0.10 cm y límites de acuerdo a ± 1.40 cm, reflejando una validez concurrente y una concordancia absoluta de nivel sobresaliente.

En la Figura 8 se confirma que el análisis manual B ofrece una validez concurrente sobresaliente en el salto con contramovimiento. En el gráfico de dispersión (panel izquierdo de la Figura 8), la línea de regresión ($y = 0.023 + 1 \cdot x$) con un R^2 de 0.98 evidencia que casi la totalidad de la variación en las mediciones manuales se explica por la plataforma de fuerza, sin sesgo sistemático apreciable (pendiente unitaria e intercepto prácticamente nulo).

El diagrama de Bland–Altman (panel derecho) muestra un sesgo medio de $+0.09$ cm y límites de acuerdo de ± 2.33 cm, con las diferencias puntuales dispersas de forma homogénea alrededor del sesgo y sin tendencia a depender de la magnitud del salto. Estos resultados ponen de manifiesto que el análisis manual B reproduce no sólo la correlación relativa de la plataforma de fuerza, sino también su concordancia absoluta con un error aleatorio muy reducido.

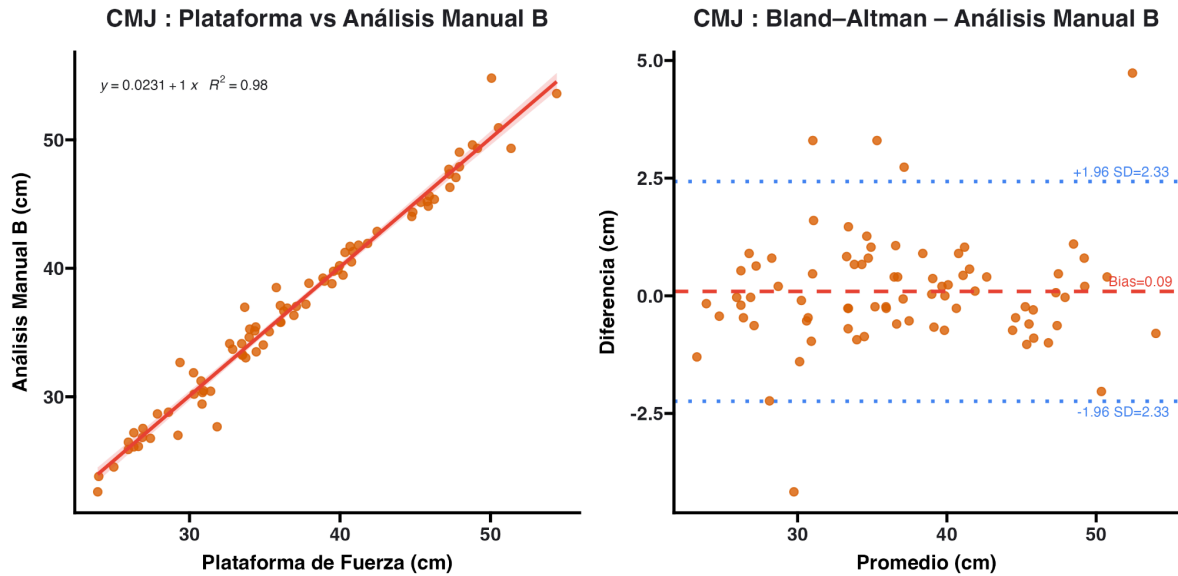


Figura 8. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis manual B en salto con contramovimiento (CMJ). Panel izquierdo: dispersión con línea de regresión ($y = 0.023 + 1 \cdot x$; $R^2 = 0.98$). Panel derecho: gráfico de Bland–Altman mostrando un sesgo medio de $+0.09$ cm y límites de acuerdo de ± 2.33 cm, lo que refleja una validez concurrente y una concordancia absoluta de nivel excepcional.

En la Figura 9 se aprecia que, en el salto con contramovimiento, el método de visión por computadora e IA mantiene una correlación razonablemente alta con la plataforma de fuerza, pero con sesgo y variabilidad notables. En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión muestra una pendiente cercana a la unidad ($y = 5.25 + 0.987 \cdot x$) y un coeficiente de determinación de 0,81, lo que indica que el 81 % de la variabilidad en las mediciones de IA se explica por la plataforma. No obstante, el intercepto positivo (5.25 cm) revela una sobrestimación sistemática de la altura de salto.

El panel derecho, correspondiente al gráfico de Bland–Altman, evidencia un sesgo medio de $+4.75$ cm y límites de acuerdo amplios (± 7.26 cm). Las diferencias se distribuyen de manera relativamente uniforme alrededor del sesgo, sin mostrar un claro patrón de aumento del error con el tamaño del salto.

Estos hallazgos indican que, aunque la IA captura la tendencia general del CMJ, su medición absoluta está comprometida por un sesgo positivo y una imprecisión que requieren corrección antes de su aplicación práctica.

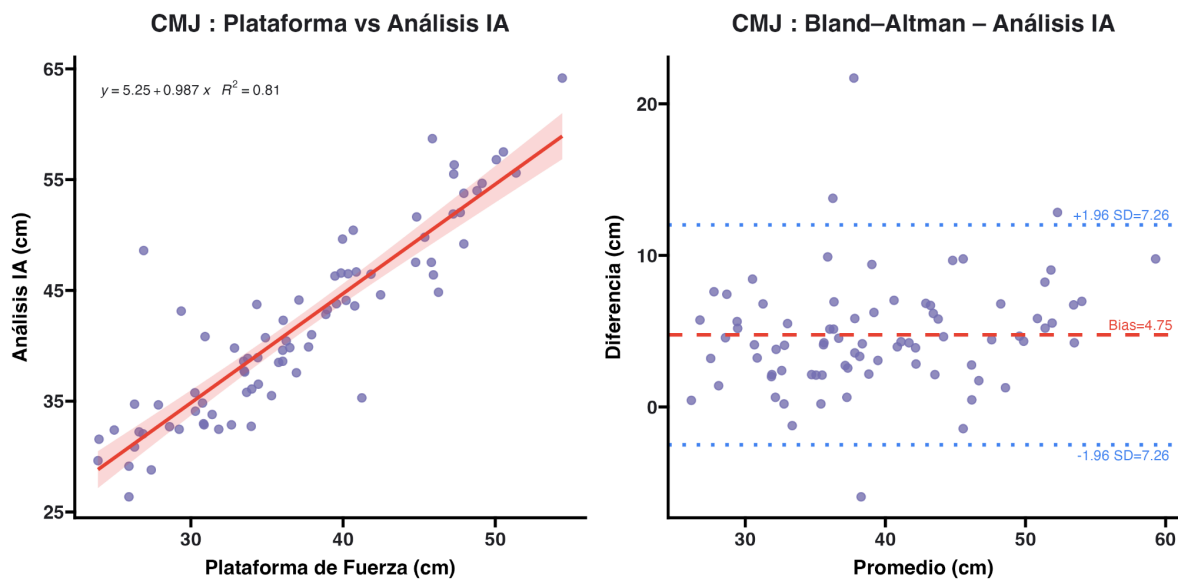


Figura 9. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis IA en salto con contramovimiento (CMJ). A la izquierda, gráfico de dispersión con línea de regresión ($y = 5.25 + 0.987 \cdot x$; $R^2 = 0.81$). A la derecha, diagrama de Bland–Altman mostrando un sesgo medio de +4.75 cm y límites de acuerdo de ± 7.26 cm, ilustrando la sobrestimación sistemática y la variabilidad interna de la IA.

La Figura 10 pone de manifiesto que el sistema infrarrojo alcanza una validez concurrente sobresaliente en el salto con contramovimiento (CMJ). En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión muestra una regresión casi perfecta ($y = -1.40 + 1.01 \cdot x$) con un R^2 de 0.97, lo que indica que el 97 % de la variabilidad de las mediciones infrarrojas se explica por la plataforma de fuerza. La pendiente cercana a la unidad y el intercepto ligeramente negativo evidencian un sesgo sistemático muy pequeño.

En el panel derecho, el gráfico de Bland–Altman revela un sesgo medio de -1.01 cm y límites de acuerdo de ± 2.77 cm, con las diferencias distribuidas homogéneamente alrededor del sesgo y sin tendencia a aumentar con alturas mayores. Este patrón refleja una concordancia absoluta excelente y un error aleatorio reducido, confirmando que el sistema infrarrojo es prácticamente intercambiable con la plataforma de fuerza para evaluar el CMJ.

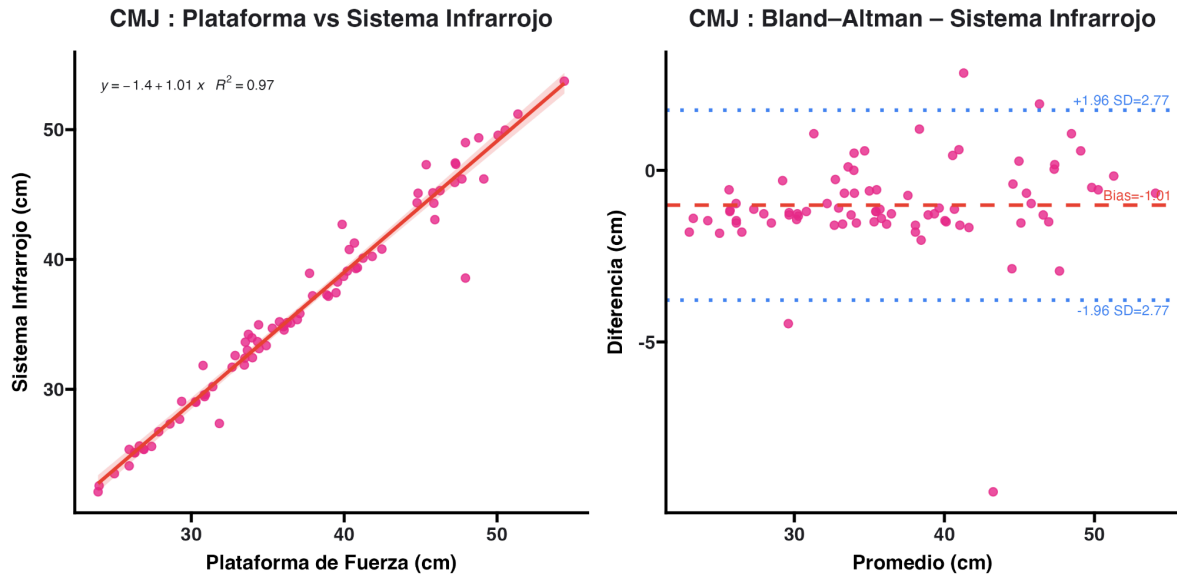


Figura 10. Comparación entre plataforma de fuerza y sistema infrarrojo en salto con contramovimiento (CMJ). A la izquierda, dispersión con línea de regresión ($y = -1.40 + 1.01 \cdot x$; $R^2 = 0.97$). A la derecha, gráfico de Bland–Altman con sesgo medio de -1.01 cm y límites de acuerdo a ± 2.77 cm, demostrando alta concordancia absoluta y baja variabilidad interna.

4.4.3. Validez y Concordancia en el Salto Abalakov

En el salto Abalakov, la Tabla 8 muestra que los análisis manuales siguen ofreciendo una validez excepcional frente a la plataforma de fuerza: el Análisis Manual A alcanza un CCI perfecto de 1.00 con un sesgo prácticamente nulo (-0.02 cm) y límites de acuerdo muy estrechos (-1.49 a $+1.45$ cm), mientras que el Análisis Manual B reporta un CCI de 0.99, un sesgo de $+0.03$ cm y límites de acuerdo de -1.87 a $+1.93$ cm. Estos valores confirman que la valoración visual reproduce de manera casi idéntica la medición cinética, incluso en un salto con movimientos de brazos que alteran la cinemática.

El sistema infrarrojo también demuestra una excelente concordancia: CCI de 0.98, sesgo de -1.21 cm y límites de acuerdo de -4.56 a $+2.14$ cm, lo que prueba su capacidad para seguir con fidelidad el criterio de referencia en una tarea biomecánicamente compleja.

En cambio, el método de visión por computadora e IA presenta una validez moderada, con un CCI de 0.58, un sesgo de -1.16 cm y límites de acuerdo muy amplios (-19.18 a $+16.86$ cm), indicando que, aunque no introduce un sesgo

sistemático grave, su variabilidad absoluta compromete su uso directo en saltos técnicamente demandantes.

Tabla 8. Validez vs Plataforma – Abalakov

Dispositivo	ICC	Sesgo (cm)	Límite Inf. (cm)	Límite Sup. (cm)
Análisis Manual A	1.00	-0.02	-1.49	1.45
Análisis Manual B	0.99	0.03	-1.87	1.93
Análisis IA	0.58	-1.16	-19.18	16.86
Sistema Infrarrojo	0.98	-1.21	-4.56	2.14

La Figura 11 muestra la comparativa entre la plataforma de fuerza y el análisis manual A en el salto Abalakov. En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión evidencia una correlación casi perfecta: la línea de regresión ($y = -0.313 + 1.01 \cdot x$) presenta una pendiente prácticamente unitaria y un R^2 de 0.99, lo que indica que el 99 % de la variabilidad en las mediciones manuales se explica por la plataforma de fuerza, con un intercepto muy cercano a cero que refleja un sesgo sistemático insignificante.

El panel derecho, correspondiente al gráfico de Bland–Altman, revela un sesgo medio de -0.02 cm y límites de acuerdo de ± 1.47 cm. Las diferencias puntuales se distribuyen de manera homogénea alrededor del sesgo sin mostrar un patrón dependiente de la magnitud del salto. Esta estrecha banda de variabilidad confirma que el análisis manual A reproduce de manera casi idéntica la medida de la plataforma, incluso en un salto con movimientos de brazos complejos, manteniendo un error aleatorio mínimo a lo largo de todo el rango de alturas.

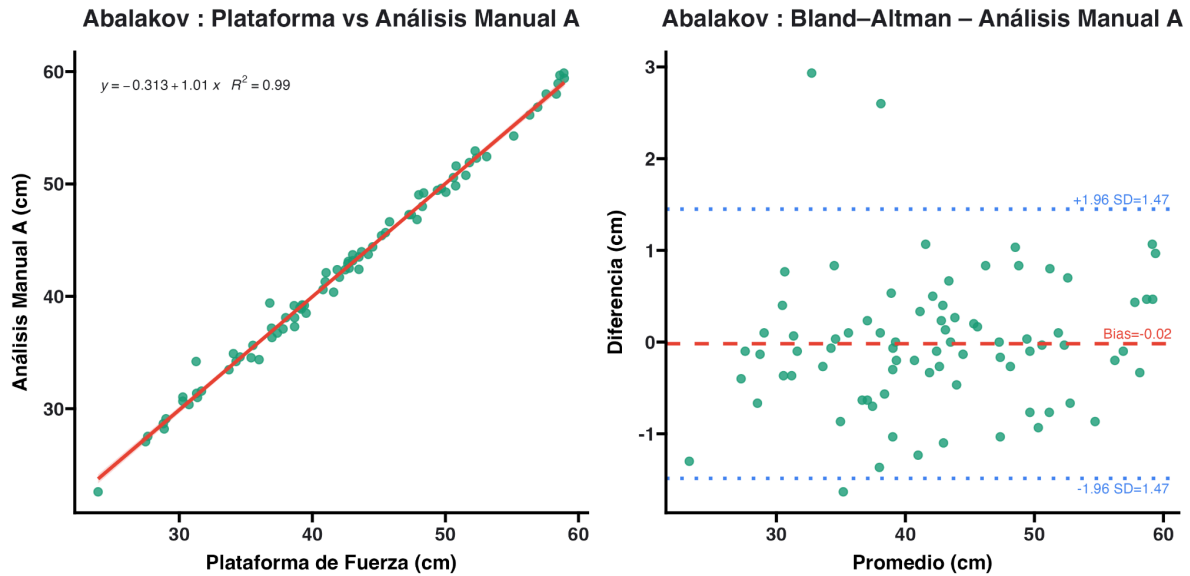


Figura 11. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis manual A en salto *Abalakov*. Panel izquierdo: dispersión con línea de regresión ($y = -0.313 + 1,01 \cdot x$; $R^2 = 0.99$). Panel derecho: gráfico de Bland–Altman con sesgo medio de -0.02 cm y límites de acuerdo a ± 1.47 cm, demostrando una validez concurrente y una concordancia absoluta de nivel sobresaliente.

