



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

[193043] Diseño de una metodología para la caracterización de la postura de ciclistas en pruebas de laboratorio.

Daniel Sebastián Kempe Quiroga^{a,c}, Diego Felipe Rodríguez Castellanos^{a,c}, Juan Camilo Toloza Medina^{a,c}, María Alejandra Sánchez Samper^{a,c}.

Alejandra Paola Polanco^c

^a*Estudiante de Ingeniería Industrial*

^b*Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial*

^c*Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*

Summary

Researchers have taken cyclist posture into account to assess performance results and achieve improvements in sport management execution. The users' posture and the bicycle setup can affect their distribution of body weight, and thus their comfort. Incorrect posture can cause injuries or physical disturbances such as muscle pain, patellar tendinopathy, and Achilles tendinopathy.

The ergonomics studies with cyclists are generally carried out in specialized sports laboratories. These complex systems are usually reserved for professional cyclists due to their high costs. The extensive implementation process limits the number of athletes who can afford these studies, as well as the environments in which these studies can be carried out. This generates a gap in sports knowledge about performance and posture measurement in applications and competitions on outdoor trails.

The variables chosen for the characterization of cyclist posture in indoor and outdoor tests were the angular positions of the elbow and shoulder joints, and the angle of inclination of the back in reference to the vertical axis of the cyclist. These variables were chosen because due to the nature of motion during cycling, in which the legs are in constant movement and the upper body segments remain still. The result of the research involved defining and implementing an accessible engineering tool to characterize upper body posture during tests focused on cycling. To achieve this, a protocol for the measurement of cycling posture for indoor and outdoor tests was defined, and the methodology was implemented in a case study.

The procedure for the selection of the tool was established from the documentation of the need for research, benchmarking, and selection of the tools with the best performance proposal for the project. The implementation was based on the testing procedure, posture measurement process, and data processing. Once these elements have been developed, the cyclists who would participate in the test and the duration of the tests were defined, considering factors

such as warm-up, rest, and post-effort times. The validations in pilot tests and the case study made it possible to understand the operation of the tools and identify opportunities for improvement for future research.

The designed protocol analysis and its validation in pilot tests showed that the joint implementation of two motion capture tools: Optical and inertial, allowed a greater collection of information of interest of the test subject in both indoor and outdoor tests. This was validated through a case study developed to study if there is a significant relationship between the change in pedaling intensity and the selected tool in the cyclists' posture, this allowed to properly validate the levels of significance existing between the proposed variables and the angular position of the joints of the human body.

1. Justificación y planteamiento del problema

Durante los últimos años el interés de los investigadores en el ciclismo ha aumentado significativamente. Debido al incremento del uso de la bicicleta como medio de transporte y como una alternativa de deporte se han abierto nuevas oportunidades de estudio. Estimaciones demográficas recientes indican que en el mundo existe una población de ciclistas de más de dos billones de personas, que abarcan un amplio rango de edades, con variados antecedentes médicos y habilidades físicas (Sigcho, 2015). El aumento en el interés y el uso de la bicicleta en deportistas no profesionales ha permitido identificar un vacío en las investigaciones de estos en cuanto al análisis del desempeño, la salud y otros ámbitos relacionados con la postura al utilizar la bicicleta.

Los investigadores han tenido en cuenta la postura del ciclista como objeto de estudio. La postura se define como la “manera en que está colocado el cuerpo o una parte del cuerpo de una persona o de un animal” (RAE). Al estudiar variables como la velocidad, resistencia y potencia de los ciclistas, la postura es considerada un aspecto fundamental para explicar los resultados del desempeño. Los estudios biomecánicos de las técnicas de ejecución indican que las medidas correctivas de la postura generan un mejor rendimiento y ejecución de la gestión deportiva. Además de esto, se busca disminuir las lesiones y las alteraciones físicas con la implementación de una técnica adecuada (Coronado, Borda & Pérez, 2018). Por lo anterior, es importante evaluar la postura para disminuir al máximo las posibles lesiones que puedan presentar las personas que participan en las investigaciones como sujetos de prueba.

