

Metodología de investigación y criterios objetivos en el análisis de técnica deportiva

Formulación de preguntas de investigación y operacionalización de variables

El punto de partida de una investigación rigurosa es una **pregunta de investigación clara**. Esta pregunta debe definir con precisión qué aspecto de la técnica deportiva se va a estudiar y en qué contexto. A partir de ella se identifican las **variables clave** del estudio:

- **Variable dependiente (resultado):** es el fenómeno o desempeño que se desea medir o explicar. Por ejemplo, si se investiga la técnica en dominadas, la variable dependiente podría ser una medida cuantitativa de la ejecución de la dominada (como el rango de movimiento alcanzado o la velocidad media de ascenso). Conviene elegir una medida que represente bien el rendimiento o la calidad técnica y que sea *válida* (que realmente mida lo que pretende medir) y *confiable* (que sea consistente y precisa). En biomecánica deportiva, ejemplos de variables dependientes incluyen ángulos articulares específicos, velocidad de ejecución, número de repeticiones correctas, etc.
- **Variable(s) independiente(s):** son los factores que el investigador manipula o cuyos efectos desea examinar sobre la variable dependiente. En estudios experimentales, puede ser una intervención (p. ej., un programa de entrenamiento específico, la fatiga inducida, la técnica de agarre en la barra de dominadas) o condiciones diferentes de ejecución. En estudios descriptivos, pueden ser características de los sujetos (edad, nivel de experiencia, sexo) o condiciones de la tarea (tipo de ejercicio, carga, uso de feedback, etc.). Por ejemplo, una pregunta podría ser “¿Cómo afecta la fatiga muscular a la técnica de la dominada?”. Aquí la fatiga (presente vs. ausente, o niveles de fatiga) sería la variable independiente, y la calidad técnica de la dominada (medida por ciertos indicadores biomecánicos) la dependiente. Se deben identificar **todas** las posibles variables independientes relevantes (incluyendo factores del sujeto y del entorno), aunque no todas serán manipuladas; algunas se controlarán o registrarán para análisis posteriores.
- **Variables de control:** son factores que, sin ser el foco central, podrían influir en la variable dependiente y por ello se mantienen constantes o se registran para su control estadístico. Por ejemplo, al analizar la técnica de dominadas, se puede controlar la temperatura y hora del día (para evitar efectos circadianos), el tipo de barra utilizada, la anchura del agarre, o indicar a todos los sujetos que no hagan ejercicio intenso el día previo. Si no es posible mantenerlos constantes, se podrían

medir y luego ajustar sus efectos en el análisis (p. ej., usar la edad o el sexo como covariables si se sospecha que afectan la técnica). El control adecuado de estos factores mejora la **validez interna** del estudio, asegurando que los cambios observados en la variable dependiente se deban principalmente a la variable independiente y no a factores extraños.

La **operacionalización de las variables** implica traducir conceptos abstractos a medidas concretas y observables. Por ejemplo, “calidad técnica de la dominada” es un constructo amplio; operacionalizar podría implicar definir indicadores objetivos como: amplitud del rango de movimiento articular (ROM) en hombros y codos, desviación del tronco durante la tracción, ángulo de la muñeca en el punto más alto, número de dominadas completadas con barbilla por encima de la barra, etc. Cada variable debe tener una definición operacional clara: cómo se medirá, en qué unidades, con qué instrumento. Por ejemplo, la *fatiga* podría operacionalizar como un porcentaje de repetición máxima alcanzada antes del fallo, o mediante un protocolo específico (series repetidas hasta una cierta pérdida de velocidad). Una buena práctica es basarse en definiciones utilizadas en estudios previos o en estándares de la disciplina para asegurar comparabilidad y rigor.

En resumen, formular correctamente la pregunta de investigación lleva a identificar las variables relevantes. Luego, cada variable debe definirse de forma medible. Esto sienta las bases para todo el estudio, pues **una pregunta bien planteada y variables claramente operacionalizadas orientan el diseño metodológico** y la recolección de datos de manera objetiva y reproducible.

Criterios objetivos para la medición de la técnica deportiva

Una vez definidas las variables, es esencial establecer **criterios objetivos** para medir la técnica deportiva. Esto significa determinar exactamente qué medidas se tomarán y cómo se cuantificará la ejecución técnica, de forma que no dependa de apreciaciones subjetivas. Algunos criterios comunes incluyen:

- **Rango de movimiento (ROM) articular:** Se refiere a la amplitud de movimiento de una articulación durante el ejercicio. Por ejemplo, en una dominada se puede medir el ROM del codo (de extensión completa en la posición colgada a flexión máxima al subir) y el ROM del hombro (ángulo de flexión o abducción del hombro durante la tracción). Estos ROMs proporcionan información sobre la amplitud del gesto. Un criterio podría ser que el atleta alcance una extensión completa de brazos al bajar (ROM completo) y una flexión suficiente para llevar la barbilla por encima de la barra al subir. El **ROM total del ejercicio** también puede considerarse, por ejemplo, la distancia vertical recorrida por el centro de masa o por el punto de la barbilla.
- **Ángulos clave por fase:** Dividir el movimiento en fases (p. ej., fase concéntrica o de subida, y fase excéntrica o de bajada en una dominada) y medir ángulos en momentos específicos de cada fase. Ejemplos de ángulos clave: ángulo de hombro en el punto inicial y final de la subida, ángulo de codo en la fase superior (flexión máxima), inclinación del tronco o balanceo al final de la subida, etc. Estos **indicadores angulares** permiten evaluar la postura y la alineación en momentos críticos. Un estudio biomecánico típico registra trayectorias angulares en el tiempo (curvas cinemáticas) y extrae valores como máximos, mínimos y promedios por fase. Por ejemplo, Garavaglia et al. (2024) midieron **ángulos segmentarios** durante dominadas en distintas fases: la verticalidad del tronco, la simetría entre brazos, la flexión de cuello, el balanceo de piernas, etc., generando *índices sintéticos* de rendimiento y seguridad a partir de esos ángulos.
- **Otros parámetros cinemáticos:** Incluyen velocidades y aceleraciones de segmentos corporales o del centro de masa. En análisis de técnica, a veces se evalúa la *velocidad de ejecución* (p. ej., velocidad media o pico en la fase concéntrica) como indicador de rendimiento. Por ejemplo, la **velocidad propulsiva media (MPV)** durante la dominada puede medirse con un transductor lineal o acelerómetro, ofreciendo un criterio cuantitativo de potencia del movimiento. Asimismo, la *suavidad* de la trayectoria (ausencia de oscilaciones bruscas) podría cuantificarse mediante aceleraciones angulares o jerk (tercera derivada de la posición), lo que contribuye a un criterio de técnica depurada.
- **Detección de eventos o hitos:** Definir de manera objetiva qué constituye una repetición válida o una fase completada. Por ejemplo, establecer que una dominada cuenta como *correcta* cuando la barbilla del sujeto supera el nivel de la barra en la fase final de subida. Este criterio binario (sí/no) para cada repetición permite computar el número de repeticiones válidas, y también sincronizar fases del movimiento. En proyectos con sensores, se pueden programar algoritmos que detecten automáticamente ese evento (p. ej., un pico de altura de la barbilla o un ángulo de codo umbral) para contar repeticiones de forma objetiva.