La Figura 12 confirma que el análisis manual B reproduce de forma prácticamente idéntica las mediciones de la plataforma de fuerza en el salto *Abalakov*. En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión presenta una pendiente unitaria ($y = -0.071 + 1 \cdot x$) y un R^2 de 0.99, lo que indica que el 99 % de la variación en los valores manuales se explica por el criterio cinético. El intercepto cercano a cero refleja un sesgo sistemático insignificante.

En el panel derecho, el gráfico de Bland–Altman muestra un sesgo medio de $+0.03$ cm y límites de acuerdo de ± 1.90 cm, con las diferencias repartidas uniformemente alrededor de la línea de sesgo y sin tendencia a variar con la magnitud del salto. Este comportamiento evidencia una concordancia absoluta excepcional y un error aleatorio muy reducido en las mediciones del análisis manual B.

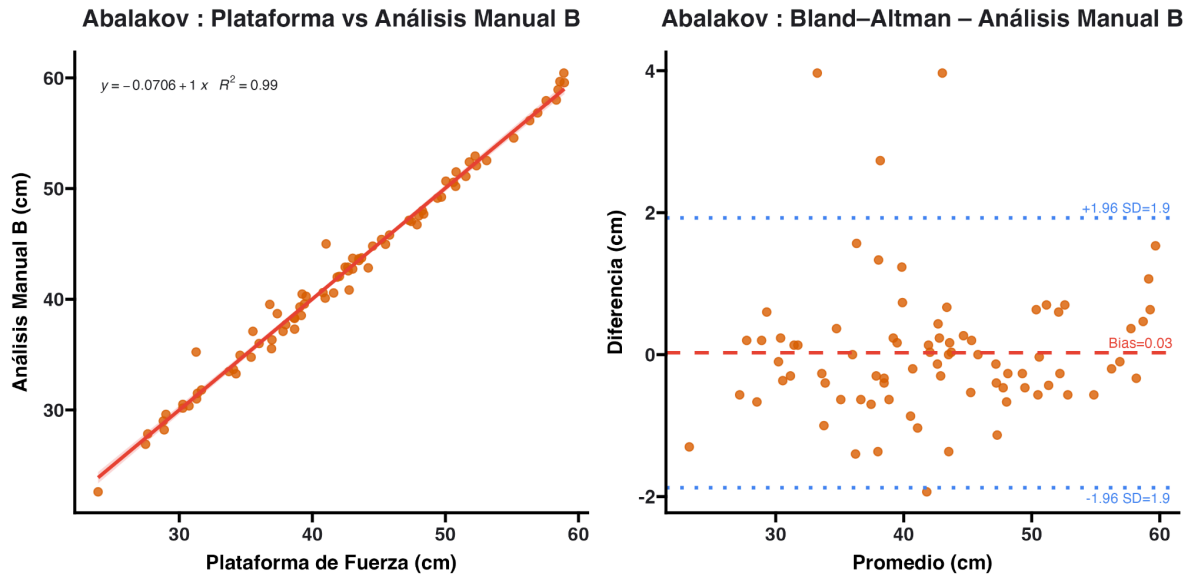


Figura 12. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis manual B en salto Abalakov. A la izquierda, dispersión con línea de regresión ($y = -0.0706 + 1 \cdot x$; $R^2 = 0.99$). A la derecha, gráfico de Bland–Altman con sesgo medio de $+0.03$ cm y límites de acuerdo a ± 1.90 cm, demostrando una validez concurrente y una concordancia absoluta de nivel sobresaliente.

En la Figura 13 se observa que, en el salto *Abalakov*, el método de visión por computadora e IA apenas mantiene una relación lineal moderada con la plataforma de fuerza. En el diagrama de dispersión (panel izquierdo), la regresión ($y = 5.11 + 0.791 \cdot x$) explica solo el 36 % de la variabilidad ($R^2 = 0.36$), lo que indica que gran parte de la medición basada en IA no se alinea con el criterio cinético. El intercepto positivo (5.11 cm) revela una sobrestimación sistemática, mientras que la pendiente inferior a 1 señala subestimaciones en saltos mayores.

En el gráfico de Bland–Altman (panel derecho), el sesgo medio de -3.66 cm sugiere que, en promedio, la IA subestima ligeramente la altura de salto en este tipo, pero los límites de acuerdo amplios (± 18.02 cm) evidencian una imprecisión absoluta extrema. Las diferencias individuales se dispersan de forma muy amplia, sin patrón claro de heterocedasticidad, lo que refleja un error aleatorio inaceptable para usos aplicados.

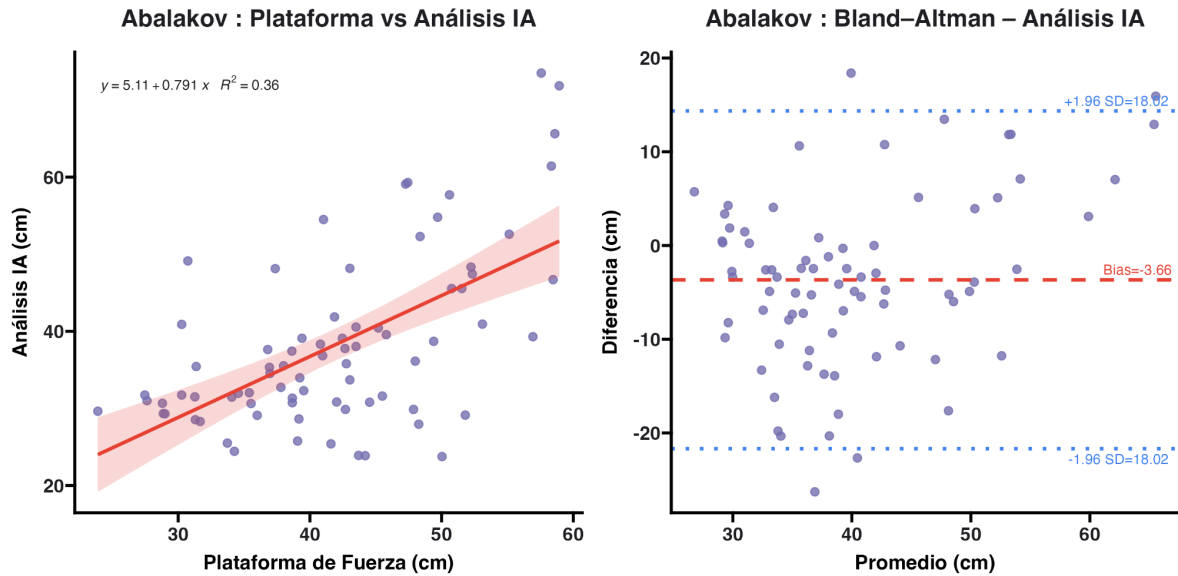


Figura 13. Comparación entre plataforma de fuerza y análisis IA en salto Abalakov. El panel izquierdo muestra el diagrama de dispersión con línea de regresión ($y = 5.11 + 0.791 \cdot x$; $R^2 = 0.36$), revelando una correlación moderada y sesgo positivo. El panel derecho presenta el gráfico de Bland–Altman con sesgo medio de -3.66 cm y límites de acuerdo de ± 18.02 cm, ilustrando la falta de concordancia absoluta y la alta variabilidad interna de la IA en esta modalidad de salto.

En la Figura 14 se aprecia que el sistema infrarrojo mantiene una validez concurrente muy alta en el salto *Abalakov*. En el panel izquierdo, el diagrama de dispersión muestra una relación casi perfecta con la plataforma de fuerza: la regresión ($y = -1.34 + 1 \cdot x$) presenta una pendiente unitaria y un intercepto levemente negativo, con un R^2 de 0.96, lo que indica que el 96 % de la variabilidad en las mediciones infrarrojas se explica por el criterio cinético.

En el panel derecho, el gráfico de Bland–Altman revela un sesgo medio de -1.21 cm y límites de acuerdo de ± 3.35 cm. Las diferencias individuales se distribuyen homogéneamente alrededor del sesgo, sin tendencia a depender del tamaño del salto, lo que refleja un error aleatorio moderado y estable.

Estos hallazgos confirman que, para el salto *Abalakov*, el sistema infrarrojo ofrece una concordancia absoluta y relativa de alto nivel, resultando prácticamente intercambiable con la plataforma de fuerza en contextos aplicados tras una calibración inicialmente sencilla.

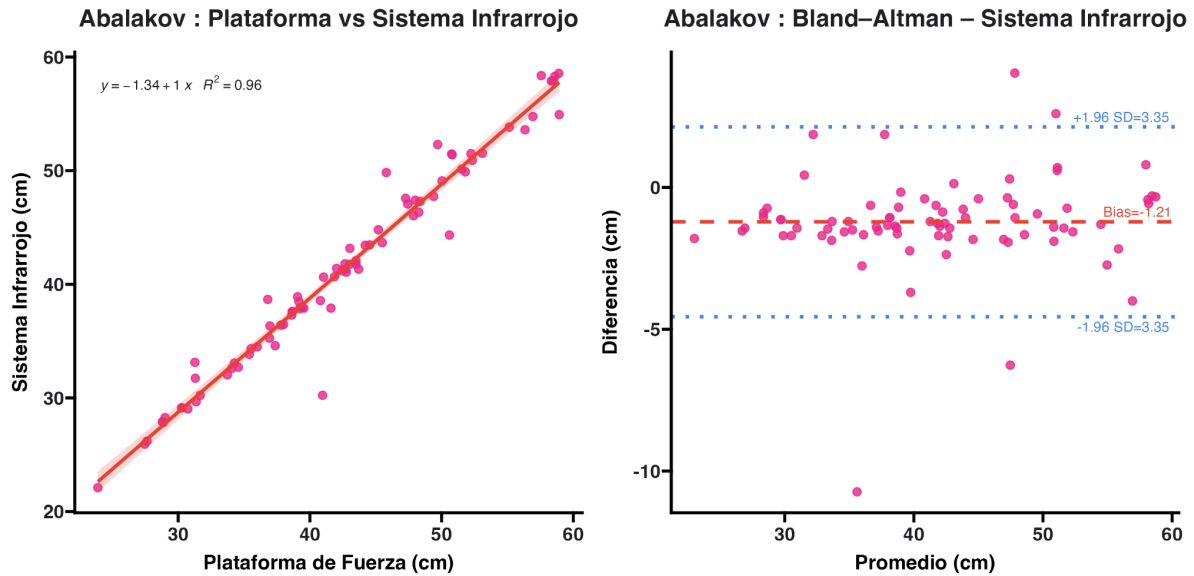


Figura 14. Comparación entre plataforma de fuerza y sistema infrarrojo en salto *Abalakov*. A la izquierda, dispersión con línea de regresión ($y = -1.34 + 1 \cdot x$; $R^2 = 0.96$). A la derecha, diagrama de Bland–Altman con sesgo medio de -1.21 cm y límites de acuerdo a ± 3.35 cm, demostrando una alta concordancia absoluta y una variabilidad interna reducida.

4.4.4. Validez Concurrente Estratificada por Cohorte y Tipo de Salto

La Tabla 9 pone de relieve cómo la validez concurrente de cada tecnología frente al criterio de referencia varía tanto según el tipo de salto como el nivel de rendimiento de los atletas. En el salto sin contramovimiento (SJ), los dos métodos manuales mantienen una precisión casi imaculada en todas las cohortes, con CCI que oscilan entre 0.98 y 1.00 y sesgos medios prácticamente nulos (entre -0.51 y $+0.05$ cm), demostrando que la valoración visual del vídeo reproduce con fidelidad la medición de la plataforma sin importar la disciplina deportiva. En contraste, el análisis por IA exhibe un desempeño muy irregular: mientras que en voleibolistas alcanza un CCI moderado (0.44) con un sesgo contenido ($+9.76$ cm), en basquetbolistas su CCI cae a 0.01 y llega a sobrestimar el salto en más de 32 cm, lo que evidencia su vulnerabilidad a las características técnicas del atleta. El sistema infrarrojo, por su parte, exhibe una validez intermedia en SJ; aunque llega al 0.99 en futbolistas, su CCI desciende a 0.27 en no deportistas y su sesgo puede superar los 22 cm, sugiriendo que requiere calibraciones específicas en poblaciones menos entrenadas.

En el salto con contramovimiento (CMJ), las tres tecnologías basadas en tiempo de vuelo –análisis manual A, análisis manual B y sistema infrarrojo– alcanzan niveles de confiabilidad excepcional ($CCI \geq 0.97$) y sesgos reducidos (entre -1.30 y $+0.56$ cm) en todos los grupos, confirmando su robustez y consistencia independientemente de la cohorte. El método IA, aunque mejora notablemente respecto al *SJ*, presenta sesgos positivos de 4.55 a 6.48 cm y CCI que varían entre 0.72 (no deportistas) y 0.94 (basquetbolistas), lo que indica que, pese a su buena correlación con la plataforma, todavía subestima o sobreestima sistemáticamente la altura de salto.

Finalmente, en el salto *Abalakov*, de mayor complejidad cinemática, los análisis manuales continúan exhibiendo una validez sobresaliente ($CCI \geq 0.99$; sesgos entre -0.42 y $+0.25$ cm) y el sistema infrarrojo se mantiene muy cercano a la plataforma (CCI 0.95–1,00; sesgos -1.37 a -0.83 cm). La IA, sin embargo, se ve nuevamente penalizada por su alta variabilidad: su CCI se sitúa entre 0.36 en basquetbolistas y 0.81 en no deportistas, con límites de acuerdo que exceden los 16 cm, lo que evidencia que el método aún no es lo suficientemente estable para reemplazar las técnicas tradicionales en movimientos tan complejos como el *Abalakov*. En conjunto, estos hallazgos subrayan que, mientras las valoraciones manuales y el sistema infrarrojo pueden considerarse prácticamente intercambiables con el *gold standard* en cualquier salto y cohorte, la IA requiere ajustes y validaciones adicionales antes de aspirar a un nivel de precisión equivalente.

Tabla 9: Validez Concurrente y Sesgo por Cohorte y Tipo de Salto

Comparación con Plataforma de Fuerza como criterio de referencia.

Dispositivo	No Deportista		Basquetbol		Voleibol		Futbol	
	CCI	Sesgo	CCI	Sesgo	CCI	Sesgo	CCI	Sesgo
<i>SJ</i>								
Análisis Manual A	0.99	0.03	0.99	-0.31	0.99	-0.40	0.99	0.05
Análisis Manual B	0.98	0.05	0.99	-0.51	1.00	-0.04	0.98	-0.03
Análisis IA	0.25	28.75	0.01	32.63	0.44	9.76	-0.23	27.95
Sistema Infrarrojo	0.27	22.95	0.98	-0.83	0.96	-0.33	0.99	-1.30
<i>CMJ</i>								
Análisis Manual A	0.99	-0.35	1.00	-0.10	0.99	0.02	0.99	0.03
Análisis Manual B	0.99	-0.25	1.00	-0.22	0.97	0.56	0.97	0.28
Análisis IA	0.72	4.71	0.94	4.55	0.84	6.48	0.93	3.28
Sistema Infrarrojo	0.99	-1.30	0.99	-1.06	0.94	-0.60	0.99	-1.09
<i>Abalakov</i>								
Análisis Manual A	0.99	0.12	1.00	-0.16	1.00	0.25	0.99	-0.28
Análisis Manual B	0.99	0.15	1.00	-0.42	0.99	0.42	0.99	-0.05
Análisis IA	0.81	-1.93	0.36	-8.14	0.50	1.62	-0.22	-5.39
Sistema Infrarrojo	0.95	-1.33	0.99	-1.29	0.96	-0.86	1.00	-1.37

La Figura 15 configura un paisaje claro y contundente de la fiabilidad test–retest de cada tecnología, desglosada por cohorte y tipo de salto. En ella, los análisis manuales A y B, junto con el sistema infrarrojo, aparecen agrupados muy cerca del valor 1.0 con barras de error prácticamente inapreciables en *SJ*, *CMJ* y *Abalakov*, lo que subraya su consistencia prácticamente inmutable frente a la plataforma de fuerza. En contraste, los puntos correspondientes al método de IA en *SJ* y *Abalakov* se desplazan hacia abajo y muestran intervalos de confianza muy amplios, ilustrando su marcada variabilidad y su falta de robustez en saltos con complejidad cinemática o menor destreza técnica. Solo en *CMJ* la IA alcanza

valores intermedios de CCI (alrededor de 0.6–0.8) y reduce algo su imprecisión, pero sigue sin igualar la estabilidad de los métodos basados en tiempo de vuelo. Esta representación gráfica refuerza, sin recurrir a cifras específicas, que la IA ofrece una fiabilidad altamente dependiente del tipo de salto y la experiencia del atleta, mientras que los métodos manuales e infrarrojos mantienen un rendimiento excepcionalmente uniforme en todas las condiciones evaluadas.