La práctica del ciclismo requiere de muchas horas de entrenamiento manteniendo una postura adecuada para el ciclista, es por esto, que es fundamental acudir a una buena caracterización de la postura con el fin de evitar lesiones futuras. Las lesiones más comunes por la mala postura se presentan en las manos, las muñecas, raquis cervical, raquis lumbar y rodillas (Navarrete, 2017). Investigaciones recientes registran que el 40% de estas lesiones se evidencian en dolor en el cuello y la espalda, producto de flexionar desmedidamente la zona cervical y lumbar. El 32% se evidencia en la tendinopatía rotuliana por la mala posición del asiento y un 17% va dirigido a la tendinopatía del tendón de Aquiles (Singaña & Estefanía 2018). Con el fin de disminuir las lesiones en los ciclistas es relevante evaluar y analizar la postura, lo que lleva a obtener información detallada de la posición del sujeto de prueba, incluyendo todas aquellas mediciones que determinan la ubicación de su cuerpo y extremidades con respecto a la bicicleta.

La biomecánica proporciona información acerca de la geometría del cuerpo al momento de desempeñar alguna tarea deportiva. De acuerdo con la Real Academia Española (2019), la biomecánica es el “estudio de la aplicación de las leyes de la mecánica a la estructura y el movimiento de los seres vivos”. Investigaciones demuestran la importancia de la biomecánica aplicada para la mejora y la seguridad del rendimiento en bicicleta. Las últimas décadas han sido testigos de una notable expansión en el conocimiento y la aplicación de los principios biomecánicos en el deporte y el ejercicio del ciclismo (Bini & Carpes, 2014). Sin embargo, a pesar de conocer la importancia de la mecánica del cuerpo en el desarrollo del ciclismo, es difícil encontrar suficientes métodos para medirla y controlarla en diferentes escenarios.

Para estudiar la mecánica del cuerpo uno de los métodos más comunes es la evaluación de la cinemática articular. Este método busca detectar la posición de uniones y segmentos del cuerpo humano, permitiendo así, la evaluación de traslaciones y rotaciones de las diferentes partes y articulaciones del cuerpo. La cinemática del movimiento humano ha sido objeto de investigaciones en áreas relacionadas con la medicina, ciencia deportiva e ingeniería biomédica

(Roberts, Mongeon & Prince¹, 2017). Sin embargo, evaluar y analizar la postura es en ocasiones complejo y requiere de equipo especializado para obtener la información del sujeto de prueba.

El estudio científico de la ergonomía con ciclistas se desarrolla generalmente en laboratorios deportivos especializados. Estos laboratorios cuentan con la tecnología para desarrollar análisis postural por medio de servicios que incluyen *Bikefitting* y ajuste de postura según protocolos como el *Function In Sitting Test* (F.I.S.T)². Estos análisis son comúnmente dirigidos a profesionales o ciclistas con un nivel avanzado que buscan mejorar su desempeño a través de una adecuación de su bicicleta y una correcta postura corporal. Estos complejos sistemas están reservados, debido a sus altos costos y extenso proceso de ejecución, a un selecto grupo de deportistas, y dejando de lado al grupo aficionado, el cual representa una población considerable (Carrasco et al, 2016). Adicional al uso de tecnología, la realización de los estudios de análisis postural requiere el seguimiento de metodologías especializadas para garantizar conclusiones derivadas de los resultados de las observaciones.

Existen diversas formas de medir la postura del ciclista y recolectar información importante para el análisis del gesto deportivo incluyendo pruebas de laboratorio. Una prueba de laboratorio consiste en la realización de estudios médicos, fisiológicos, ergonómicos o biomecánicos en ambientes controlados que permiten medir características de los deportistas para proponer estrategias que permitan mejorar su desempeño. Al realizar el estudio de la caracterización de las demandas fisiológicas, importantes para observar el rendimiento durante una prueba de ciclismo de laboratorio en ciclistas de ruta competitivos y aficionados de élite, se pudo determinar que los resultados indican que la carga de trabajo máxima absoluta y las variables antropométricas, son los mejores estimadores, por lo menos, en el rendimiento de ciclismo de corta duración (veinte minutos o menos) (Antón et al, 2015). La especificidad de las variables que pueden medirse al evaluar la postura y movimientos de los ciclistas en pruebas de laboratorio difieren de otras etapas de observación y dependen de las características técnicas del lugar de medición.