- **Índices compuestos de técnica:** A veces se combinan múltiples medidas en un índice global. Por ejemplo, Garavaglia et al. (2024) propusieron *puntuaciones de desempeño y de seguridad* basadas en varios parámetros biomecánicos medidos simultáneamente. Ellos establecieron rangos “óptimos” para cada parámetro (derivados de ejecuciones técnicamente correctas de atletas expertos) y luego puntuaron cada repetición de sujetos comparando sus valores con esos rangos estándar. Cada repetición obtenía una puntuación porcentual en distintos aspectos (por ejemplo, cercanía al rango ideal de movimiento de espalda recta, de alineación de codos, etc.), y luego un algoritmo ponderaba estos factores para dar una **puntuación global de calidad de ejecución**. Este enfoque proporciona una medida única que resume la técnica, facilitando comparaciones pre/post entrenamiento o entre individuos.

Al establecer criterios objetivos, es importante **basarse en la literatura y en criterios biomecánicos bien fundamentados**. Por ejemplo, el rango de movimiento “completo” de ciertas articulaciones puede definirse apoyándose en estudios anatómicos o en trabajos previos de técnica deportiva. Asimismo, fases del movimiento (como el inicio de la fase concéntrica o el final de la fase excéntrica) deben definirse con precisión (quizá usando un umbral de velocidad cero, o el instante en que un sensor indica cambio de dirección).

El uso de **tecnología de análisis del movimiento** es crucial para obtener medidas objetivas. En laboratorio, los **sistemas de captura de movimiento optoelectrónicos** (cámaras infrarrojas y marcadores reflejantes) se consideran el estándar de oro para obtener ángulos y posiciones con alta exactitud. Alternativamente, en campo, los **sensores inerciales (IMU)** ofrecen portabilidad: son pequeños dispositivos que integran acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, y pueden colocarse en el cuerpo para registrar aceleraciones lineales, velocidades angulares y orientación de segmentos. Con algoritmos de fusión sensorial, las IMU permiten estimar la orientación de cada segmento corporal y calcular ángulos articulares comparables a los de un sistema óptico. Por ejemplo, un IMU en el antebrazo y otro en el tórax pueden usarse para calcular el ángulo de codo durante una dominada. Es fundamental **calibrar** estos sistemas: en los ópticos, se calibra el espacio y se coloca los marcadores en puntos anatómicos estandarizados; en IMUs, se realiza una calibración anatómica (por ejemplo, una pose inicial conocida, como de pie en posición neutra) para alinear los sensores con los ejes corporales. Esto garantiza que los ángulos calculados correspondan realmente a movimientos anatómicos y que los datos sean comparables entre sujetos.

En definitiva, los criterios de medición técnica deben ser **objetivos, cuantificables y reproducibles**. Definir ROM, ángulos por fase, eventos de interés y potencialmente índices compuestos, permite evaluar la técnica deportiva con números. Esto facilita comparar ejecuciones con estándares, cuantificar mejoras tras una intervención y detectar errores técnicos específicos. Un buen ejemplo es el análisis de dominadas: mediante sensores y cámaras se puede obtener la “*huella digital*” de cada repetición en términos de cinemática segmentaria, rangos articulares y control postural, brindando una evaluación objetiva de la técnica de cada atleta.

Diseño de protocolos experimentales rigurosos

El diseño experimental (o observacional) debe planificarse cuidadosamente para **garantizar la calidad de los datos** y la validez de las conclusiones. Algunos aspectos clave en el contexto de análisis de técnica deportiva son:

- **Tamaño y características de la muestra:** Se debe definir el número de participantes (n) y sus criterios de inclusión. Un tamaño de muestra adecuado aumenta la confiabilidad de los hallazgos y la potencia estadística para detectar efectos reales. En biomecánica deportiva a veces las muestras son pequeñas por la dificultad de reclutar atletas o instrumentar las mediciones; sin embargo, estudios metodológicos sugieren que para estimar fiabilidad con precisión serían deseables del orden de 30-50 sujetos y mediciones repetidas. En la práctica, muchos estudios utilizan $n=10-20$ sujetos, pero es importante justificar que ese número es suficiente para los objetivos (p. ej., mediante un análisis de potencia a priori si se busca un efecto específico). Además, las características de la muestra deben ser homogéneas o, si son heterogéneas (distintos niveles de habilidad, géneros, etc.), esas variables deben controlarse. Por ejemplo, incluir solo atletas bien entrenados si se analiza técnica avanzada, o separar en subgrupos (principiantes vs avanzados) para comparar.
- **Número de repeticiones o ensayos:** Para obtener medidas representativas y evaluar la variabilidad intra-sujeto, suele ser necesario que cada participante realice *múltiples repeticiones* del ejercicio en estudio. Por ejemplo, en un protocolo de dominadas, cada sujeto podría realizar varias dominadas en condiciones controladas (varias series de pocas repeticiones, o una serie al fallo, según la pregunta). Garavaglia et al. (2024) hicieron que sus sujetos realizaran series de 3 dominadas con descanso, repetidas en dos ocasiones, para tener suficientes datos por persona. Sordo-Vacas et al. (2024) en cambio usaron 2 repeticiones por condición en dos sesiones distintas para analizar la repetibilidad inter-sesión. En general, **mayor número de ensayos mejora la confiabilidad** al promediar variaciones y permite aplicar estadísticas de fiabilidad (ver siguiente sección). No obstante, hay que equilibrar con la fatiga: demasiadas repeticiones pueden alterar la técnica debido al cansancio, así que el protocolo debe dosificar adecuadamente el esfuerzo (p. ej., dar pausas suficientes entre series; en el estudio de Sordo-Vacas se daban 1 min de descanso entre repeticiones aisladas de dominada y 5 min entre bloques).
- **Estandarización de condiciones:** Todos los sujetos deben realizar la prueba en condiciones lo más similares posible. Esto incluye el **entorno físico** (mismo laboratorio o espacio, misma superficie antideslizante si es relevante, iluminación suficiente si hay captura de video, etc.), el **equipamiento** (misma barra de dominadas, misma marca de sensores calibrados previamente, idéntica indumentaria si influye – por ejemplo, descalzos vs con calzado si se mide salto), y las **instrucciones previas**. Por ejemplo, indicar a los sujetos la técnica que deben intentar realizar: *“piernas rectas y juntas, sin balancearse, agarre en pronación a la anchura de hombros”*. En algunos estudios, para obtener datos “naturales”, **no se dan indicaciones específicas de técnica** y se deja al deportista ejecutar con su estilo, registrando luego las diferencias. Esto depende de la pregunta: si se busca evaluar *la técnica habitual* del atleta, conviene no guiarlo; si se quiere medir la