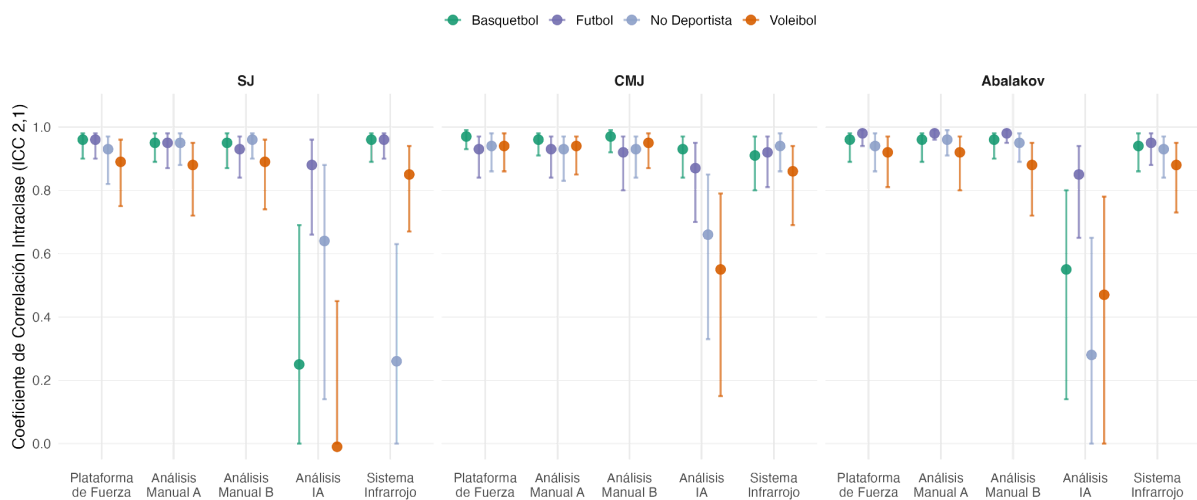


Figura 15. Diagrama de puntos con intervalos de confianza del CCI (2.1) estratificado por cohorte (No Deportista, Básquetbol, Fútbol, Voleibol) y tipo de salto (SJ, CMJ, Abalakov). Cada color representa una cohorte y cada panel un tipo de salto; la altura de las barras de error ilustra la precisión de cada CCI. La concentración elevada y estable de los dispositivos de tiempo de vuelo contrasta con la dispersión marcada de la IA en SJ y Abalakov, mientras que en CMJ alcanza consistencias intermedias.

La Figura 16 muestra, para cada instrumento, cómo varía el error absoluto (diferencia plataforma – dispositivo) con el tamaño del salto en el SJ, desglosado por cohorte.

En los gráficos de Análisis Manual A y B (paneles superior izquierdo y derecho), las diferencias se distribuyen muy próximas a cero y carecen de pendiente marcada en todas las cohortes, lo que confirma que ambos métodos manuales mantienen un sesgo mínimo y estable independientemente de la magnitud del salto o del grupo deportivo.

El panel inferior izquierdo (Análisis IA) revela una pendiente negativa pronunciada en todas las cohortes: a saltos más altos, la IA tiende a subestimar

progresivamente la altura (hasta casi -40 cm), con dispersión creciente especialmente en futbolistas y no deportistas. Esto evidencia una heterocedasticidad crítica que limita su aplicación en SJ.

Finalmente, el panel inferior derecho (Sistema Infrarrojo) muestra un ligero sesgo negativo que aumenta con la altura –aunque de forma mucho menos dramática que la IA– y una dispersión moderada pero consistente en todas las cohortes. Esto indica que, si bien existe cierta subestimación proporcional, el sistema infrarrojo conserva una variabilidad mucho más contenida y predecible que la IA.

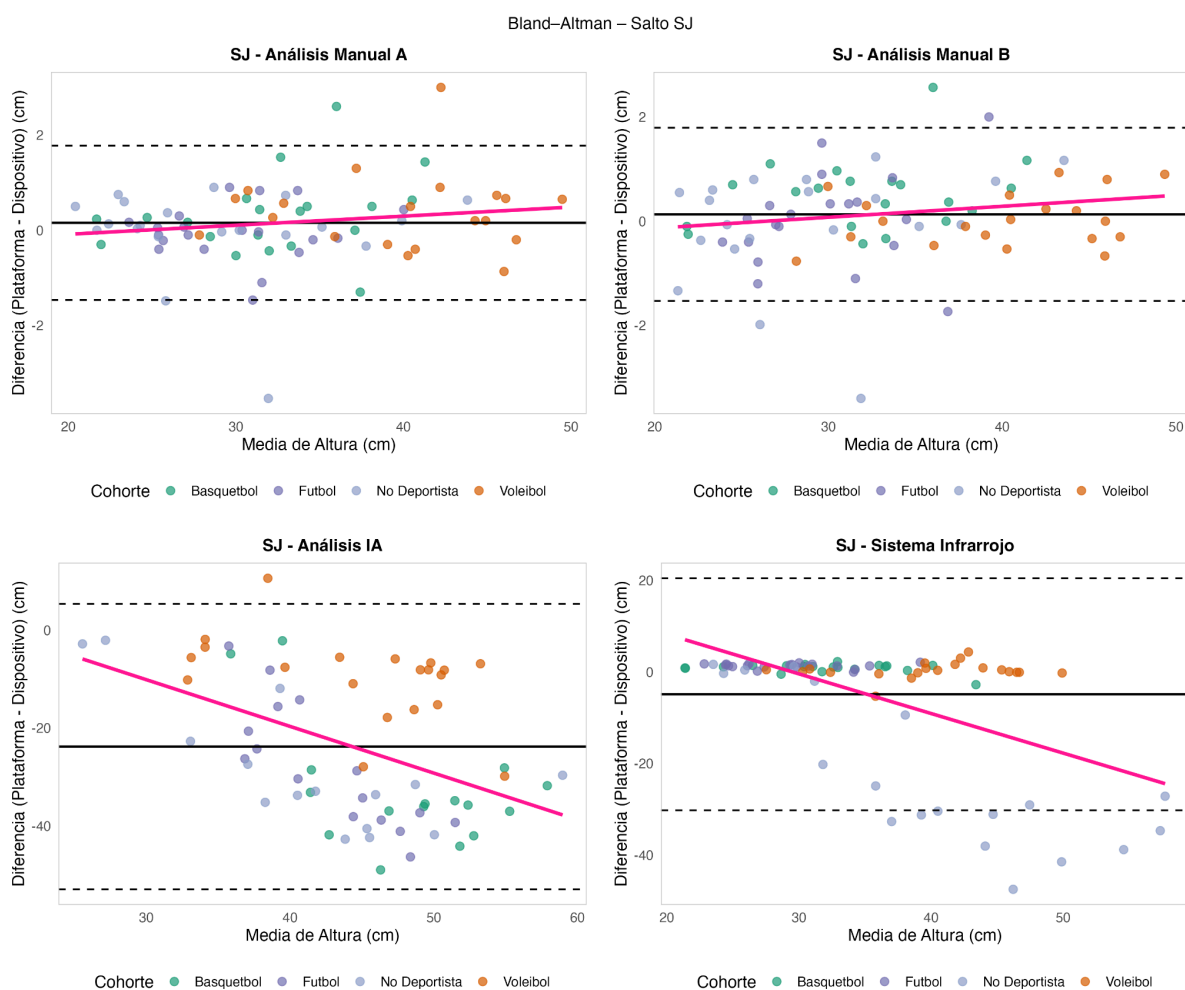


Figura 16. Gráficos de Bland–Altman por cohorte en Salto Sin Contramovimiento (SJ). Cada panel corresponde a un instrumento: análisis manual A (arriba izquierda), análisis manual B (arriba derecha), IA (abajo izquierda) y sistema infrarrojo (abajo derecha). Los puntos coloreados representan diferencias individuales (plataforma – dispositivo) agrupadas por cohorte, la línea gruesa negra el sesgo medio y la línea rosa la tendencia de ese sesgo con la altura del salto. Las franjas punteadas delimitan los límites de acuerdo ($\pm 1.96 \cdot DE$) para cada instrumento.

La Figura 16 ilustra cómo varía el error absoluto de cada método en el salto con contramovimiento (*CMJ*) según la cohorte. En los gráficos de análisis manual A y B, las diferencias respecto a la plataforma de fuerza permanecen cercanas a cero a lo largo de todo el rango de alturas y para todos los grupos, lo que demuestra una precisión y estabilidad excepcionales en la medición manual sin sesgos dependientes de la magnitud del salto. El panel de IA revela un patrón distinto: a mayores alturas, las estimaciones de la IA tienden a subestimar el salto, con un sesgo medio ligeramente negativo y una dispersión creciente, especialmente marcada en no deportistas y futbolistas, lo que evidencia una variabilidad proporcional al rendimiento. Por último, el sistema infrarrojo combina un sesgo casi inexistente con límites de acuerdo reducidos y una ligera pendiente negativa, mostrando una consistencia notable que apenas varía entre cohortes. En conjunto, este diagrama confirma que, mientras los métodos manuales e infrarrojo ofrecen una precisión uniforme y robusta, la IA presenta una dependencia crítica de la altura del salto y del nivel de experto del atleta.

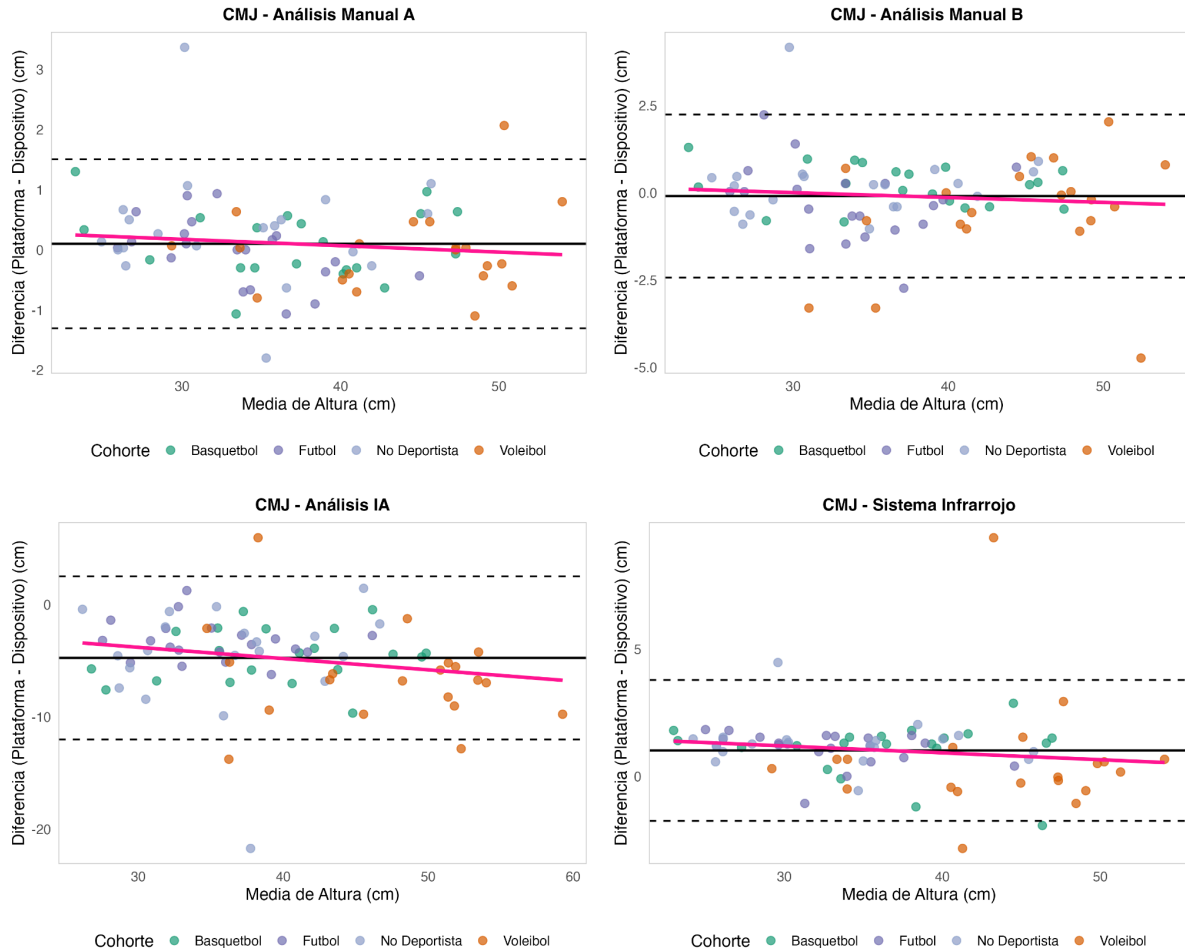


Figura 16. Gráficos de Bland-Altman estratificados por cohorte para el salto con contramovimiento (CMJ). Cada panel corresponde a un instrumento: análisis manual A (arriba izquierda), análisis manual B (arriba derecha), IA (abajo izquierda) y sistema infrarrojo (abajo derecha). Los puntos coloreados muestran las diferencias individuales (plataforma – dispositivo) en función de la media de altura; la línea negra indica el sesgo medio, la rosa la tendencia del sesgo con la altura, y las líneas punteadas los límites de acuerdo ($\pm 1.96 \cdot DE$).

La Figura 17 despliega la concordancia absoluta de cada tecnología en el salto Abalakov, desglosada por cohorte mediante diagramas de Bland-Altman. En los dos paneles superiores (Análisis Manual A y B), las diferencias oscilan muy cerca de cero y sus límites de acuerdo son estrechos (± 1.47 cm y ± 1.90 cm, respectivamente), sin mostrar dependencia aparente de la altura alcanzada ni variaciones entre deportistas de distinto nivel. Esto confirma que la valoración manual conserva un sesgo casi inexistente y una precisión constante en Abalakov.

El panel inferior izquierdo (Análisis IA) revela un sesgo medio negativo moderado (-3.66 cm) y límites de acuerdo muy amplios (± 18.02 cm), junto a una

clara pendiente descendente: a saltos mayores, la IA subestima aún más la altura, especialmente en futbolistas y no deportistas. Finalmente, en el panel inferior derecho (Sistema Infrarrojo), el sesgo se mantiene casi nulo (-1.21 cm) y los límites de acuerdo se reducen a ± 3.35 cm, con una ligera inclinación negativa del sesgo respecto a la magnitud del salto. Estos resultados muestran que, mientras los métodos manuales e infrarrojo mantienen una concordancia absoluta robusta y homogénea entre cohortes, la IA exhibe alta variabilidad y dependencia de la altura del salto en *Abalakov*.