En las pruebas de ruta se deben considerar factores diferentes a los evaluados en el desarrollo de pruebas en ambientes controlados o de laboratorio. Los investigadores asumen diferentes retos inherentes a la aplicación de las pruebas en ambientes que no pueden ser controlados, como la dificultad de tomar datos de un usuario en movimiento, los factores ambientales al momento de implementar la prueba, entre otros. Teniendo en cuenta lo anterior, la implementación en entornos no controlados, proporcionan información asociada a un escenario más aproximado a las condiciones reales del ejercicio deportivo. A medida que la tecnología avanza y se desarrollan herramientas para medir postura en pruebas investigativas, así mismo, se cuestiona la confiabilidad de las pruebas de laboratorio. En consecuencia, en el estudio realizado por Rylands, Roberts & Hurst (2015) se pudo concluir que las pruebas de ruta son un método de análisis más importante que las pruebas en ambientes controlados o de laboratorio. A pesar de las diferencias encontradas en las pruebas de laboratorio y de ruta, es importante caracterizar una postura constante en los sujetos de prueba para garantizar la veracidad de los resultados.

La postura de los ciclistas es una característica importante para evaluar el confort y rendimiento en pruebas controladas. Al caracterizar la capacidad de entrega de potencia se puede evaluar el rendimiento de los ciclistas y al estimar la presión sobre áreas de contacto se observa cómo afecta el confort de los sujetos de prueba. Es por esto, que, seleccionar la postura adecuada para el ciclista, se ve limitada por umbrales como la exposición de las áreas de contacto y la transmisión de vibraciones en el sistema de referencia bicicleta-ciclista (Polanco et al, 2020). Por esta razón, la transmisión de vibraciones es un factor importante a considerar durante las pruebas de esfuerzo.

La vibración que los ciclistas pueden experimentar al realizar pruebas de esfuerzo tiene un efecto directo en el confort del usuario. Los investigadores evidenciaron diversos niveles de confort que afectan la postura del ciclista basado en la respuesta de algunos puntos sensibles ubicados sobre la bicicleta. Según Polanco et al (2019), los estudios realizados

¹ Son los estudios de biomecánica enfocados en el ciclismo. Comprende la medición del cuerpo y el ajuste de la bicicleta para que ambos trabajen eficientemente. El *Bikefitting* busca reducir lesiones, contracturas musculares, dolores articulares y mejorar la comodidad del usuario al usar bicicleta.

² *Function In Sitting Test* es un examen clínico de equilibrio basado en el rendimiento de catorce ítems, el cual puede usarse para rastrear los cambios en el "equilibrio sentado" con el tiempo. (Gorman, 2011)

acerca de la transmisión de las vibraciones que se presentan en la bicicleta, se concentran en la reducción de la variabilidad de la postura de los ciclistas. Según lo mencionado anteriormente, esto puede ocasionar problemas al mantener una postura constante y al monitoreo de las variaciones que se presentan durante la prueba.

Teniendo en cuenta la importancia de la postura en ámbitos investigativos y para garantizar una buena experiencia en el ciclismo, se propone desarrollar una metodología con el fin de caracterizar la postura de ciclistas que permita una fácil implementación. La metodología se compone por la selección de una herramienta que permita analizar la postura y la definición de un método que facilite a los investigadores obtener información postural de los ciclistas en pruebas de laboratorio y de ruta. Al aplicar la metodología diseñada, se busca reducir los tiempos de recolección y análisis de datos de la postura, y disminuir la variabilidad de los resultados durante los periodos de observación. Por otro lado, al aplicarla en estudios para controlar la postura se pueda analizar el desempeño en ciclistas y prevenir futuras lesiones.