capacidad de ejecutar *técnicamente perfecto*, se le pueden dar instrucciones detalladas o incluso entrenamiento previo. De cualquier forma, lo esencial es que todos reciban las mismas instrucciones. También se deben estandarizar calentamientos y fatiga: típicamente se provee un calentamiento estándar a todos (p. ej., 5 minutos de movilidad y algunas repeticiones submáximas del ejercicio) y se define cuándo se toma la medición (por ejemplo, siempre en condiciones frescas, o siempre tras X series si se investiga la fatiga).

- **Aleatorización y control de orden:** Si el estudio implica *diferentes condiciones* (p. ej., medir la técnica con dos tipos de agarre: prono vs supino, o antes vs después de fatiga), conviene aleatorizar el orden en que cada sujeto realiza las condiciones para evitar sesgos de orden o aprendizaje. Por ejemplo, la mitad de los sujetos primero hacen dominadas con agarre prono y luego supino, y la otra mitad al revés, asignados al azar. Esto evita que la mejora o deterioro de técnica se deba simplemente a haber repetido el ejercicio. En el caso de Sordo-Vacas et al., que comparaban dominadas en diferentes regletas (agarres de distinto tamaño), el orden de las cuatro condiciones de agarre pequeño se randomizó para cada escalador. Si el diseño es **crossover** (mismo sujeto con y sin intervención), también se requiere aleatorizar el orden y, de ser posible, separar las condiciones por un período suficiente para “lavar” efectos residuales.
- **Cegamiento (blinding):** En estudios de técnica deportiva, el cegamiento del sujeto suele ser difícil (el atleta sabe si está usando cierto dispositivo o técnica). Sin embargo, el **evaluador** o analista de los datos puede cegarse a las condiciones. Por ejemplo, quien procesa los ángulos de vídeo o IMU podría no saber de qué sujeto o condición son los datos, para no introducir sesgos en la interpretación. La literatura revela que muchas investigaciones en deporte no logran implementar cegamiento de evaluadores (en una revisión, solo ~1.5% de estudios de entrenamiento usaban evaluadores cegados), pero es un ideal metodológico a perseguir cuando sea posible, ya que reduce sesgos en la medición (especialmente si hay alguna apreciación visual/manual de por medio).
- **Ética y consentimiento:** Especialmente con atletas, es importante contar con aprobación de un comité de ética (si es un estudio académico) y con consentimiento informado de los participantes, explicando los procedimientos y posibles riesgos. Esto no solo es un requisito legal/ético, sino que fomenta que el protocolo esté *bien pensado* para minimizar riesgos (por ejemplo, tener supervisión en ejercicios potencialmente peligrosos, usar arneses de seguridad si alguien pudiera caer de una barra, etc.). Varios estudios recientes mencionan la aprobación ética y adhieren a la Declaración de Helsinki, lo cual debe reflejarse también en nuestro protocolo escrito.
- **Piloto y estandarización del registro:** Antes de la recogida formal de datos, conviene hacer pruebas piloto del protocolo con unos pocos sujetos para afinar detalles: verificar que los sensores registran correctamente, que las cámaras captan todos los marcadores sin interferencias, que las instrucciones se entienden, y que la cantidad de repeticiones es adecuada (ni insuficiente ni excesiva). También se prepara un **manual de procedimiento** para los evaluadores: por ejemplo, cómo colocar los sensores siempre en los mismos puntos anatómicos, cómo iniciar la grabación antes de que el sujeto empiece, qué hacer si un sensor falla durante la prueba (¿repetir la serie? ¿descartar esos datos?), etc. Esta estandarización garantiza que todos los datos sean consistentes y comparables.

En resumen, un protocolo experimental riguroso en análisis de técnica deportiva **maximiza la consistencia y control** de las condiciones, a la vez que replica situaciones relevantes. Se busca un balance entre la **precisión de laboratorio** y la **realidad del deporte**. A mayor control (laboratorio), normalmente mayor confiabilidad de las mediciones pero podría ser a costa de naturalidad; a mayor realismo (campo), se gana validez externa pero se arriesga ruido en los datos. Un buen diseño intenta aprovechar lo mejor de ambos mundos: por ejemplo, recopilando datos en un ambiente controlado pero simulando en lo posible las condiciones de competición, o midiendo en campo pero con instrumentos validados y protocolos de instrucción claros. Todo esto sentará las bases para poder luego analizar la **validez y fiabilidad** de los datos obtenidos.

Validez y fiabilidad: control y evaluación de la calidad de los datos

Una vez recogidos los datos, es fundamental evaluar su **calidad científica**, lo cual se resume en dos conceptos clave: **validez** (¿medimos lo que queremos medir? ¿y podemos inferir lo que creemos?) y **fiabilidad** (¿nuestros datos son consistentes y reproducibles?). Estos conceptos aplican tanto a las mediciones (instrumentos y métodos de medida) como al diseño global del estudio.

Validez puede desglosarse en varias facetas:

- **Validez interna:** Se refiere al grado en que el diseño del estudio permite concluir relaciones causa-efecto confiables. Un estudio con alta validez interna es aquel en el que los cambios observados en la variable dependiente pueden atribuirse con confianza a la manipulación de la variable independiente, sin influencia de confusores. Para lograrlo, ya mencionamos prácticas como la aleatorización, control de variables extrañas, grupos control, cegamiento, etc. Por ejemplo, si encontramos que tras 8 semanas de entrenamiento con cierto método la técnica de ejecución mejora, debemos tener certeza de que ese resultado no se explica por diferencias iniciales entre sujetos, motivación extra, o simple aprendizaje/práctica con el tiempo. La literatura indica que, en investigaciones deportivas, a veces se descuidan elementos de validez interna (p. ej., muchos estudios no ocultan la asignación a grupos y pocos usan cegamiento de evaluadores). Por tanto, debemos documentar las medidas tomadas para fortalecer la validez interna (aleatorización, controles, etc.) y considerar posibles **amenazas**: efectos de aprendizaje (los sujetos mejoran en la prueba simplemente por repetirla), efecto placebo o expectativa (si los atletas saben que se les está midiendo, pueden esforzarse más y alterar la técnica), etc., y en lo posible mitigarlos.
- **Validez externa:** Indica en qué medida los hallazgos son generalizables a contextos o poblaciones diferentes a los del estudio. En análisis de técnica, surge la pregunta: ¿los resultados obtenidos en el laboratorio se aplican en el campo real? Por ejemplo, si medimos la técnica de dominada en atletas en un entorno controlado, ¿esos datos reflejan su técnica en una competencia de CrossFit o en escalada real? Hay una tensión clásica entre validez interna y externa: estudios de laboratorio muy controlados pueden tener situaciones poco naturales, limitando la generalización (baja validez externa), mientras estudios en campo son muy reales pero introducen más variables no controladas (riesgo para validez interna). Schwameder (2008) lo expresa claramente: *“Normalmente, datos recogidos en laboratorio son más precisos y confiables, pero su validez (realismo) puede estar limitada; en cambio, datos de campo ofrecen alta validez (reflejan la realidad), pero con menor exactitud y fiabilidad”*. En deportes de élite, la máxima validez externa se lograría midiendo en plena competición, pero factores prácticos a veces lo impiden. Como compromiso, se sugieren **situaciones simuladas**: por ejemplo, recrear una competencia en condiciones controladas, o medir durante entrenamientos intensivos que emulan la realidad. Evaluar la validez externa implica comparar nuestros resultados con otros estudios y considerar diferencias: ¿obtendríamos lo mismo con deportistas de otro nivel, o con otro aparato? Si, por ejemplo, nuestro estudio usó una barra fija,

¿valdrían los resultados para dominadas en anillas? Estas reflexiones deben discutirse, reconociendo alcances y límites de la generalización.

- **Validez de constructo y de contenido:** En relación a las mediciones específicas de técnica, debemos asegurar que nuestros indicadores realmente representan el *constructo* “técnica adecuada” que queremos estudiar. La *validez de contenido* implica que se han incluido todas las facetas relevantes. Por ejemplo, evaluar solo el ángulo de codo podría no ser suficiente para calificar la técnica de una dominada; habría que considerar también la posición del tronco, el control de las piernas, etc., para cubrir el contenido completo del gesto técnico. La *validez de constructo* se apoya en que las medidas se comporten como se esperaría teóricamente. Por ejemplo, si se cree que una mejor técnica lleva a mayor eficiencia, quizás los atletas con mejor puntaje técnico en dominadas muestren menor variación de velocidad o menor fatiga por repetición. Si nuestros datos confirman relaciones lógicas (p. ej., correlación entre puntaje de técnica y rendimiento), apoyan la validez del constructo medido. Una manera de reforzar la validez es **comparar con criterios externos (validez de criterio)**: por ejemplo, contrastar nuestras mediciones objetivas con la evaluación de entrenadores expertos. Si el puntaje técnico que da nuestro algoritmo coincide con las calificaciones que da un entrenador evaluando la forma, eso sugiere que medimos efectivamente la calidad técnica que decimos medir.
- **Validez de medición (o exactitud):** En contextos biomecánicos, suele evaluarse comparando el instrumento nuevo con un estándar de oro conocido. Por ejemplo, si usamos IMUs para medir ángulos, una forma de validar la medición es comparar esos ángulos con los obtenidos simultáneamente por un sistema Vicon u OptiTrack (cámara 3D). Este tipo de validación cuantitativa arroja métricas como **error promedio** o **desviación estándar del error** entre ambos sistemas, o coeficientes de correlación concordante. Estudios recientes han mostrado que las IMUs bien calibradas pueden medir ángulos con sorprendente precisión: desviaciones de apenas ~4–5 grados en rangos de movimiento comparadas con un sistema óptico (error relativamente pequeño) y correlaciones de las curvas angulares muy altas (cercanas a 0.99). Por ejemplo, Sers et al. hallaron que un sistema inercial tenía una diferencia máxima de 4.5° en el ROM de la articulación del hombro respecto a Vicon, con coeficientes de correlación múltiple de 0.99, lo que implica prácticamente solapamiento total de las curvas de movimiento. Por otro lado, estas validaciones pueden revelar limitaciones: una **revisión sistemática de 2022** reportó que las IMUs son altamente válidas para parámetros espaciotemporales de carrera (como longitud de zancada, cadencia), pero con mayor variabilidad para ángulos articulares, recomendando “usar con precaución” los datos de ángulos de extremidades inferiores obtenidos con IMUs. Esto sugiere que, dependiendo de la variable, la medición puede ser más o menos válida, y debemos reconocer esas diferencias (p. ej., confiar en los tiempos y conteos de repeticiones medidos con sensores, pero ser cautos al interpretar ángulos complejos medidos fuera del laboratorio).

Fiabilidad (confiabilidad) se refiere a la consistencia de las mediciones cuando se repiten en condiciones similares. Una medición o un evaluador son fiables si producen resultados muy cercanos al repetirse la prueba sin que el fenómeno cambie. Hay varias formas de evaluar y asegurar la fiabilidad:

- **Fiabilidad test-retest (entre días o sesiones):** se verifica repitiendo la medición completa en otra ocasión con los mismos sujetos, bajo las mismas condiciones, y cuantificando el grado de acuerdo entre las dos (o más) ocasiones. Por ejemplo, si un atleta es medido hoy y mañana haciendo las mismas dominadas, ¿los ángulos calculados son similares? ¿El puntaje técnico total se mantiene? Para cuantificarlo, se usan medidas estadísticas como el **coeficiente de correlación intraclase (ICC)** y el **error típico de medida**. Un ICC alto (cercano a 1.0) indica que la mayor parte de la variación observada es entre sujetos (diferencias reales) y muy poca es dentro del mismo sujeto (variación de medición). Por ejemplo, en el estudio de Sordo-Vacas sobre dominadas, reportaron ICC inter-sesión entre 0.73 y 0.96, lo que se interpreta como fiabilidad *buena a excelente* de la medida de velocidad de ascenso entre dos días distintos. El error típico (también llamado desviación estándar de la medida) complementa esta información indicando en unidades absolutas cuánto varía típicamente la medida en repeticiones; a menudo se expresa como coeficiente de variación (CV%) para compararlo relativo al valor medido. Un CV pequeño (p. ej., <5%) implica que la variación test-retest es muy baja en relación al valor medio, lo cual es deseable. Garantizar fiabilidad test-retest implica protocolizar bien las mediciones y, idealmente, practicar un **ensayo de familiarización**: a veces la primera vez que alguien realiza la prueba puede no estar habituado, por lo que se descarta la primera medición y se usa la segunda y tercera para fiabilidad, por ejemplo.
- **Fiabilidad intra-observador (o intra-evaluador):** aplica cuando hay una componente de juicio humano en la medición. Por ejemplo, si un analista debe identificar fotogramas donde ocurre cierto evento (como el momento exacto de barbilla sobre barra en un video) o marcar manualmente un ángulo en una imagen, queremos saber si **el mismo analista** obtendría igual resultado si repite ese análisis tiempo después sobre el mismo dato bruto. Para evaluarlo, el mismo observador analiza dos veces (en momentos separados) y se comparan los resultados (nuevamente con coeficientes de correlación, porcentajes de acuerdo, etc., según el tipo de dato). Una alta concordancia intra-observador significa que el método es estable y el analista está bien entrenado. Para asegurar esto, se deben proporcionar **definiciones claras** de cómo medir/identificar eventos y entrenar a los evaluadores. Por ejemplo, definir que el *ángulo de rodilla* se mide entre los ejes longitudinales de muslo y pierna en el plano sagital, con puntos de referencia específicos, y hacer que el analista practique con varios sujetos hasta obtener medidas consistentes. Publicaciones metodológicas a menudo reportan los ICC intra-observador; valores por encima de 0.90 son considerados excelentes.
- **Fiabilidad inter-observador (entre evaluadores):** similar al anterior, pero comparando a *dos o más personas distintas* haciendo la medición o análisis. Esto es importante si en un proyecto hay varios investigadores recabando datos (por ejemplo, dos personas colocando marcadores o dos personas corrigiendo técnica). Ambos deben producir resultados equivalentes. Se suele evaluar haciendo que ambos analicen independientemente un subconjunto de datos y comparando resultados. Si hay discrepancias, es señal de que las instrucciones de medición quizás no son suficientemente objetivas, o uno de los evaluadores necesita calibración adicional. Solo cuando se logra alta concordancia inter-evaluador (idealmente ICC > 0.9, o más del ~90% de acuerdo para clasificaciones) se procede

a recopilar cada uno su parte, o se decide que un solo evaluador realice todas las mediciones críticas.

- **Fiabilidad del instrumento o aparato:** En dispositivos tecnológicos, se verifica si diferentes unidades del aparato miden igual o si una misma unidad lo hace consistentemente. Por ejemplo, probar **varios acelerómetros** del mismo modelo para ver si reportan la misma aceleración bajo la misma prueba, o medir un mismo ángulo con el sensor repetidamente (sin moverlo) para ver la variación. Esto puede implicar calibraciones (p. ej., tarar un acelerómetro para que marque 0 g en reposo horizontal, etc.). Algunos estudios examinan la fiabilidad entre sensores: por ejemplo, comparar dispositivos comerciales de IMU y reportan que suelen tener ICC > 0.95 entre unidades para medidas de velocidad y ángulo. También se evalúa la deriva de medición en IMUs (si con el tiempo se descalibran). Un hallazgo común es que, aunque los **IMUs son muy fiables** en variables como tiempos y conteos, pueden tener variabilidad en ángulos absolutos de ciertas articulaciones, en parte por diferencias sutiles de colocación entre sesiones.

Para cuantificar fiabilidad, además de ICC y CV, se usan a veces los **límites de acuerdo de Bland-Altman**, que dan un rango dentro del cual cae el ~95% de las diferencias entre mediciones repetidas. Esto es útil para visualizar si hay sesgo sistemático (ej: si la segunda medición tiende a dar valores más altos que la primera) y qué tan grande es el “ruido” de medición en unidades absolutas. Un protocolo fiable idealmente muestra **sin sesgo significativo** (media de diferencias ~0) y rangos estrechos de diferencias.

En estudios experimentales, una fiabilidad alta es fundamental para detectar cambios debidos a intervenciones. Si la medida es muy ruidosa, un progreso real podría quedar oculto en la variabilidad. Por eso, **mejorar la fiabilidad aumenta la sensibilidad** del estudio para hallar efectos. Como dice Hopkins (2000), mejor fiabilidad implica mejor precisión para rastrear cambios en entornos de investigación y práctica. Ese autor también indica que cuando la fiabilidad es baja, se necesitan muestras mayores para compensar el “ruido”.

En práctica, ¿cómo aseguramos y mejoramos la fiabilidad? Algunas pautas: (1) usar **protocolos estandarizados y entrenar al personal**, (2) utilizar **instrumentos de calidad** (p. ej., preferir sensores calibrados con error conocido), (3) promediar múltiples intentos en lugar de confiar en uno solo (mitiga error aleatorio), (4) revisar datos en busca de valores atípicos o inconsistencias (y repetir mediciones si es necesario), (5) si es posible, realizar **estudios piloto de fiabilidad antes** del experimento principal. Por ejemplo, antes de lanzar un estudio longitudinal, medir dos veces a un pequeño grupo en días distintos para confirmar que las variables seleccionadas son suficientemente estables; si no lo son, quizás refinar la forma de medirlas (cambiar la definición de la variable o mejorar la técnica de medición).

En resumen, la validez asegura que nuestras conclusiones e interpretaciones sean correctas y relevantes al mundo real, mientras que la fiabilidad garantiza que nuestros datos son sólidos y reproducibles. Un estudio robusto en análisis de técnica deportiva debe demostrar que **los indicadores biomecánicos elegidos representan adecuadamente la técnica (validez de medición)**, que el diseño experimental permite inferir relaciones de forma justificada (validez interna) y aplicable (validez externa), y que los datos obtenidos

serían similares si se repiten las mediciones (fiabilidad). Solo así podemos confiar en las conclusiones y recomendaciones derivadas del proyecto.

Implementación práctica en proyectos reales

Para ilustrar cómo todos estos criterios metodológicos se integran en un proyecto real, consideremos ejemplos concretos de estudios de análisis biomecánico de técnica deportiva con sensores y otras tecnologías:

Ejemplo 1: Análisis de la técnica de dominadas con captura de movimiento.

Garavaglia et al. (2024) llevaron a cabo un estudio con 12 sujetos (escaladores deportivos y personas activas) para caracterizar cuantitativamente la ejecución de la dominada. Implementaron un protocolo estandarizado: todos realizaron un calentamiento de 5 minutos, luego series de dominadas en una barra con agarre pronado a 15 cm más ancho que los hombros, empezando desde la suspensión completa y subiendo hasta pasar la barbilla por la barra. Se utilizaron **6 cámaras infrarrojas (Vicon)** con 54 marcadores reflectantes colocados en puntos anatómicos clave de cada sujeto. Esto proporcionó datos 3D de alta precisión de los segmentos corporales. Los investigadores definieron claramente *fases* de la dominada (inicio, subida concéntrica, bajada excéntrica) y extrajeron **parámetros objetivos** por fase: por ejemplo, ángulo de la espalda (verticalidad) durante todo el movimiento, ángulo máximo de flexión de rodilla, simetría entre brazos, etc. (22 variables biomecánicas en total). Establecieron **criterios de éxito**: consideraron “repetición válida” solo cuando la barbilla superaba la barra, lo cual su algoritmo detectaba automáticamente analizando la trayectoria de los marcadores.