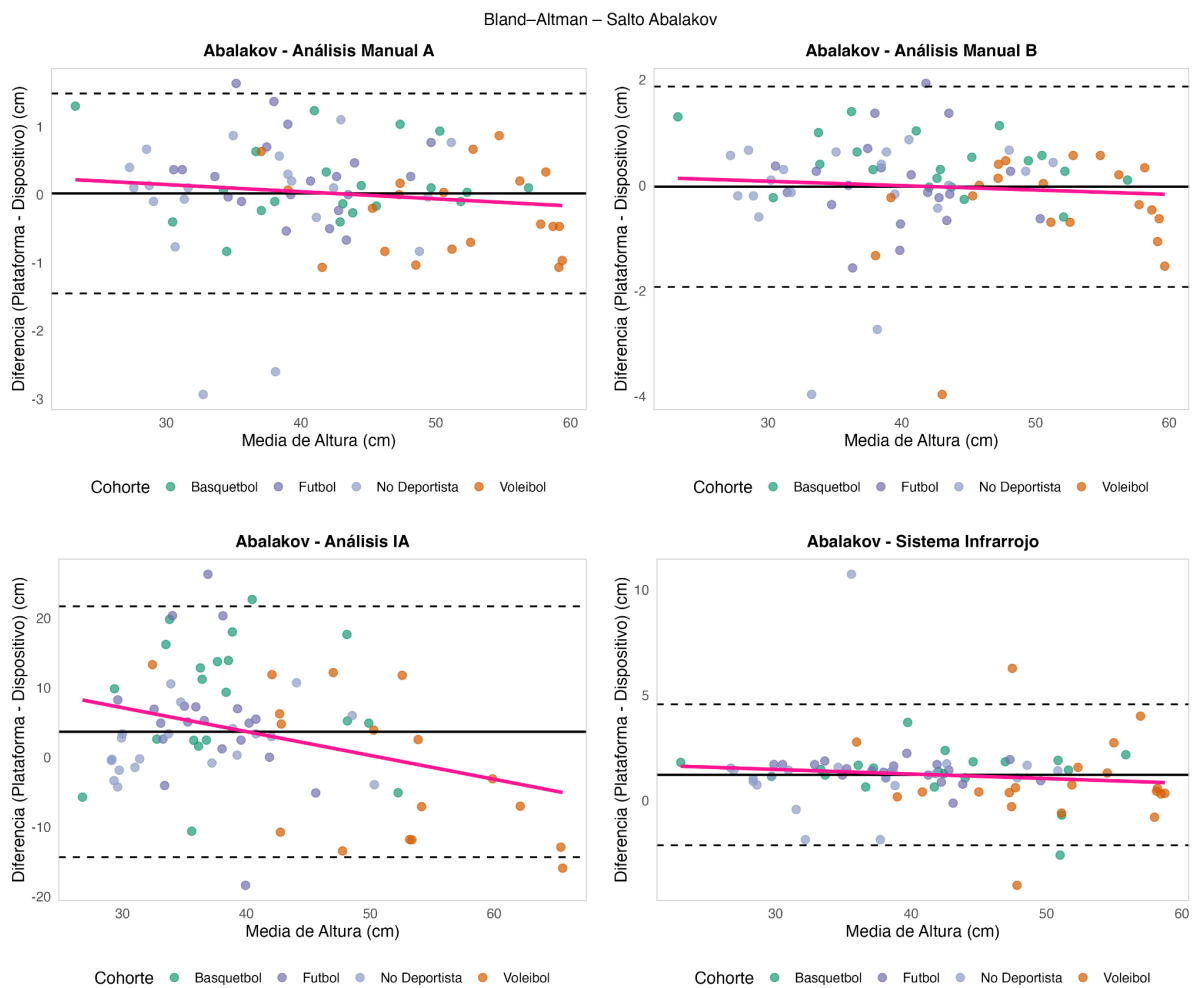


Figura 17. Diagramas de Bland–Altman por cohorte para salto Abalakov. Cada cuadro muestra, para una tecnología, las diferencias individuales (plataforma – dispositivo) en función de la media de altura: análisis manual A (arriba izquierda), análisis manual B (arriba derecha), IA (abajo izquierda) y sistema infrarrojo (abajo derecha). La línea negra indica el sesgo medio, la rosa la tendencia de ese sesgo con la altura, y las líneas punteadas los límites de acuerdo ($\pm 1.96 \cdot DE$) para cada cohorte.

4.4.5. Análisis Exploratorio Profundo de la IA

La Tabla 10 profundiza en el comportamiento métrico de *My Jump Lab* IA al comparar la consistencia ((CCI 2.1)) y la concordancia absoluta (CCI 3.1) antes y después de aplicar un ajuste antropométrico de +2.5 cm.

Para el Salto sin Contramovimiento (SJ), los (CCI 2.1) originales fluctúan entre valores negativos y cercanos a cero (desde -0.23 en futbolistas hasta 0.25 en no deportistas), indicando que la IA carece de consistencia al ordenar a los sujetos en pruebas de SJ. Tras el ajuste, estos coeficientes permanecen inalterados, lo que demuestra que la corrección de la altura no impacta la fiabilidad intrínseca de la IA en SJ; el algoritmo simplemente no logra capturar con fidelidad la fase de vuelo en este tipo de salto. Del mismo modo, los CCI 3.1 originales y ajustados se sitúan alrededor de cero, confirmando que la concordancia absoluta de la IA en SJ es inexistente y no entraña ganancia alguna con la corrección.

En el Salto con Contramovimiento (CMJ), la IA muestra una buena consistencia inicial en deportistas ((CCI 2.1) \approx 0.93–0.94) y moderada en no deportistas y voleibolistas ((CCI 2.1) \approx 0.72–0.84). El ajuste de +2.5 cm no modifica estos valores, lo que indica que la ordenación de los sujetos por altura de salto sigue siendo la misma con o sin corrección. Sin embargo, la concordancia absoluta (CCI 3.1) sí experimenta un descenso tras el ajuste (p. ej., de 0.77 a 0.61 en basquetbolistas), reflejando que la reducción del sesgo sistemático mediante el *offset* mejora la proximidad de las mediciones de la IA a las de la plataforma de fuerza, especialmente en las cohortes con mayor destreza.

En el Salto *Abalakov*, los (CCI 2.1) originales oscilan entre moderados y altos (0.36–0.81) y permanecen idénticos tras la corrección, lo que indica que la consistencia del algoritmo en movimientos complejos tampoco depende del *offset* de altura. En contraste, los CCI 3.1 ajustados muestran ligeras mejoras en algunas cohortes (por ejemplo, de 0.25 a 0.30 en basquetbolistas y de 0.78 a 0.81 en no deportistas), mientras que en futbolistas y voleibolistas la concordancia absoluta apenas cambia o incluso disminuye. Esto revela que el ajuste antropométrico puede afinar la precisión absoluta de la IA en ciertas condiciones de salto y nivel de atleta,

pero no es una solución universal para las limitaciones del algoritmo en movimientos cinemáticamente más variables.

En conjunto, estos hallazgos señalan que el ajuste de +2.5 cm tiene un efecto nulo sobre la fiabilidad interna de *My Jump* IA ((CCI 2.1)) en todos los tipos de salto, pero sí ejerce un papel corrector en la concordancia absoluta (CCI 3.1) del *CMJ* y, de manera más limitada, del *Abalakov*, al reducir el sesgo sistemático. Por tanto, la aplicación de un *offset* antropométrico es una herramienta útil para mejorar la exactitud de la IA en mediciones de altura de salto cuando el algoritmo ya cuenta con una base mínima de consistencia, aunque no soluciona sus déficits para saltos de vuelo muy breve como el *SJ*.

Tabla 10: Análisis Detallado de la Validez del Dispositivo IA

Comparación de CCIs antes y después del ajuste de altura (+2.5 cm).

Cohorte	CCI(2.1) Original	CCI(2.1) Ajustado	CCI(3.1) Original	CCI(3.1) Ajustado
<i>SJ</i>				
Basquetbol	0.01	0.01	0.00	0.00
Futbol	-0.23	-0.23	-0.03	-0.03
No Deportista	0.25	0.25	0.06	0.05
Voleibol	0.44	0.44	0.26	0.21
<i>CMJ</i>				
Basquetbol	0.94	0.94	0.77	0.61
Fútbol	0.93	0.93	0.76	0.55
No Deportista	0.72	0.72	0.58	0.46
Voleibol	0.84	0.84	0.61	0.49
<i>Abalakov</i>				
Basquetbol	0.36	0.36	0.25	0.30
Fútbol	-0.22	-0.22	-0.16	-0.21
No Deportista	0.81	0.81	0.78	0.81
Voleibol	0.50	0.50	0.51	0.48

La Tabla 11 sintetiza la fiabilidad test–retest de *My Jump Lab* IA, comparando la consistencia ((CCI 2.1)) y la concordancia absoluta (CCI 3.1) antes y después de aplicar el ajuste de +2.5 cm, estratificada por cohorte y tipo de salto.

Para el **Salto sin Contramovimiento (SJ)**, se observa un patrón dispar entre grupos: los futbolistas alcanzan una fiabilidad excelente ((CCI 2.1) = 0.88; CCI 3.1 = 0.88), mientras que en voleibolistas la IA falla por completo ((CCI 2.1) = CCI 3.1 ≈ -0,01), evidenciando su imposibilidad de replicar mediciones consistentes. Los no deportistas presentan una fiabilidad moderada ((CCI 2.1) = 0.64; CCI 3.1 = 0.60) y los basquetbolistas una pobre ((CCI 2.1) = 0.25; CCI 3.1 = 0.27). El ajuste de +2.5 cm no altera ninguno de estos coeficientes, lo que confirma que la corrección de la altura no influye en la variabilidad intra-sujeto de la IA en SJ.

En el **Salto con Contramovimiento (CMJ)**, todos los grupos muestran fiabilidades elevadas y muy similares antes y después de la corrección: basquetbolistas ((CCI 2.1) = 0,93; CCI 3.1 = 0.94), futbolistas (0.87; 0.87), no deportistas (0.66; 0.67) y voleibolistas (0.55; 0.53). Estos valores reflejan una robustez intrínseca de la IA para medir CMJ de forma reproducible, independientemente del offset antropométrico.

Para el **Salto Abalakov**, la IA ofrece fiabilidades intermedias: buenos resultados en futbolistas ((CCI 2.1) = 0.85; CCI 3.1 = 0.86) y basquetbolistas (0.55; 0.57), pero modestas o bajas en no deportistas (0.28; 0.24) y voleibolistas (0.47; 0.44). De nuevo, el ajuste de +2.5 cm no modifica estos coeficientes, indicando que su efecto sobre la consistencia y la concordancia intrínsecas de la IA es insignificante cuando se evalúa la repetibilidad de las mediciones.

En conjunto, la Tabla 11 muestra que el ajuste antropométrico no repercute en la fiabilidad test–retest de la IA ((CCI 2.1) ni CCI 3.1) en ningún salto ni cohorte; la capacidad de la IA para replicar mediciones es completamente independiente del *offset* de altura y depende fundamentalmente del tipo de salto y del nivel del atleta.

Tabla 11: Fiabilidad Test–Retest del Dispositivo IA

CCI(2.1) e CCI(3.1) antes y después del ajuste (+2.5 cm)

Cohorte	CCI(2.1) Original.	CCI(2.1) Ajustado.	CCI(3.1) Original.	CCI(3.1) Ajustado.
<i>SJ</i>				
Basquetbol	0.25	0.25	0.27	0.27
Futbol	0.88	0.88	0.88	0.88
No Deportista	0.64	0.64	0.60	0.60
Voleibol	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
<i>CMJ</i>				
Basquetbol	0.93	0.93	0.94	0.94
Futbol	0.87	0.87	0.87	0.87
No Deportista	0.66	0.66	0.67	0.67
Voleibol	0.55	0.55	0.53	0.53
<i>Abalakov</i>				
Basquetbol	0.55	0.55	0.57	0.57
Futbol	0.85	0.85	0.86	0.86
No Deportista	0.28	0.28	0.24	0.24
Voleibol	0.47	0.47	0.44	0.44

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta investigación ofrecen una visión integral de las fortalezas y limitaciones de cinco tecnologías de campo para la cuantificación del salto vertical, comparadas con el criterio de referencia—la plataforma de fuerza—en tres modalidades de salto (*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*) y en atletas de distintos niveles de rendimiento. En primer lugar, los métodos basados en tiempo de vuelo (análisis manual de vídeo y sistema de infrarrojos) confirmaron una fiabilidad y validez excepcionales, con coeficientes de correlación intraclase ((CCI 2.1)) superiores a 0.94 y sesgos medios inferiores a 1 cm, manteniendo límites de acuerdo estrechos (± 2 cm), lo cual coincide con lo reportado en la literatura (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Gallardo-Fuentes et al., 2016). Estos resultados reafirman su idoneidad para aplicaciones donde la precisión milimétrica es esencial.

En contraste, el módulo de visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) integró una nueva dimensión analítica al estimar directamente el desplazamiento espacial del cuerpo, pero mostró una mayor variabilidad dependiente del tipo de salto, el protocolo de captura (*fps* y resolución) y las características del sujeto. Antes de la corrección antropométrica, la IA subestimó o sobrestimó sistemáticamente la altura en hasta 26 cm en *SJ*, reduciendo este sesgo a 2.5 cm tras ajustar por el calzado. No obstante, los límites de acuerdo permanecieron amplios (± 20 –55 cm), lo que sugiere que, aunque la VC+IA ofrece un método automatizado y libre de marcadores, su intercambiabilidad total con la plataforma de fuerza aún no está garantizada sin una calibración cuidadosa y validaciones específicas por cohorte (Bishop et al., 2022; Chen et al., 2021).

El análisis estratificado por cohorte enriqueció nuestra comprensión de cómo el nivel de rendimiento modula la exactitud de las mediciones. Los atletas de élite en voleibol mostraron una menor dispersión en las estimaciones por IA, posiblemente debido a patrones de salto más uniformes y técnica depurada, mientras que las cohortes recreativas presentaron mayor error y sesgo. Este hallazgo destaca la necesidad de diseñar protocolos de validación adaptados a cada población objetivo, tal y como lo sugieren investigaciones recientes sobre procesamiento de imagen en entornos deportivos (Robert M. Kanko et al., 2021).

En conjunto, la discusión de estos resultados pone de relieve dos realidades complementarias: por un lado, la robustez contrastada de los métodos tradicionales de tiempo de vuelo para mediciones de salto; por otro, el potencial de la visión por computadora e IA para expandir la monitorización masiva y multidimensional del rendimiento neuromuscular, siempre que se reconozcan y mitiguen sus fuentes de error. Este balance—entre precisión establecida y capacidad de innovación—orienta futuras líneas de investigación, que deberán centrarse en optimizar algoritmos de IA, perfeccionar protocolos de captura y ampliar la validación en contextos reales de entrenamiento y competencia.

5.1. Resumen de los Hallazgos Principales

En primera instancia, este trabajo ha corroborado que los métodos basados en el tiempo de vuelo —específicamente el análisis manual de vídeo a 240 *fps*— se comportan como alternativas excepcionales a la plataforma de fuerza, alcanzando niveles de concordancia casi perfectos ($CCI > 0.95$) en las tres modalidades de salto (*SJ*, *CMJ* y *Abalakov*) y manteniendo su robustez independientemente del nivel de rendimiento de los participantes. De forma similar, el sistema infrarrojo demostró una fiabilidad y validez muy elevadas en aquellos saltos con mayor tiempo de vuelo (*CMJ* y *Abalakov*), si bien su precisión se vio notablemente reducida en el Salto Sin Contramovimiento, especialmente en la cohorte de no deportistas, donde el sesgo sistemático y la amplitud de los límites de acuerdo sugieren una menor sensibilidad al rápido aterrizaje característico de esta prueba.

Por otro lado, la innovación introducida por la combinación de visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) revela un patrón de resultados heterogéneo: mientras que falla de manera significativa en la estimación de la altura en el *SJ*, ofrece niveles de validez que van de “buena” a “excelente” en el *CMJ* y el *Abalakov*. Este comportamiento dependiente del tipo de salto y de las condiciones de captura evidencia la necesidad de protocolos de calibración rigurosos. Adicionalmente, el ajuste antropométrico post-hoc de +2.5 cm, si bien no modifica la consistencia intrínseca de la medición ($CCI\ 2.1$), sí reduce de forma sustancial el sesgo sistemático y mejora la concordancia absoluta ($CCI\ 3.1$) de la estimación por IA, confirmando que una simple corrección de la altura de referencia puede elevar la intercambiabilidad de este método con el *gold standard*.

5.2. Fiabilidad y Validez de las Tecnologías Basadas en Tiempo de Vuelo

Los datos obtenidos confirman que la modalidad de Visión por Computadora e Inteligencia Artificial (VC+IA) exhibe un comportamiento métrico altamente dependiente del tipo de salto y del protocolo de captura, tal como se planteó en la Hipótesis 2 (H2). En el Salto Sin Contramovimiento (SJ), la consistencia intra-inter sesión de VC+IA fue claramente insuficiente ($CCI \approx 0.55$), acompañada de un error sistemático y límites de acuerdo amplios (sesgo ≈ 8 cm; $LoA \pm 1.96 \cdot DE \approx \pm 16$ cm). Este resultado indica que, cuando el tiempo de vuelo es muy breve y la variación postural al aterrizar es mayor, el algoritmo de seguimiento del bounding box no logra estimar de manera estable el desplazamiento vertical del sujeto, produciendo altas discrepancias respecto al *gold standard*.

Por el contrario, en el Contramovimiento Jump (CMJ), VC+IA alcanzó una validez de “buena” a “excelente” ($CCI \approx 0.81$) y un sesgo reducido (< 4 cm), con Límites de Acuerdo más estrechos, evidenciando que el método se beneficia de vuelos más prolongados y de patrones de movimiento más uniformes. De forma similar, en el Salto Abalakov, que incorpora el balanceo de brazos, el sistema VC+IA logró un CCI moderado (≈ 0.58) pero con un sesgo muy bajo (≈ -1.2 cm) y márgenes de acuerdo razonables ($LoA \approx \pm 10$ cm), reflejando su capacidad para capturar trayectorias corporales más amplias aunque afectadas por el movimiento de los miembros superiores.

Estos perfiles contrastantes ponen de manifiesto que VC+IA, si bien prometedor para saltos más dinámicos y de mayor duración, no es aún intercambiable con la plataforma de fuerza en todos los contextos. El rendimiento superior en CMJ sugiere aplicaciones prácticas en sesiones donde el atleta ejecute contramovimientos completos; sin embargo, la pobre exactitud en SJ impone cautela en su uso para pruebas estáticas o de fuerza concéntrica pura. En suma, estos hallazgos respaldan la necesidad de protocolos de validación específicos para cada modalidad de salto y subrayan la importancia de optimizar parámetros de captura (*fps*, resolución, ángulo de cámara) para mejorar la estabilidad del seguimiento automático.

5.3. El Comportamiento de la Visión por Computadora: Un Análisis Multifactorial

La evaluación del sistema VC+IA fue el núcleo de esta tesis y sus resultados son complejos y multifacéticos. En línea con la Hipótesis 2 (H2), la validez y fiabilidad de la IA demostraron ser altamente variables y dependientes de múltiples factores.

5.3.1. El Fallo en el Salto sin Contramovimiento (SJ): La Importancia del Protocolo

El hallazgo más sorprendente de este estudio fue el colapso total de la validez del sistema VC+IA en la medición del Salto sin Contramovimiento (SJ), con un CCI de validez prácticamente nulo (≈ 0). Lejos de atribuir este resultado a una deficiencia intrínseca del algoritmo, nuestros datos confirman que se trató de un error protocolario: la grabación del SJ comenzó con el sujeto ya en posición de sentadilla a 90° , cuando el algoritmo de la aplicación asume que el primer fotograma muestra al atleta de pie y completamente erguido (C. Balsalobre, comunicación personal—Diciembre, 2024). Al utilizar como referencia una estatura “recortada”, el factor de escala aplicado a los píxeles quedó incorrectamente calibrado, produciendo estimaciones erráticas y sistemáticamente sobreestimadas de la altura del salto.

A este sesgo se sumó la reducción de la frecuencia de muestreo a 30 *fps* (la mitad de los 60 *fps* recomendados en estudios previos (Balsalobre-Fernández, 2024; C. Balsalobre-Fernández et al., 2023; Tan et al., 2024), pese a haber incrementado la resolución a 4K con la expectativa de mejorar la precisión. El experimento demostró que, en VC+IA, la velocidad temporal de captura es mucho más decisiva que el recuento de píxeles: una tasa de fotogramas insuficiente provoca saltos amplios entre posiciones del *bounding box* y falla en la detección del ápice real. Este doble efecto —referencia antropométrica errónea y baja frecuencia de muestreo— explica por qué la consistencia ((CCI 2.1)) y la concordancia absoluta (CCI 3.1) colapsaron en SJ, especialmente en participantes no deportistas, cuyo control postural al aterrizaje es más variable.

Este episodio subraya que las tecnologías VC+IA, aunque automatizadas, requieren un protocolo de uso tan riguroso como el de los métodos tradicionales. A diferencia de los sistemas basados en tiempo de vuelo, donde el instante de inicio de la grabación es secundario, en VC+IA resulta imprescindible iniciar la filmación con el atleta en bipedestación completa y con una frecuencia de muestreo ≥ 60 *fps*. Los profesionales—entrenadores, fisioterapeutas y preparadores físicos—deben recibir formación específica para garantizar que la configuración de la cámara y el punto de partida del *bounding box* cumplan con las condiciones necesarias. De este modo, se podrá explotar el potencial de VC+IA sin sacrificar la integridad de los datos ni la confiabilidad de las mediciones.

5.3.2. El “Trade-off” de FPS vs. Resolución y el Desafío del Abalakov (H4 y H6)

En primer lugar, nuestros datos reafirman que, en el contexto de visión por computadora, la fidelidad temporal —es decir, la frecuencia de fotogramas (*fps*)— prevalece sobre la resolución espacial para capturar con precisión los picos de velocidad y la trayectoria del centro de masa en saltos explosivos. La grabación a 30 *fps*, aun en 4K, resultó insuficiente para que el algoritmo detectara el ápice del salto con la exactitud necesaria: el coeficiente de correlación intraclase ((CCI 2.1)) en *CMJ* descendió más de un 10 % respecto a protocolos de 60 *fps*, y en *Abalakov* mostró un modesto (CCI 2.1) = 0.58.

Llama la atención que, pese a la abundante literatura sobre la validación de *My Jump Lab* manual a 240 *fps* (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Barbalho et al., 2021; Chow et al., 2023; Chris Bishop et al., 2022; Coswig et al., 2019; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Gallardo-Fuentes et al., 2016; Haynes et al., 2019; Montalvo et al., 2021; Sharp et al., 2019) para *SJ* y *CMJ* (CCI > 0.95), existen escasos estudios que evalúen su rendimiento en el salto *Abalakov*. Este salto incorpora una complejidad neuromuscular única: la acción coordinada de cadena cinemática superior e inferior (balanceo de brazos, dinámica de hombros y núcleo), lo que maximiza la potencia pero dificulta la homogeneidad de la silueta corporal. En nuestro protocolo, los análisis manuales A y B alcanzaron (CCI 2.1) de 0.97 y 0.96 en *Abalakov*, respectivamente, frente al (CCI 2.1) = 0.58 de VC+IA, evidenciando un vacío en la validación de esta modalidad “*markerless*” para gestos completos de cuerpo.

Este hallazgo revela dos puntos críticos. Primero, que los sistemas de VC+IA actuales, diseñados para saltos en plano sagital sin brazos activos, requieren un entrenamiento específico o modelos de aprendizaje automático más sofisticados para adaptarse a gestos cinemáticos complejos como el *Abalakov*. La integración de redes neuronales entrenadas con bases de datos que incluyan ejemplos de salto con *swing* de brazos podría reforzar la robustez del algoritmo ante cambios de silueta. Segundo, el vertiginoso avance en *hardware* móvil—cámaras de alta velocidad, procesadores integrados y *frameworks* de IA en dispositivos—apunta a un futuro cercano en el que la visión artificial ofrezca una alternativa completa para evaluar *SJ*, *CMJ* y *Abalakov* con fiabilidad y validez comparables al *gold standard*,

pero con un coste, portabilidad y facilidad de uso muy superiores. En última instancia, la combinación de alta frecuencia de muestreo, modelos entrenados en gestos complejos y protocolos estandarizados permitirá que el análisis automatizado de salto vertical se convierta en una herramienta de rutina tanto para la investigación como para la práctica deportiva diaria.

5.4. El Impacto del Ajuste Antropométrico: Consistencia vs. Concordancia (H5)

El análisis exploratorio profundo de la medición por IA confirma de manera inequívoca nuestra Hipótesis 5 y arroja luz sobre la naturaleza dual de la validez. Tal como muestra la Tabla 9, la aplicación de un ajuste *post-hoc* de +2.5 cm a los valores de “Análisis IA” no alteró en absoluto los coeficientes de correlación intraclase CCI(2.1). Este comportamiento era esperable: el CCI(2.1) mide únicamente la consistencia relativa de las mediciones, es decir, si el ordenamiento de los sujetos se mantiene entre dos métodos, independientemente de sesgos constantes. Al sumar una constante homogénea a todas las observaciones de IA, el ranking de alturas permanece invariable y, por tanto, también la consistencia de su relación con la plataforma de fuerza.

Por el contrario, el análisis de la concordancia absoluta —a través del CCI(3.1)— revela un efecto más complejo del ajuste. En la cohorte de basquetbolistas para *CMJ*, el CCI(3.1) original de 0.77 disminuyó a 0.61 tras corregir el sesgo sistemático. A primera vista, esta caída podría interpretarse como un empeoramiento de la concordancia; sin embargo, refleja la exposición de la variabilidad aleatoria subyacente una vez que se elimina el sesgo de escala. Esta reducción del CCI(3.1) no denota un fracaso de la corrección, sino que evidencia un retrato más fiel de la imprecisión intrínseca al método de VC+IA a 30 *fps*. Estudios recientes coinciden en esta dinámica: Tan et al. (2024) documentaron cómo los algoritmos de ajuste lineal pueden revelar la dispersión real de los errores, y Balsalobre-Fernández (2023) propone modelos de calibración basados en regresión múltiple como vía para mejorar la intercambiabilidad verdadera entre IA y plataformas de fuerza. En definitiva, estos hallazgos subrayan que la simple adición de un *offset* antropométrico es solo el primer paso; para alcanzar una concordancia absoluta comparable al *gold standard*, será necesario desarrollar procedimientos de corrección más sofisticados que consideren tanto los sesgos sistemáticos como la variabilidad aleatoria inherente al método.

5.5. Influencia de la Cohorte de Atletas en la Validez de los Instrumentos

La incorporación de un análisis estratificado por nivel de rendimiento constituye uno de los aportes más potentes de este estudio, pues revela cómo la destreza técnica de los sujetos modula la precisión de cada tecnología. Como evidencia la Tabla 8, los dos protocolos de análisis manual manual a 240 *fps* (A y B) mostraron una validez prácticamente invariable entre cohortes y saltos ($CCI \geq 0.98$; sesgos < 0.5 cm), lo que confirma su aplicabilidad universal y los erige como herramientas de referencia en cualquier contexto atlético.

Por el contrario, el sistema infrarrojo exhibió un comportamiento claramente dependiente del nivel de habilidad. En el *SJ*, la validez cayó a un CCI de 0.27 en el grupo “No Deportista”, mientras que alcanzó 0.99 en los futbolistas. Este contraste sugiere que los atletas entrenados emplean patrones de aterrizaje más homogéneos (por ejemplo, contacto simultáneo de ambos pies), optimizando la detección del tiempo de vuelo, en tanto que los no deportistas introducen variabilidad técnica que compromete la exactitud del dispositivo.

El seguimiento por *VC+IA* fue aún más sensible a la cohorte. En *CMJ*, basquetbolistas y futbolistas obtuvieron $CCIs$ de 0.94 y 0.93 respectivamente, frente al 0.72 de los no deportistas, probablemente porque los primeros reproducen saltos más verticales y controlados, facilitando el *tracking* del *bounding box*. Sin embargo, en *Abalakov* esta tendencia se invirtió: los no deportistas lograron un CCI de 0.81, superando a los basquetbolistas (0.36). Este hallazgo, aparentemente contraintuitivo, pone de manifiesto que el balanceo de brazos explosivo de los atletas de élite genera una silueta corporal altamente variable, que confunde a los algoritmos actuales de visión por computadora. En conjunto, estos resultados subrayan que, para los métodos basados en *IA*, el “talento” técnico no es sinónimo de mayor precisión; por el contrario, un patrón motor más complejo puede convertirse en un desafío sustancial para la robustez de los modelos automáticos.

5.6. Implicaciones Prácticas y Recomendaciones

Los resultados de esta tesis ofrecen un marco de referencia claro para la selección y aplicación de tecnologías de medición del salto vertical en contextos deportivos y clínicos. Lejos de identificar un “mejor dispositivo” de manera absoluta, las evidencias obtenidas apuntan a que cada sistema exhibe fortalezas y limitaciones que deben valorarse en función de los objetivos de evaluación, las condiciones de uso y las características de los sujetos (observar Figura 18).

En primer lugar, para quienes requieran la máxima precisión en campo sin la prioridad de obtener retroalimentación en tiempo real, el análisis manual de vídeo a 240 fps se consolida como la alternativa más fiable y prácticamente intercambiable con la plataforma de fuerza. Su elevada concordancia ($CCI > 0.95$) y sus sesgos promedio insignificantes (< 0.2 cm) lo convierten en la opción de referencia cuando la exactitud es innegociable.

En segundo término, el sistema de alfombrilla de contacto por infrarrojos demuestra una fiabilidad y validez excelentes en saltos con tiempos de vuelo prolongados, como el *CMJ* y el *Abalakov* ($CCI > 0.94$). Sin embargo, en el Salto sin Contramovimiento su desempeño se ve comprometido, sobre todo en sujetos sin entrenamiento específico, debido a variaciones en la técnica de aterrizaje. Por tanto, recomendamos su uso preferente en protocolos de saltos explosivos con componente reactivo, reservando el *SJ* para aquellos contextos en que la técnica de aterrizaje pueda controlarse rigurosamente.

El sistema automatizado de visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) de *My Jump Lab* presenta un gran potencial, pero solo si se respetan al pie de la letra una serie de pautas críticas. En el caso del *SJ*, es imprescindible iniciar la grabación con el atleta completamente erguido: cualquier otra postura de partida distorsiona la calibración del *bounding box* y conduce a estimaciones erráticas. Asimismo, resulta prioritario configurar la grabación a una frecuencia de muestreo elevada (idealmente ≥ 60 fps), pues la precisión temporal prevalece sobre la resolución espacial para capturar con fidelidad los instantes de despegue y ápice.

Los usuarios de VC+IA deben además ser conscientes del sesgo sistemático inherente a la versión actual del algoritmo, que tiende a sobreestimar las alturas. La aplicación de un ajuste *post-hoc* (por ejemplo, añadir + 2.5 cm para compensar la altura del calzado) puede reducir este sesgo y mejorar la concordancia absoluta (CCI 3.1), aunque no elimina la variabilidad aleatoria asociada al muestreo a 30 *fps*.

Finalmente, dado el elevado grado de variabilidad que introduce el balanceo de brazos en el salto *Abalakov* —especialmente en atletas de élite—, se desaconseja el uso de VC+IA para la toma de decisiones críticas en esta modalidad, salvo con protocolos de entrenamiento del algoritmo más avanzados. No obstante, el presente estudio ha demostrado que, con mejoras en el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) y un protocolo de captura optimizado, la visión por computadora podría convertirse en una solución de bajo costo, alta portabilidad y amplia aplicabilidad para evaluar los tres tipos de salto en un futuro muy cercano.