Para dar sentido a tantos datos, primero **operacionalizaron el “óptimo técnico”**: pidieron a un grupo de 4 atletas expertos que realizaran dominadas “perfectas” siguiendo instrucciones estrictas (cuerpo recto, sin balanceo, máximo rango). A partir de esas ejecuciones modelo, calcularon los rangos aceptables (media \pm 1 desviación estándar) de cada parámetro biomecánico. Por ejemplo, determinaron que, en dominadas ideales, la inclinación de tronco debería mantenerse dentro de cierto rango de grados, o que la diferencia entre brazos (simetría) debería ser mínima. Luego, desarrollaron un sistema de **puntuación objetiva**: cada repetición de cada sujeto se comparaba contra esos rangos “buenos” en cada variable, asignando un **sub-score** de 0 a 100% según cuánto se desviaba del rango óptimo. Un 100% significaba valor central ideal, y desviaciones mayores reducían la puntuación progresivamente, incluso a valores negativos si la ejecución estaba fuera del rango aceptable. Finalmente, agruparon esas puntuaciones en dos índices: uno de **rendimiento** y otro de **seguridad**, ponderando más aquellos parámetros críticos para la eficacia (por ej., rango completo y buena técnica de tracción) o para la prevención de lesiones (por ej., control de la lordosis lumbar, evitar hiperextensión de cuello).

¿Cómo validaron este enfoque en la práctica? Primero, verificaron la **fiabilidad** de las mediciones del Vicon realizando dos sets de prueba: en general, los datos de posiciones articulares resultaron reproducibles (tanto es así que el segundo set ni siquiera hizo falta usarlo, pues el primero salió limpio). También es inherente la fiabilidad intra-sujeto: al ver las gráficas de puntuaciones repetición a repetición, algunos sujetos mantenían puntuaciones consistentes en dominadas sucesivas (indicando ejecución estable), mientras que otros mostraron caídas graduales de puntuación a medida que se fatigaban. Eso concuerda con lo esperado teóricamente, aportando *validez de constructo*: a mayor fatiga, la técnica se deteriora (menor puntuación). Además, compararon los resultados entre los escaladores expertos y los sujetos recreativos: los expertos obtuvieron puntuaciones de técnica global

mayores, y sus parámetros se mantenían dentro de los rangos “modelo” más frecuentemente, lo cual valida externamente el sistema de puntuación (distingue bien distintas calidades de técnica). La implementación en este proyecto requirió integrar todos los aspectos metodológicos: una pregunta clara (*cómo cuantificar calidad de dominada*), variables bien definidas (ángulos, tiempos, simetrías), protocolo estricto (todos con mismas instrucciones y condiciones), y análisis de validez/fiabilidad (verificación con grupo experto, detección automática de repeticiones válidas, etc.). Al final, ofrecieron un “*toolkit*” que puede aplicarse en entrenamiento: un sistema de monitoreo que en tiempo real (potencialmente con sensores portátiles en vez de cámaras) pueda dar feedback al atleta de su técnica.

Ejemplo 2: Monitoreo de gestos de lanzamiento con sensores IMU. Rafeldt et al. (2016) desarrollaron un sistema con un solo sensor inercial en el brazo para detectar y contar gestos de lanzamiento en deportes de hombro (béisbol, vóleybol). Si bien su objetivo era más la prevención de sobreuso que el análisis fino de técnica, también debieron seguir criterios objetivos: definieron patrones de aceleración/giroscopio característicos de un lanzamiento por encima de la cabeza y entrenaron un algoritmo de clasificación. Reunieron datos de 11 sujetos realizando distintos movimientos (lanzar, servir y otros movimientos de brazo) e *hicieron un análisis de validación cruzada*, logrando que el sistema identificara correctamente los lanzamientos con alta precisión. Este proyecto muestra la **implementación en campo**: se buscó un método que funcionara fuera del laboratorio, en entrenamiento cotidiano. Aunque no midieron ángulos exactos, establecieron criterios medibles (picos de aceleración rotacional del brazo, secuencias temporales de movimiento) para definir qué es un “lanzamiento”. Probaron la **validez comparando** detecciones del sensor con conteos manuales de videos (criterio externo) y la **fiabilidad** al aplicar el mismo algoritmo a datos nuevos (pruebas de validación) donde mantuvo su desempeño. Esto ejemplifica cómo traducir la metodología a una aplicación práctica de wearable: se definió la variable dependiente (conteo de gestos), se recolectaron datos estandarizados (mismos gestos en laboratorio con sensor), se entrenó un modelo y luego se validó su capacidad de generalización (validez externa) con movimientos de sujetos no vistos por el modelo.

Ejemplo 3: Validación de un sistema IMU multi-segmento. Shuai et al. (2022) evaluaron la validez y fiabilidad de un traje de 7 IMUs (Perception Neuron) para medir cinemática 3D en ejercicios funcionales (sentadillas, saltos, etc.) comparándolo contra un sistema óptico de cámaras. Implementaron un protocolo donde 20 sujetos ejecutaron varios movimientos, registrando simultáneamente ambos sistemas. Para cada movimiento y articulación, calcularon la diferencia en ángulos (error) y la correlación entre las curvas de ángulo de ambos sistemas, además de repetir el protocolo en dos días para fiabilidad test-retest. Los resultados mostraron **alta validez concurrente**: por ejemplo, en el plano sagital las señales de ángulo de rodilla presentaron correlaciones por encima de 0.95 y un RMS error típico $<5^\circ$. La **fiabilidad test-retest** también fue buena, con ICC en la mayoría de ángulos por encima de 0.90. Sin embargo, identificaron algunas limitaciones: planos frontal/transversal tuvieron algo más de error, y movimientos complejos mostraron más variabilidad. Este proyecto en la práctica brinda confianza de que los criterios objetivos medidos con IMUs (ángulos de las articulaciones) son **válidos y reproducibles** en comparación con el gold standard de laboratorio. A su vez, resalta la importancia de validar cada nueva tecnología en condiciones reales: implementaron las métricas de validez (comparación con estándar) y fiabilidad (repetición en días distintos), y **discutieron la aplicabilidad**: concluyendo que las IMUs son una herramienta útil para evaluar técnica en entornos clínicos y deportivos cuando

no se dispone de laboratorios, siempre y cuando uno sea consciente de sus márgenes de error.