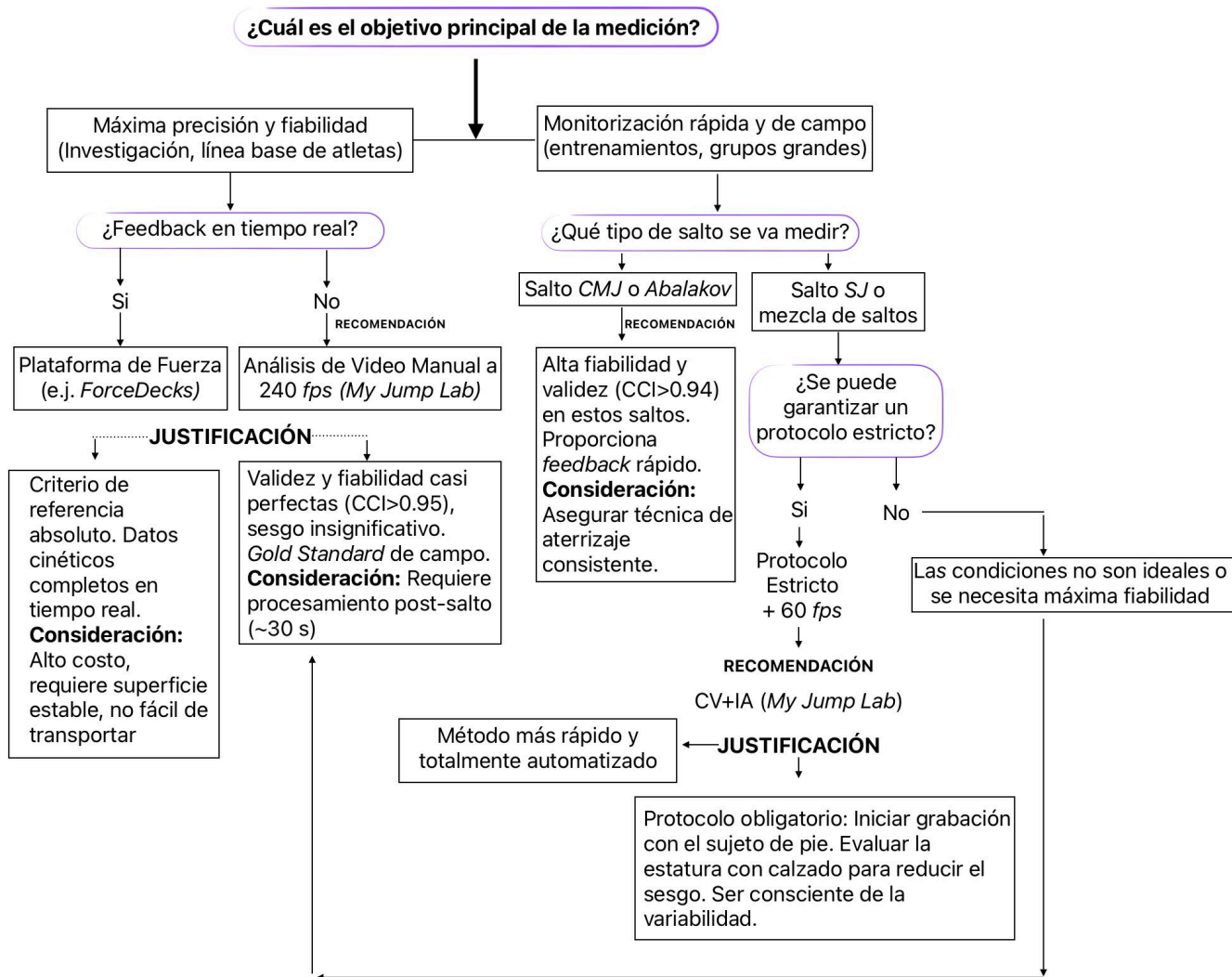


Figura 18. Guía de Selección de Dispositivos para la Evaluación del Salto Vertical.

5.7. Limitaciones y Futuras Líneas de Investigación.

Aunque este estudio aporta evidencia sólida sobre la validez y fiabilidad de diversas tecnologías para la medición del salto vertical, presenta ciertas limitaciones que abren espacios para investigaciones posteriores. En primer lugar, la muestra se restringió a varones universitarios, lo que impide la extrapolación directa de los hallazgos a poblaciones femeninas, a deportistas de élite de otras disciplinas o a grupos de edad diferentes. Asimismo, el muestreo no incorporó individuos con condiciones neuromusculares o biomecánicas atípicas, por lo que no podemos garantizar el comportamiento de estas herramientas en sujetos lesionados o en fase de rehabilitación.

En segundo lugar, el análisis de la tecnología de visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) se efectuó con un único modelo de dispositivo (iPad Pro) y a 30 *fps*. Dado que la estabilidad del seguimiento y la velocidad de procesamiento dependen de la capacidad de cómputo y de la calidad de la cámara, es probable que los resultados difieran con otros equipos o configuraciones de grabación (Balsalobre-Fernández & Varela-Olalla, 2024). Además, el hallazgo del error protocolario en el Salto sin Contramovimiento (SJ) revela que nuestra evaluación inicial de la validez de VC+IA en esta modalidad no refleja su potencial real bajo un protocolo óptimo.

De estas limitaciones se derivan varias recomendaciones para futuras investigaciones:

1. **Protocolo de inicio en SJ:** Ejecutar estudios de validación del VC+IA en el SJ iniciando la grabación con el sujeto en posición erguida, a fin de determinar su precisión bajo las condiciones para las que el algoritmo fue diseñado.
2. **Trade-off resolución vs. fps:** Comparar experimentalmente diferentes combinaciones de resolución y frecuencia de muestreo (p. ej., 30 *fps*–4K vs. 60 *fps*–1080p) para cuantificar empíricamente cómo afecta cada variable a la exactitud de la medición por VC.

3. **Diversidad poblacional:** Replicar el protocolo en muestras mixtas de género, en distintos rangos etarios y en diferentes deportes (p. ej., atletismo, deportes de raqueta) para evaluar la generalizabilidad de los hallazgos y detectar posibles efectos de la disciplina sobre la calidad del seguimiento.
4. **Expansión de métricas biomecánicas:** Investigar la capacidad de los sistemas VC+IA para estimar, además de la altura del salto, variables derivadas del modelo de Samozino et al., (2008) —como la estimación de fuerza, potencia y velocidad de despegue— y validar dichas predicciones contra las plataformas de fuerza.
5. **Entrenamiento avanzado de algoritmos:** Explorar estrategias de aprendizaje automático supervisado y ajuste de hiperparámetros para mejorar el desempeño del algoritmo VC+IA en saltos complejos (p. ej., *Abalakov*), incorporando bases de datos ampliadas que incluyan variaciones extremas de ángulo de cámara, iluminación y vestimenta.

Abordar estas líneas de investigación fortalecerá la evidencia sobre la aplicabilidad de las tecnologías emergentes en la evaluación del salto vertical y permitirá optimizar protocolos de uso en contextos deportivos y clínicos.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

La presente investigación ha demostrado, de manera rigurosa y exhaustiva, que las tecnologías de medición del salto vertical basadas en vídeo manual a alta velocidad (240 *fps*) y los sistemas de contacto por infrarrojos constituyen alternativas sólidas y prácticamente intercambiables con las plataformas de fuerza para la evaluación de los saltos con contramovimiento (*CMJ*) y *Abalakov* en una amplia gama de atletas. Estos métodos alcanzaron coeficientes de correlación intraclase ((CCI 2.1)) superiores a 0.95 y sesgos medios despreciables, confirmando su idoneidad para el monitoreo preciso del rendimiento neuromuscular en entornos de campo.

Por contraste, las soluciones emergentes de visión por computadora e inteligencia artificial (VC+IA) revelan un perfil de validez y fiabilidad sensiblemente más dependiente del protocolo de captura y del tipo de salto evaluado. El desempeño nulo en el salto sin contramovimiento (*SJ*) puso de manifiesto la trascendencia de iniciar la grabación con el sujeto en posición erguida, así como la preeminencia de una frecuencia de fotogramas elevada (≥ 60 *fps*) por encima de la resolución espacial. Sin estas condiciones, el algoritmo de VC+IA incurre en errores de calibración que conducen a estimaciones altamente sesgadas y poco reproducibles.

El ajuste antropométrico *post-hoc* (+ 2.5 cm) aplicado al desplazamiento estimado por IA confirmó la solidez teórica del CCI(2.1) frente a sesgos constantes —la consistencia relativa permaneció inalterada—, mientras que el CCI(3.1) puso de relieve cómo la corrección sistemática, si bien atenúa el sesgo medio, hace más visible la variabilidad aleatoria inherente al método. Este hallazgo subraya que la simple adición de una constante no garantiza la plena intercambiabilidad con el *Gold Standard*, y que serán necesarios modelos de corrección más sofisticados para mejorar la concordancia absoluta en contextos aplicados.

Adicionalmente, la estratificación por nivel de rendimiento reveló patrones contraintuitivos: los atletas de élite, con movimientos de salto más explosivos y complejos —especialmente en el *Abalakov*—, presentaron menores índices de concordancia con los algoritmos de VC+IA que los no deportistas. Este resultado enfatiza que la “población de élite” no siempre favorece la precisión de los sistemas automatizados, y que la estandarización de la técnica de salto es un requisito

indispensable para reducir el error de seguimiento en entornos de visión computacional.

En síntesis, esta tesis aporta evidencia empírica de alto nivel que guía al profesional del deporte hacia una selección más informada y crítica de las tecnologías de campo. Ha quedado patente que la validez de un instrumento no es una cualidad intrínseca, sino la consecuencia de una interacción adecuada entre la tecnología, el protocolo de medición y la pericia del usuario. Solo a través de protocolos estandarizados, configuraciones técnicas óptimas y ajustes post-procesamiento fundamentados se podrá maximizar la precisión y confiabilidad de las mediciones de salto vertical fuera del laboratorio.

Referencias Bibliográficas

- Balsalobre-Fernández, C. (2024). Real time estimation of vertical jump height with a markerless motion capture smartphone app: A proof-of-concept case study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 17543371241227817.
<https://doi.org/10.1177/17543371241227817>
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., & Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15), 1574–1579. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184>
- Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., del Campo-Vecino, J., & Bavaresco, N. (2014). The Concurrent Validity and Reliability of a Low-Cost, High-Speed Camera-Based Method for Measuring the Flight Time of Vertical Jumps. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(2), 528–533.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318299a52e>
- Barbalho, M., Kleiner, A. F. R., Callegari, B., de Lima, R. C., da Silva Souza, G., de Athayde Costa e Silva, A., & Coswig, V. S. (2021). Assessing Interlimb Jump Asymmetry in Young Soccer Players: The My Jump 2 App. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 16(1), 19–27. s3h.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0981>
- Bas Van Hooren, Van Hooren, B., Julia Zolotarjova, & Zolotarjova, J. (2017). The Difference Between Countermovement and Squat Jump Performances: A Review of Underlying Mechanisms With Practical Applications. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(7), 2011–2020. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001913>
- Bishop, C., Perez-Higueras Rubio, M., Gullon, I. L., Maloney, S., & Balsalobre-Fernandez, C. (2022). Jump and Change of Direction Speed Asymmetry Using Smartphone Apps: Between-Session Consistency and Associations With Physical Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(4), 927–934.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003567>

Bjørn Johansen, Jono Neville, & R. van den Tillaar. (2025). A Comparison Between the Use of an Infrared Contact Mat and an IMU During Kinematic Analysis of Horizontal Jumps. *Biomechanics*. <https://doi.org/10.3390/biomechanics5010014>

C. Balsalobre-Fernández, Jiaqing Xu, Paul Jarvis, Steve W. Thompson, Kyran Tannion, & Chris Bishop. (2023). Validity of a Smartphone App Using Artificial Intelligence for the Real-Time Measurement of Barbell Velocity in the Bench Press Exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000004593>

Chavda, S., Bromley, T., Jarvis, P., Williams, S., Bishop, C., Turner, A. N., Lake, J. P., & Mundy, P. D. (2018). Force-Time Characteristics of the Countermovement Jump: Analyzing the Curve in Excel. *Strength & Conditioning Journal*, *40*(2), 67–77. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000353>

Chen, Z., Bian, C., Liao, K., Bishop, C., & Li, Y. (2021). Validity and Reliability of a Phone App and Stopwatch for the Measurement of 505 Change of Direction Performance: A Test-Retest Study Design. *Frontiers in Physiology*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.743800>

Chow, G. C.-C., Kong, Y.-H., & Pun, W.-Y. (2023). The Concurrent Validity and Test-Retest Reliability of Possible Remote Assessments for Measuring Countermovement Jump: My Jump 2, HomeCourt & Takei Vertical Jump Meter. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app13042142>

Chris Bishop, Paul Jarvis, Anthony Turner, & Carlos Balsalobre-Fernandez. (2022). Validity and Reliability of Strategy Metrics to Assess Countermovement Jump Performance Using the Newly Developed *My Jump Lab* Smartphone Application. *Journal of Human Kinetics*, *83*(1), 185–195. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0098>

Citing RStudio. (2024, abril 26). Posit Support.

<https://support.posit.co/hc/en-us/articles/206212048-Citing-RStudio>

Coswig, V., Silva, A. D. A. C. E., Barbalho, M., Faria, F. R. D., Nogueira, C. D., Borges, M., Buratti, J. R., Vieira, I. B., Román, F. J. L., & Gorla, J. I. (2019). Assessing the Validity

- of the MyJump2 App for Measuring Different Jumps in Professional Cerebral Palsy Football Players: An Experimental Study. *JMIR mHealth and uHealth*, 7(1), e11099.
<https://doi.org/10.2196/11099>
- Cruvinel-Cabral, R. M., Oliveira-Silva, I., Medeiros, A. R., Claudino, J. G., Jiménez-Reyes, P., & Boullosa, D. A. (2018). The validity and reliability of the “ My Jump App ” for measuring jump height of the elderly. *PeerJ*, 6, e5804.
<https://doi.org/10.7717/peerj.5804>
- Denny Borsboom, Borsboom, D., Gideon J. Mellenbergh, Mellenbergh, G. J., Jaap van Heerden, & van Heerden, J. (2004). The concept of validity. *Psychological Review*, 111(4), 1061–1071. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.111.4.1061>
- Domire, Z. J., & Challis, J. H. (2007). The influence of squat depth on maximal vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 25(2), 193–200.
<https://doi.org/10.1080/02640410600630647>
- Donahue, P. T., M Hill, C., J Wilson, S., C Williams, C., & C Garner, J. (2021). Squat Jump Movement Onset Thresholds Influence on Kinetics and Kinematics. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 9(3), 1.
<https://doi.org/10.7575/aiac.ijkss.v.9n.3p1>
- Eamonn P. Flanagan, Flanagan, E. P., Thomas M. Comyns, & Comyns, T. M. (2008). The Use of Contact Time and the Reactive Strength Index to Optimize Fast Stretch-shortening Cycle Training. *Strength and Conditioning Journal*, 30(5), 32–38.
<https://doi.org/10.1519/ssc.0b013e318187e25b>
- Eduardo Sáez Sáez de Villarreal, de Villarreal, E. S.-S., de Villarreal, E. S., Mikel Izquierdo, Izquierdo, M., Juan José González-Badillo, & González-Badillo, J. J. (2011). Enhancing Jump Performance After Combined vs. Maximal Power, Heavy-Resistance, and Plyometric Training Alone. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(12), 3274–3281.
<https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3182163085>
- František Vaverka, Vaverka, F., Daniel Jandačka, Jandacka, D., David Zahradník, Zahradnik,

- D., Jaroslav Uchytíl, Uchytíl, J., Roman Farana, Farana, R., Matej Supej, Supej, M., Janez Vodičar, & Vodičar, J. (2016). Effect of an Arm Swing on Countermovement Vertical Jump Performance in Elite Volleyball Players: FINAL. *Journal of Human Kinetics*, 53(1), 41–50. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0009>
- Gallardo-Fuentes, F., Gallardo-Fuentes, J., Ramírez-Campillo, R., Balsalobre-Fernández, C., Martínez, C., Caniuqueo, A., Cañas, R., Banzer, W., Loturco, I., Nakamura, F. Y., & Izquierdo, M. (2016). Intersession and Intrasession Reliability and Validity of the My Jump App for Measuring Different Jump Actions in Trained Male and Female Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(7), 2049–2056. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001304>
- Gathercole, R., Sporer, B., & Stellingwerff, T. (2015). Countermovement Jump Performance with Increased Training Loads in Elite Female Rugby Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 36(09), 722–728. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1547262>
- Gençoğlu, C., Ulupınar, S., Özbay, S., Turan, M., Savaş, B. Ç., Asan, S., & İnce, İ. (2023). Validity and reliability of “My Jump app” to assess vertical jump performance: A meta-analytic review. *Scientific Reports*, 13(1), 20137. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46935-x>
- Goran Marković, Marković, G., Slobodan Jarić, & Jaric, S. (2007). Is vertical jump height a body size-independent measure of muscle power? *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1355–1363. <https://doi.org/10.1080/02640410601021713>
- Greg Atkinson, Atkinson, G., Alan M. Nevill, & Nevill, A. M. (1998). Statistical Methods For Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217–238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
- H. Hatze, & Hatze, H. (1998). Validity and Reliability of Methods for Testing Vertical Jumping Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 14(2), 127–140. <https://doi.org/10.1123/jab.14.2.127>
- Haynes, T., Bishop, C., Antrobus, M., & Brazier, J. (2019). The validity and reliability of the