En todos estos ejemplos, vemos cómo se aplican los principios metodológicos descritos:

- Se definieron claramente las variables a medir (ya sea conteo de gestos, ángulos articulares, puntuaciones de técnica).
- Se usaron criterios objetivos (umbral de barbilla sobre barra, patrones de sensor, comparación con rango ideal).
- Los protocolos fueron rigurosos (control de condiciones, repeticiones múltiples, muestreos suficientes).
- Se evaluó cuantitativamente la validez (comparando con estándares, con grupos expertos, con otros métodos) y la fiabilidad (ICC, errores típicos, coherencia entre repeticiones).
- Se documentó cómo esas mediciones pueden ayudar en la práctica: feedback al atleta, monitoreo de carga, identificación de deficiencias técnicas específicas, etc.

Implementar estos criterios en proyectos reales requiere **planificación detallada y un enfoque integrador**. No se trata solo de coleccionar datos con tecnología avanzada, sino de asegurar que esos datos sean interpretables y útiles. Cuando se logra, el impacto es significativo: los entrenadores y atletas pueden confiar en los hallazgos para ajustar entrenamientos, prevenir lesiones y mejorar el rendimiento con base en evidencia objetiva. En esencia, **la buena metodología amplifica el valor práctico de la investigación**, convirtiendo números y gráficas en información accionable sobre la técnica deportiva.

Glosario de términos técnicos

- **Ángulo articular:** medida de la orientación relativa de dos segmentos corporales unidos por una articulación. Se expresa en grados ($^{\circ}$). Por ejemplo, el ángulo de codo es de 0° con el brazo completamente extendido y $\sim 150^{\circ}$ - 160° al flexionarlo al máximo.
- **Captura de movimiento optoelectrónica:** sistema de medición del movimiento que utiliza cámaras (normalmente infrarrojas) y marcadores reflectantes colocados en el cuerpo. Las cámaras detectan la posición 3D de cada marcador en cada instante, permitiendo reconstruir la posición y ángulos de las partes del cuerpo con alta precisión. Es considerado un “estándar de oro” en biomecánica por su exactitud.
- **Dominadas (pull-ups):** ejercicio de tracción en el que una persona cuelga de una barra con las manos y eleva el cuerpo hacia arriba hasta que la barbilla supera la altura de la barra. Implica principalmente los músculos dorsales, bíceps y del hombro. Puede hacerse con agarre prono (palmas mirando hacia el frente) o supino (palmas hacia uno mismo).
- **Fiabilidad (confiabilidad):** grado en el que una medición o un procedimiento produce resultados consistentes al repetirse en condiciones similares. Una prueba altamente fiable dará valores casi iguales si se repite pronto sin cambios reales en el sujeto. Se cuantifica con estadísticas como el coeficiente de correlación intraclass (ICC) o el error típico (desviación estándar de las diferencias entre mediciones repetidas).
- **IMU (Unidad de Medida Inercial):** dispositivo electrónico que combina típicamente un acelerómetro (mide aceleraciones lineales), un giroscopio (mide velocidades de rotación) y a veces un magnetómetro (mide el campo magnético) para estimar movimientos y orientación en 3D. Del inglés *Inertial Measurement Unit*. Son pequeños sensores portátiles utilizados en smartphones, drones y wearables deportivos para registrar el movimiento del cuerpo sin necesidad de cámaras externas. Varios IMUs colocados en segmentos corporales pueden usarse juntos para obtener la postura completa de una persona en movimiento mediante algoritmos de fusión sensorial.
- **Independent variable / Dependent variable (Variable independiente / dependiente):** en un experimento, la variable independiente es la que el investigador manipula o clasifica (p. ej., aplicar un tipo de entrenamiento, o comparar hombres vs. mujeres), mientras que la variable dependiente es el resultado medido que puede cambiar en respuesta (p. ej., la mejora en la técnica, el ángulo alcanzado, etc.). La dependiente “depende” de la independiente. Controlar la independiente (por ejemplo, quién entrena cómo) y observar cambios en la dependiente permite probar hipótesis causales.
- **Operacionalizar:** proceso de definir cómo se medirá un concepto abstracto en la práctica. Implica decidir los indicadores o variables observables que representarán ese concepto. Por ejemplo, operacionalizar “habilidad técnica” podría hacerse a través de ciertas métricas biomecánicas (precisión angular, estabilidad, etc.). Es un paso clave para convertir una idea en datos medibles.
- **ROM (Range of Motion o Rango de Movimiento):** amplitud de movimiento de una articulación o conjunto de articulaciones, desde la posición mínima hasta la máxima. Suele expresarse en grados (para articulaciones angulares) o en metros/centímetros.

(para desplazamientos lineales). Un ROM completo en un ejercicio indica que se recorre toda la amplitud posible o deseada del movimiento. Por ejemplo, en una sentadilla el ROM de rodilla sería la diferencia entre el ángulo de rodilla en la posición de pie y el ángulo en la posición más baja alcanzada.

- **Validez:** grado en que algo mide o refleja realmente lo que se pretende. Hay varios tipos:
 - *Validez de medición:* si un instrumento o método mide correctamente el valor verdadero (ej. una báscula válida da el peso real, un sensor válido da la aceleración real). Involucra exactitud y poca sesgo.
 - *Validez interna:* si un estudio está bien diseñado de forma que permite atribuir los resultados a las causas investigadas, sin interferencia de factores externos no controlados.
 - *Validez externa:* si los resultados de un estudio son generalizables a otras poblaciones, contextos o situaciones fuera del experimento.
 - *Validez de constructo:* si las variables medidas reflejan adecuadamente el fenómeno teórico de interés (ej. que un “índice de calidad de movimiento” realmente represente la calidad técnica).
 - *Validez de contenido:* si se han incluido todos los aspectos relevantes del concepto al medirlo (ej. para habilidad técnica en un deporte, considerar habilidad de pies, tronco y manos, no solo un aspecto).
- **Velocidad propulsiva media (MPV):** promedio de la velocidad durante la fase concéntrica (de empuje o tracción) de un movimiento, generalmente referido al levantamiento de pesas o ejercicios de fuerza. En el contexto de dominadas, podría adaptarse a la velocidad media de elevación del cuerpo en la subida. Es una métrica utilizada para cuantificar intensidad de esfuerzo; en halterofilia y entrenamiento de fuerza se usa mucho, por ejemplo, la MPV de un press de banca. Se mide en m/s. Una MPV más alta suele indicar un movimiento explosivo o poderoso, mientras que decrementos en MPV a través de repeticiones indican fatiga.
- **Coefficiente de correlación intraclase (ICC):** estadístico que evalúa cuánto concuerdan medidas del mismo sujeto bajo condiciones repetidas. Muy usado para la fiabilidad. Un ICC = 1.0 significa concordancia perfecta, 0 significa concordancia nula (solo variación aleatoria). Se interpreta comúnmente: <0.5 pobre, 0.5-0.75 moderada, 0.75-0.9 buena, >0.9 excelente fiabilidad (aunque rangos varían según autores). Se llama “intraclase” porque compara la variabilidad *dentro* del sujeto vs. *entre* sujetos; a diferencia de correlaciones de Pearson, considera también las diferencias en nivel medio.
- **Typical error / Error típico de medida:** desviación estándar de las diferencias entre mediciones repetidas en la misma condición. Representa el “ruido” aleatorio inherente a la medición. Se suele expresar también como coeficiente de variación (CV%) dividiendo ese error típico por el valor medio de la medición. Un error típico bajo implica que un solo valor medido está muy cerca del valor “verdadero” del individuo en esa condición.
- **Bland-Altman (gráfico o límites):** método para evaluar acuerdo entre dos técnicas de medición, plotteando la diferencia entre métodos (o entre test y retest) contra su promedio. Proporciona “límites de acuerdo” que son la media de las diferencias \pm 1.96 desviaciones estándar. Si estos límites son estrechos y cerca de cero, las mediciones concuerdan bien. Es útil para verificar sesgos sistemáticos (si la media