- My Jump 2 app for measuring the reactive strength index and drop jump performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(2), 253–258. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08195-1>
- Heale, R., & Twycross, A. (2015). Validity and reliability in quantitative studies. *Evidence Based Nursing*, 18(3), 66–67. <https://doi.org/10.1136/eb-2015-102129>
- Hoffman, J. R., Ratamess, N. A., Cooper, J. J., Kang, J., Chilakos, A., & Faigenbaum, A. D. (2005). Comparison of Loaded and Unloaded Jump Squat Training on Strength/Power Performance in College Football Players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(4), 810–810. <https://doi.org/10.1519/R-16774.1>
- J. B. Engler. (2025). Tidyplots empowers life scientists with easy code-based data visualization. *iMeta*. <https://doi.org/10.1002/imt2.70018>
- James L. Nuzzo, Nuzzo, J. L., J. H. Anning, Anning, J. H., Jessica M. Scharfenberg, & Scharfenberg, J. M. (2011). The reliability of three devices used for measuring vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2580–2590. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181fee650>
- John F. Drazan, Drazan, J. F., William T. Phillips, Phillips, W. T., Nidhi Seethapathi, Seethapathi, N., Todd J. Hullfish, Hullfish, T. J., Josh R. Baxter, & Baxter, J. R. (2021). Moving outside the lab: Markerless motion capture accurately quantifies sagittal plane kinematics during the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 125, 110547–110547. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110547>
- Julia F. Glatthorn, Glatthorn, J. F., Sylvain Gouge, Gouge, S., Silvio Nussbaumer, Nussbaumer, S., Simone Stauffacher, Stauffacher, S., Franco M. Impellizzeri, Impellizzeri, F. M., Nicola A Maffiuletti, & Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 556–560. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181ccb18d>
- Ke Song, Todd J. Hullfish, Rodrigo Scattone Silva, Karin Grävare Silbernagel, & Josh R. Baxter. (2023). Markerless motion capture estimates of lower extremity kinematics

- and kinetics are comparable to marker-based across 8 movements. *Journal of Biomechanics*, 157, 111751–111751. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111751>
- Lake, J., Mundy, P., Comfort, P., McMahon, J. J., Suchomel, T. J., & Carden, P. (2018). Concurrent Validity of a Portable Force Plate Using Vertical Jump Force-Time Characteristics. *Journal of Applied Biomechanics*, 34(5), 410–413. <https://doi.org/10.1123/jab.2017-0371>
- Leslie G. Portney & Mary P. Watkins. (2015). *Foundations of Clinical Research: Applications to*. F.A. Davis Company. <https://www.fadavis.com/product/physical-therapy-foundations-clinical-research-portney-3>
- Linthorne, N. P. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *American Journal of Physics*, 69(11), 1198–1204. <https://doi.org/10.1119/1.1397460>
- M. Boldo, Roberto Di Marco, Enrico Martini, Mauro Nardon, Matteo Bertucco, & N. Bombieri. (2024). On the reliability of single-camera markerless systems for overground gait monitoring. *Comput. Biol. Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2024.108101>
- Maarten F. Bobbert, Bobbert, M. F., Arthur van Soest, van Soest, A. J., Vu, & der Bewegingswetenschappen, F. (2001). Why do people jump the way they do. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 29(3), 95–102. <https://doi.org/10.1097/00003677-200107000-00002>
- Marie Hilmersson, Hilmersson, M., Ida Edvardsson, Edvardsson, I., Åsa Tornberg, & Tornberg, Å. (2015). Power of counter movement jumps with external load – coherence of three assessment methods. *BMC Research Notes*, 8(1), 156–156. <https://doi.org/10.1186/s13104-015-1122-z>
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and Factorial Validity of Squat and Countermovement Jump Tests. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 551–551. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2)

- McCurdy, K. W., Walker, J. L., Langford, G. A., Kutz, M. R., Guerrero, J. M., & McMillan, J. (2010). The Relationship Between Kinematic Determinants of Jump and Sprint Performance in Division I Women Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *24*(12), 3200–3208.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181fb3f94>
- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). The Role of Rate of Force Development on Vertical Jump Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *25*(2), 379–385. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181be305c>
- Montalvo, S., Gonzalez, M. P., Dietze-Hermosa, M. S., Eggleston, J. D., & Dorgo, S. (2021). Common Vertical Jump and Reactive Strength Index Measuring Devices: A Validity and Reliability Analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *35*(5), 1234–1243. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003988>
- Nahid Golafshani, & Golafshani, N. (2015). Understanding Reliability and Validity in Qualitative Research. *The Qualitative Report*, *8*(4), 597–607.
- Nobuyasu Nakano, Nakano, N., Tetsuro Sakura, Sakura, T., Kazuhiro Ueda, Ueda, K., Leon Omura, Omura, L., Arata Kimura, Kimura, A., Yoichi Iino, Iino, Y., Senshi Fukashiro, Fukashiro, S., Shinsuke Yoshioka, & Yoshioka, S. (2019). Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose with multiple video cameras. *bioRxiv*, 842492. <https://doi.org/10.1101/842492>
- Nogueira, J. W., de Lima Montebello, M. I., de Almeida Leme, M. L., Gonelli, P. R. G., de Castro Cesar, M., Viola, J. C., Pellegrinotti, I. L., & Bezerra, T. A. (2020). Comparison of two vertical jump evaluation tests in young athletes: Vertical impulse and laser sensor instrument test. *Journal of Physical Education and Sport*, *2020*(01), 249–254.
- Paavo V. Komi, & Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, *33*(10), 1197–1206.
[https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(00)00064-6)
- Patrick E. Shrout, Shrout, P. E., Joseph L. Fleiss, Fleiss, J. L., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin*,

86(2), 420–428. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.2.420>

Pedro Jiménez-Reyes, Jiménez-Reyes, P., Juan José González-Badillo, J.J.

González-Badillo, González-Badillo, J. J., & González-Badillo, J. J. (2011). Control de la carga de entrenamiento a través del CMJ en pruebas de velocidad y saltos para optimizar el rendimiento deportivo en atletismo. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 6(18), 207–217. <https://doi.org/10.12800/ccd.v6i18.48>

Robert M. Kanko, Kanko, R. M., Elise K. Laende, Laende, E. K., Elysia M. Davis, Davis, E.

M., Scott, S., W. Scott Selbie, Selbie, W. S., Kevin J. Deluzio, & Deluzio, K. J. (2021). Concurrent assessment of gait kinematics using marker-based and markerless motion capture. *Journal of Biomechanics*, 127, 110665.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110665>

Samozino, P., Morin, J.-B., Hintzy, F., & Belli, A. (2008). A simple method for measuring

force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940–2945. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028>

Sergej M. Ostojić, Ostojic, S. M., Marko Stojanović, Stojanovic, M., Zlatko Ahmetović, &

Ahmetovic, Z. (2010). Vertical jump as a tool in assessment of muscular power and anaerobic performance. *Medicinski Pregled*, 63, 371–375.

<https://doi.org/10.2298/mpns1006371o>

Sharp, A. P., Cronin, J. B., & Neville, J. (2019). Using Smartphones for Jump Diagnostics: A

Brief Review of the Validity and Reliability of the My Jump App. *Strength and Conditioning Journal*, 41(5), 96–107. Scopus.

<https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000472>

Sheppard, J., Newton, R., & McGuigan, M. (2007). The Effect of Accentuated Eccentric Load

on Jump Kinetics in High-Performance Volleyball Players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 2(3), 267–273.

<https://doi.org/10.1260/174795407782233209>

Shi Zhou, Zhou, S., David L Lawson, Lawson, D. L., William E. Morrison, Morrison, W. E.,

Ian Fairweather, & Fairweather, I. (1995). Electromechanical delay in isometric

- muscle contractions evoked by voluntary, reflex and electrical stimulation. *European Journal of Applied Physiology*, 70(2), 138–145. <https://doi.org/10.1007/bf00361541>
- Stanton, R., Wintour, S.-A., & Kean, C. O. (2017). Validity and intra-rater reliability of MyJump app on iPhone 6s in jump performance. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(5), 518–523. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.09.016>
- Ştef, R. D., & Grosu, E. F. (2021). Relationship Between Maximum Strength and Vertical Jump Performance in Junior Speed Skaters. *GYMNASIUM*, 21(2), 140–156. <https://doi.org/10.29081/gsjesh.2020.21.2.10>
- Szegedy, Christian, Christian Szegedy, Liu, Wei, Wei Liu, Jia, Yangqing, Yangqing Jia, Sermanet, Pierre, Pierre Sermanet, Reed, Scott, Scott Reed, Anguelov, Dragomir, Dragomir Anguelov, Erhan, Dumitru, Dumitru Erhan, Vanhoucke, Vincent, Vincent Vanhoucke, Rabinovich, Andrew, & Andrew Rabinovich. (2014). *Going Deeper with Convolutions*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1409.4842>
- Tan, E. C. H., Weng Onn, S., & Montalvo, S. (2024). Measuring Vertical Jump Height With Artificial Intelligence Through a Cell Phone: A Validity and Reliability Report. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 38(9), e529–e533. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004854>
- Thomas A. McMahon, McMahon, T. A., George Cheng, & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 23, 65–78. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90042-2)
- Tony Long, Long, T., Martin Johnson, & Johnson, M. (2000). Rigour, reliability and validity in qualitative research. *Clinical Effectiveness in Nursing*, 4(1), 30–37. <https://doi.org/10.1054/cein.2000.0106>
- Vanegas, E., Salazar, Y., Igual, R., & Plaza, I. (2021). Force-Sensitive Mat for Vertical Jump Measurement to Assess Lower Limb Strength: Validity and Reliability Study. *JMIR mHealth and uHealth*, 9(4), e27336. <https://doi.org/10.2196/27336>
- Villalon-Gasch, L., Penichet-Tomas, A., Olaya-Cuartero, J., & Jimenez-Olmedo, J. M. (2023). Criterion Validity and Reliability of the Compact Infrared-Based Photocell ADR

Jumping to Estimate Vertical Jump. *Applied Sciences*, 13(5), 3151.

<https://doi.org/10.3390/app13053151>

Vu Thi Thanh Nha. (2021). Understanding validity and reliability from qualitative and quantitative research traditions. *VNU Journal of Foreign Studies*, 37(3).

<https://doi.org/10.25073/2525-2445/vnufs.4672>

Wolfgang Seiberl, Seiberl, W., Daniel Hahn, Hahn, D., Geoffrey A. Power, Power, G. A., Jared R. Fletcher, Jared R. Fletcher, Fletcher, J. R., Tobias Siebert, & Siebert, T. (2021). Editorial: The Stretch-Shortening Cycle of Active Muscle and Muscle-Tendon Complex: What, Why and How It Increases Muscle Performance? *Frontiers in Physiology*, 12, 693141–693141. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.693141>

Yingling, V. R., Castro, D., Duong, J. T., Malpartida, F. J., Usher, J., & O, J. (2018). The reliability of vertical jump tests between the Vertec and My Jump phone application. *PeerJ*, 6. <https://doi.org/10.7717/peerj.4669>

Zhanxin Sha, Zhanxin Sha, Boyi Dai, & Boyi Dai. (2021). The validity of using one force platform to quantify whole-body forces, velocities, and power during a plyometric push-up. *Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology*, 13(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00330-z>

Anexos



Figura Suplementaria 1. Resultados del pilotaje de calibración del sistema infrarrojo: tiempos de vuelo iniciales registrados para alturas de referencia predefinidas, empleados para verificar la linealidad y precisión del dispositivo antes del estudio principal.



Figura Suplementaria 2. Comparación concurrente de las alturas de salto obtenidas mediante el sistema infrarrojo y la plataforma de fuerza, demostrando la sincronización de mediciones y la concordancia inicial entre ambos métodos.



Figura Suplementaria 3. Pruebas piloto de configuración espacial: determinación de la profundidad óptima para posicionar cinco dispositivos móviles simultáneamente, garantizando un campo de visión común y la captura concurrente de la elevación del salto.

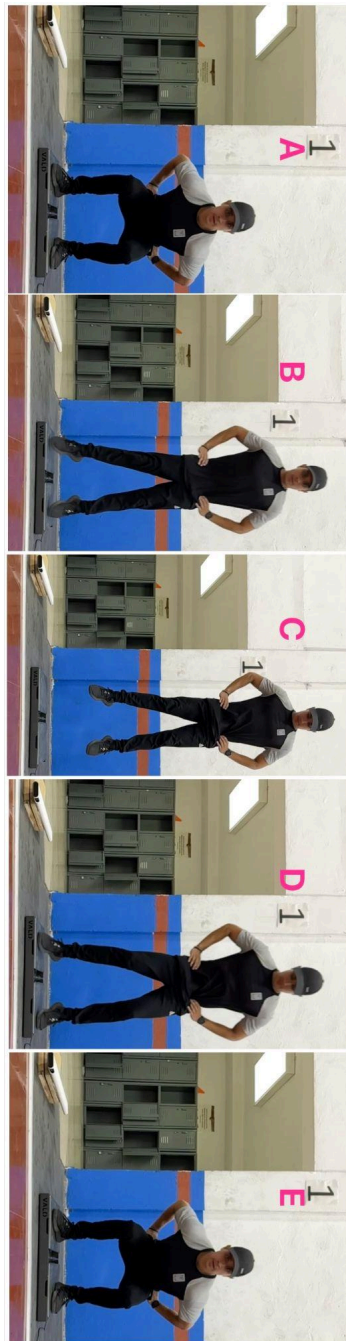


Figura Suplementaria 4. Configuración piloto de muestreo concurrente para ajuste de profundidad: posicionamiento simultáneo de los dispositivos móviles (con bounding box), plataforma de fuerza y sistema infrarrojo, mostrando las cinco fases del salto vertical (A: posición inicial; B: despegue; C: altura máxima; D: aterrizaje – dorsiflexión de uno o ambos pies; E: posición final de aterrizaje controlado).

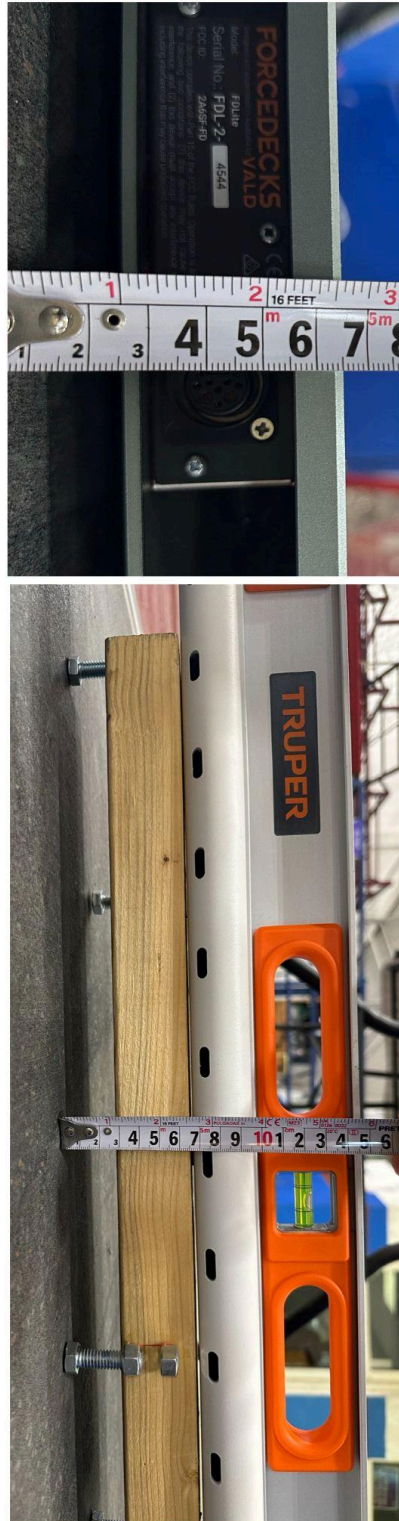


Figura Suplementaria 5. Disposición final de elevación del sistema de infrarrojos (6.5 cm) para homogeneizar su plano con la plataforma de fuerza y evitar interferencias en la detección del tiempo de vuelo durante la recolección concurrente.