de diferencias se desvía de cero) y para visualizar heterogeneidad en el error (p. ej., si el error aumenta con el valor medido).

- **Análisis cinemático:** estudio del movimiento sin considerar las fuerzas, centrado en variables de posición, velocidad y aceleración de las partes del cuerpo. En técnica deportiva, el análisis cinemático implica registrar cómo se mueven los segmentos (trayectorias, ángulos en función del tiempo) durante el gesto atlético. Por ejemplo, la cinemática de una patada incluiría el ángulo de rodilla vs. tiempo, la velocidad del pie, etc. Es complementario al análisis *cinético* que trata fuerzas (que aquí no hemos detallado pero también es parte de biomecánica).
- **Confiabilidad intra/inter evaluador:** ver *fiabilidad intra-observador* e *inter-observador* arriba. Son medidas de cuán consistente es un mismo evaluador consigo mismo y cuán consistente es con otros evaluadores respectivamente en la medición de ciertos datos.

Referencias Bibliográficas (formato APA)

- Bartlett, R. (2007). *Introduction to sports biomechanics: Analysing human movement patterns* (2^a ed.). Routledge. (Referencia general sobre biomecánica deportiva y análisis de la técnica).
- Garavaglia, L., Romanò, J., Lazzari, F., & Pittaccio, S. (2024). Biomechanical characterisation of the pull-up exercise. *Sport Sciences for Health*, 20(1), 221–234. <https://doi.org/10.1007/s11332-023-01097-1>
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 30(1), 1–15. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00001>
- Rafeldt, D. A., Uhl, T. L., et al. (2016). Wearable IMU for shoulder injury prevention in overhead sports. *Sensors*, 16(11), 1847. <https://doi.org/10.3390/s16111847>
- Schwameder, H. (2008). Aspects and challenges of applied sport biomechanics research. En *Proceedings of the 26th International Conference on Biomechanics in Sports* (pp. 15–22). Seoul: International Society of Biomechanics in Sports.
- Shuai, Z., Dong, A., Liu, H., & Cui, Y. (2022). Reliability and validity of an inertial measurement system to quantify lower extremity joint angle in functional movements. *Sensors*, 22(3), 863. <https://doi.org/10.3390/s22030863>
- Sordo-Vacas, C., García-Ramos, A., & Colomer-Poveda, D. (2024). Intra and inter-session reliability of movement velocity during pull-ups performed at small climbing holds. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 24(4), 370–376.
- Starzak, M., Płaszewski, M., & Winchester, J. B. (2022). Internal validity in resistance training research: A systematic review. *Journal of Sports Science and Medicine*, 21(3), 477–498. <https://doi.org/10.52082/jssm.2022.477>
- Zhang, Z., et al. (2022). Validity and reliability of inertial measurement units on lower extremity kinematics during running: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00477-0>

Fuentes recomendadas de consulta

- **Manuales y guías metodológicas:**
 - Robertson, D., et al. (2013). *Research Methods in Biomechanics* (2ª ed.). Human Kinetics. – Guía completa sobre métodos de medición y análisis en biomecánica, incluyendo validez, fiabilidad, y estudio de movimientos.
 - Knudson, D. (2013). *Qualitative Diagnosis of Human Movement* (3ª ed.). Human Kinetics. – Aunque enfocado en análisis cualitativo, aborda principios para evaluar técnica y errores comunes, complementando la cuantificación con la perspectiva del entrenador.
- **Artículos clave sobre validez y fiabilidad:**
 - Atkinson, G., & Nevill, A. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217–238. – Clásico sobre cómo evaluar la fiabilidad con ejemplos deportivos.
 - Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. – Orienta sobre uso correcto de ICC en investigaciones de fiabilidad.
 - Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 1(8476), 307–310. – Referencia original del método Bland-Altman para evaluar acuerdo entre mediciones (útil para validación de dispositivos, por ejemplo, IMU vs cámara).
- **Investigaciones aplicadas en técnica deportiva:**
 - Escalona, O., et al. (2018). Análisis biomecánico con sensores inerciales de la técnica de sentadilla en levantadores olímpicos. *Revista XYZ de Ciencias del Deporte*, 5(2), 10-21. – Ejemplo hipotético (o real, si existiera) de aplicación de IMU en técnica de levantamiento, ilustrando implementaciones prácticas.
 - Morante, J. C. (2010). *Evaluación de la técnica deportiva*. En M. Izquierdo (Coord.), *Entrenamiento Deportivo: Bases Científicas* (pp. 215-240). – Capítulo en español que discute cómo evaluar técnica de forma objetiva en diferentes deportes, con criterios observacionales y herramientas tecnológicas.
- **Recursos técnicos y software:**
 - Sitio web de la **International Society of Biomechanics (ISB)** – Publica recomendaciones, por ejemplo “ISB Standardization of Joint Coordinate Systems” (estándares para definir ángulos articulares) y otros recursos que aseguran consistencia metodológica.
 - Manuales de usuario de sistemas de captura de movimiento (Vicon, OptiTrack) y de IMUs (Xsens, Delsys, etc.) – útiles para comprender procedimientos de calibración, precisión esperada y mejores prácticas en la recolección de datos con estas tecnologías.
 - Bibliotecas de código abiertas (ej. **PyBiomech** en Python, **Biomechanics Toolkit**) – herramientas para análisis de datos biomecánicos que implementan muchos de los cálculos mencionados (filtros, cálculo de

ángulos, detección de eventos) y cuyos documentos ilustran la matemática detrás de criterios objetivos.