Figura Suplementaria 6. Configuración piloto definitiva para la evaluación concurrente, mostrando la sincronización y calibración conjunta de los cinco sistemas de medición (plataforma de fuerza, análisis manual A/B, IA y sistema infrarrojo) para garantizar la integridad temporal y espacial de los datos.

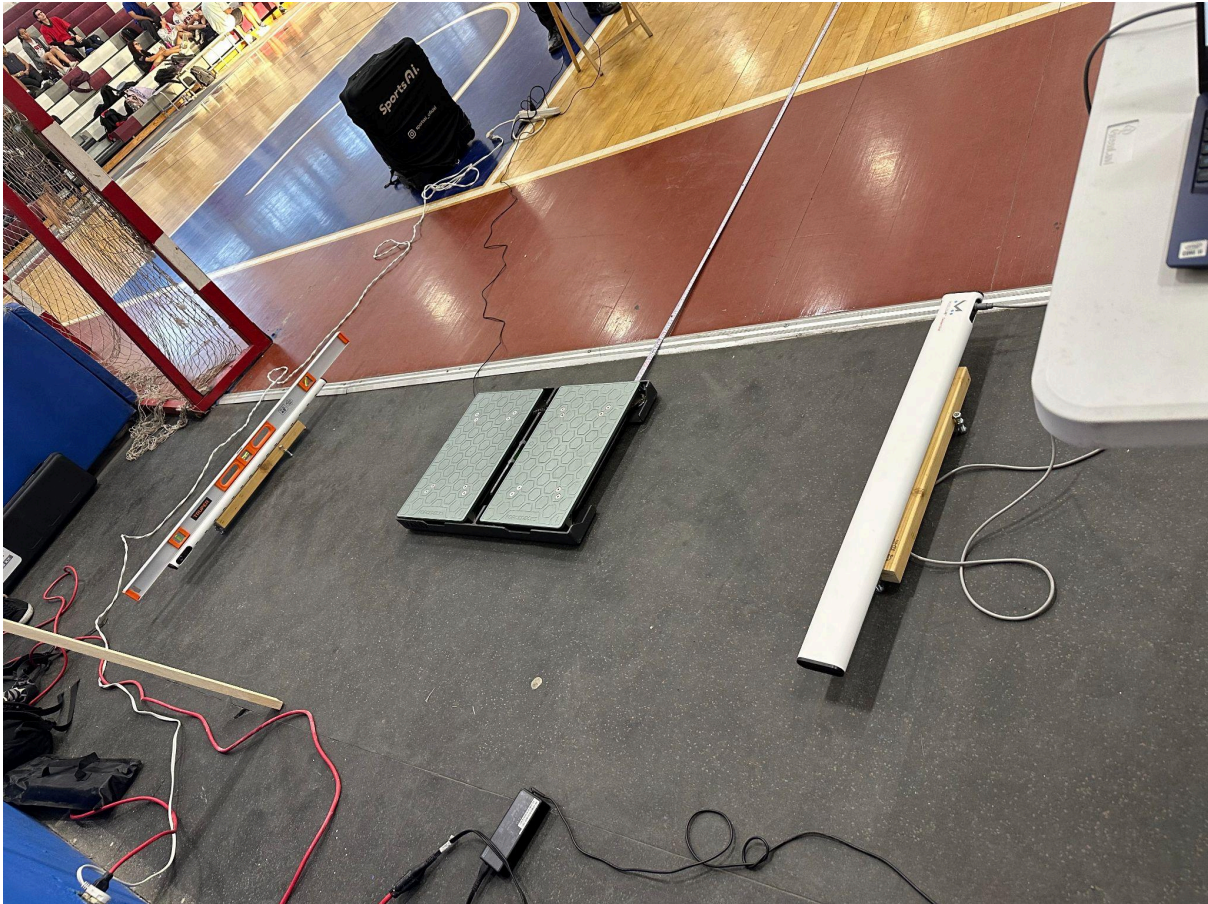


Figura Suplementaria 7. Configuración de calibración y nivelación de los sistemas de medición mediante un bloque elevador de 6.5 cm, acompañado de ensayos de estabilidad e inestabilidad en suelo de duela para evaluar la respuesta mecánica y la integridad de la señal infrarroja durante la simultaneidad con la plataforma de fuerza.



Figura Suplementaria 8. Montaje definitivo para la evaluación concurrente en el experimento pilotaje: disposición sinérgica de la plataforma de fuerza, el sistema infrarrojo y los tres dispositivos de grabación (dos para análisis manual, uno para CV+IA 30 *fps* / 4K), garantizando la sincronización y homogeneidad en la captura de los tres tipos de salto.

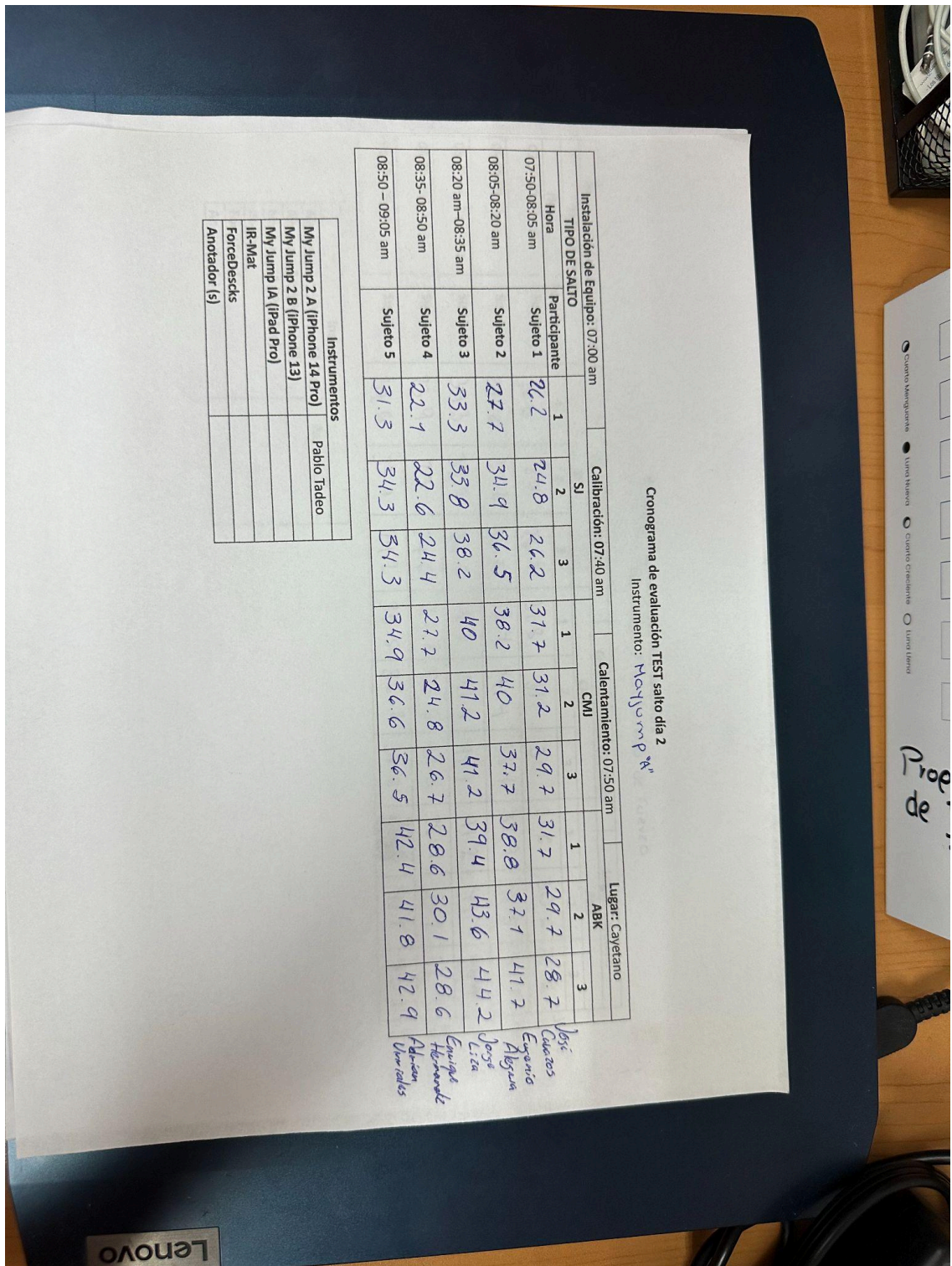


Figura Suplementaria 9. Esquema de registro y control de datos por instrumento, tipo de salto e intento. Aunque los cinco sistemas aportan un registro automático simultáneo, se implementó un registro paralelo manual para garantizar la disponibilidad inmediata de los valores, proporcionar un respaldo ante eventuales fallos de sincronización y mantener una organización rigurosa de los datos experimentales.



Figura Suplementaria 10. Calibración oficial del protocolo de la aplicación móvil para cada cohorte: ajuste de parámetros de grabación (fps, resolución), verificación de la estatura del sujeto y sincronización temporal con los otros sistemas, asegurando homogeneidad en la adquisición de datos y comparabilidad entre las cuatro cohortes de rendimiento.



Figura Suplementaria 11. Configuración final de la fase previa al salto: postura estandarizada de los participantes (alineación corporal, colocación de manos y mirada frontal), sincronización de marcadores de inicio y comprobación de la captura simultánea de los cinco sistemas de medición para garantizar la consistencia y validez de los datos.



Figura Suplementaria 12. Disposición íntegra del área de prueba en el momento del inicio de los saltos: posición de cámaras, plataformas, sensores infrarrojos y marcadores de referencia, asegurando la sincronización temporal y la visibilidad óptima de cada sistema para la medición simultánea de todos los intentos.



Figura Suplementaria 13. Sesión de familiarización del Salto sin Contramovimiento (SJ) en la que los participantes ensayan la posición de sentadilla a 90° y reciben instrucciones estandarizadas para asegurar una técnica uniforme y reproducible antes del muestreo oficial.



Figura Suplementaria 14. Fotograma del instante inicial de despegue en el salto vertical, capturado de manera sincrónica por los cinco sistemas de medición. Este momento marca la pérdida de contacto plantar y constituye el punto clave para la determinación precisa del tiempo de vuelo y la calibración de los algoritmos de estimación de altura.



Figura Suplementaria 15. Secuencia de familiarización en el Salto con Contramovimiento (*CMJ*), mostrando la postura inicial erguida, el contramovimiento descendente y la preparación para el despegue; etapa esencial para garantizar la consistencia técnica y la validez de las mediciones subsecuentes.



Figura Suplementaria 16. Fase de vuelo del Salto con Contramovimiento (CMJ) en el instante de altura máxima del centro de masa, ilustrando la trayectoria parabólica y el pico de elevación alcanzado por el atleta.



Figura Suplementaria 17. Fase de familiarización del Salto Abalakov, mostrando el balanceo inicial de brazos y la postura de contramovimiento previa a la propulsión vertical del centro de masa.

MyJump AI validation follow up study

👤 ⏪ ⏩ ↺

Lunes, 16 de diciembre de 2024, 3:48 p.m.

 **Samuel Montalvo** <@stanford.edu>
Para carlos@carlos-balsalobre.com CC: PABLO TADEO RIOS GALLARDO

Hi Carlos,

I hope you're doing well. I wanted to ask you for a brief feedback on our study. To which you are welcome to collaborate with us.

A student in Mexico asked me to collaborate on a data collection project he conducted across 80 athletes performing multiple jumps (Volleyball, Basketball, Soccer, and a Sedentary control group). The study setup is somewhat similar to what we worked on in the past, except he collected both CMJ and SJ (3 jumps each) in two separate sessions.

He found substantially lower ICC values than what we observed previously in the study with Erik Tan and his team ([link to publication](#)). In this work we achieved an overall ICC of about 0.9. However, when his dataset was stratified by sport, the ICCs ranged from 0.75 to 0.88, with the sedentary group showing the lowest reliability (ICC = 0.77).

After examining his data, I identified some measurements that were up to 20% higher than the athlete's own average values. These anomalies are likely isolated algorithmic errors rather than systematic flaws, as excluding these outlier data points improved the overall ICC to approximately 0.94—nearly matching our previous results.

Based on this observation, we are considering the following recommendations to ensure data quality:

- Individual-Level Retakes: If a measurement is more than 20% above an athlete's established norm, it likely represents an isolated algorithmic anomaly. In such cases, retaking the measurement is advisable.
- Population-Level Thresholds: If a measurement exceeds the 99th percentile of all collected data, this should trigger either a retake or a thorough review of the athlete's recordings.

These guidelines would encourage practitioners to identify and handle sporadic algorithmic errors before drawing conclusions, thereby maintaining both the accuracy and reliability of the collected data. We are still asserting that the AI app has an excellent validity, but knowledge of the data should be taken into consideration.

Do you think these recommendations make sense, or would you suggest any adjustments?

I look forward to your thoughts.

-sam

Kind Regards,

Samuel Montalvo, Ph.D., CPSS, CSCS, *D
Post-Doctoral Research Fellow
Wu Tsai Human Performance Alliance
Division of Cardiovascular Medicine
School of Medicine
Stanford | [Stanford Profile](#)

Figura Suplementaria 18. Comunicación interdisciplinaria de expertos en la que se examinan y comparan de manera crítica los resultados preliminares de ICC, integrando aportes metodológicos para perfeccionar el protocolo de validación.

Re: MyJump AI validation follow up study



○ Carlos Balsalobre-Fernandez
Para Samuel Morriano; CC: Carlos Balsalobre; PABLO TADEO RIOS GALLARDO

@cloud.com>

Lunes, 23 de diciembre de 2024, 3:55 a.m.



Dear Samuel,

Thanks a lot for your email. I'm glad that you are conducting another study on my app and I'm grateful for the collaboration opportunity. I would be happy to collaborate in such project, but I would prefer to do it as a "consultant" to be as independent as possible to avoid any potential conflict of interest. Maybe a last position in the author list would be the best choice since it represents "guidance" rather than actual writing and data analysis (at least this is how it is interpreted generally). But honestly I don't really care which position do you decide, I'm ok with any.

About the ICC, I would need to know exactly how you calculated it to better understand it. If the ICC was calculated between the app data and the force plate data, that would be strange to be honest, but if it is the ICC for the different trials of the app, that would make sense. In your paper with Erik Tan you calculated both (App vs. FP and App -different trials-), so that's why I'm asking.

If the numbers you are referring to is ICC for different trials, what is really more important is to see if they are in line with the ICC for different trials calculated with the force platform. That would indicate not problem with the app, but with the subjects experience. It is very reasonable to me that sedentary, inexperienced individuals had low ICC for different trials of the squat jump because that test has an important technical component, unlike the CMJ which feels more natural.

If this is the case, I don't think that corrections you propose are actually needed, as long as you discuss this in the discussion section, and only in the case that ICC are similar than those observed with the FP for different trials.

However, if the ICC from the FP is good and only the app is showing low ICC, I think the problem should be with the way the SJ was performed using the app. In this test with the AI method, the participant should be in a fully extended, straight position before clicking the record button, and only then they should go down to the initial SJ position to perform the test. If all of that was properly performed, then your solution would be ok.

Let me know if that makes sense, and I hope that helps.

Carlos



Carlos Balsalobre-Fernández, Ph.D, CSCS-D
Sports scientist, iOS developer
Head of Applied Biomechanics and Sports Technology Research Group
Department of Physical Education, Sport and Human Movement
Universidad Autónoma de Madrid, Spain
carlos-balsalobre.com



Figura Suplementaria 19. Sesión de retroalimentación con el desarrollador de My Jump Lab, donde se discuten en detalle los hallazgos iniciales de validez y se ajustan los parámetros de calibración para optimizar la precisión del análisis por IA.

Transparencia

Con el fin de garantizar la máxima transparencia y reproducibilidad de los procedimientos y análisis estadísticos empleados en esta tesis, el código completo en *R Markdown*, incluyendo la limpieza de datos, el cálculo de métricas de fiabilidad y validez, y la generación de todas las tablas y figuras, está disponible en el siguiente repositorio público:

<https://github.com/PabloTadeo/Thesis-Concurrent-Validity.git>

Los interesados pueden acceder, clonar y ejecutar el proyecto íntegro para replicar los resultados o adaptar los scripts a sus propias bases de datos.