Por lo tanto, se plantea como pregunta de investigación: ¿La información obtenida por medio de la metodología propuesta es comparable con una metodología actual de medición de postura? Se plantea la hipótesis de que la estimación de postura en pruebas de laboratorio y de ruta con la metodología diseñada, y la herramienta seleccionada, no difiera de forma estadísticamente significativa respecto a la estimación de postura de la metodología modelo.

2. Antecedentes

Un incorrecto acoplamiento del manillar, el sillín y los pedales dificulta una distribución uniforme del peso del cuerpo, lo cual puede afectar la comodidad del usuario. Existen diversos factores que pueden afectar este acoplamiento, como el mal ajuste del sillín (altura, retroceso, distancia al manillar), anchura y agarre del manillar, y el agarre de los pedales. La postura del cuerpo en algunas investigaciones se determina a partir del punto de contacto entre el manillar y las manos y se cuantifica en términos de la ubicación de su centro de masa y la ubicación del punto de contacto entre el manillar y las manos (Polanco, Suárez, & Muñoz, 2017). Teniendo en cuenta la importancia de la postura en el desarrollo del ciclismo, se han desarrollado diferentes herramientas especializadas para capturar el movimiento de los ciclistas, con el fin de evitar malas posturas.

La tecnología de captura de movimientos o *motion capture* (MOCAP) es aplicada en diversos campos de la ciencia, deporte, arte y videojuegos. El MOCAP es el proceso de grabación del movimiento de humanos o animales para transferirlo a un personaje digital. Se encuentran diferentes tipos de captura de movimiento como los son ópticas, inerciales, magnéticas y mecánicas. Por medio de captura de movimiento se ven aplicaciones para optimizar el rendimiento deportivo, debido a que esta tecnología permite capturar parámetros de movimiento lineales y coordenadas angulares, facilitando así la toma de datos de los deportistas en pruebas (Echeverry et al, 2018). Teniendo en cuenta lo anterior existen diferencias importantes entre las diversas tecnologías y la forma en que cada sistema recoge información del movimiento desarrollado.

Los métodos de captura de movimiento ópticos son ampliamente usados en el mercado actualmente. Un ejemplo de estos sistemas son los que proporciona la tecnología VICON, que mediante sistemas de cámaras, sensores y marcadores especiales (algunos sistemas no necesitan marcadores) es posible convertir información de un movimiento real a datos digitales. En estudios realizados recientemente se demuestra que los sistemas de captura de movimiento con mayor empleabilidad son los sistemas ópticos (Echeverry et al, 2018). Estos sistemas son ampliamente usados debido a la variedad de opciones que ofrecen. Al usar un MOCAP basado en marcadores es posible usar marcadores reflectantes (pasivos) o auto iluminados (activos) (Matthew, Seko & Bajcsy 2017). Sin embargo, los sistemas ópticos requieren de buena iluminación y un ambiente controlado, además del conocimiento de la ubicación del marcador sobre el segmento del cuerpo, lo cual toma una cantidad significativa de tiempo y es necesario considerar otras alternativas del mercado.

Los sistemas de captura de movimiento inerciales IMU (Inertial Measurement Units) han sido investigados como una alternativa para medir la cinemática humana. Estos sensores funcionan como un sistema de sensor activo que permite mediciones fuera de un ambiente experimental y calculan la rotación de segmentos corporales. Los IMU son estratégicos para el análisis del movimiento humano, debido a su portabilidad, fácil manipulación y gran exactitud en la información cinemática capturada. La captura de movimiento inercial es una herramienta en la cual la adaptación de los sensores con el usuario toma menos tiempo y facilita la investigación en campo, ya que puede ser transportada (Mangia et al. 2017). Conociendo esto, los sistemas inerciales tienen limitaciones al no poder realizar mediciones

directas. Los sistemas IMU requieren de una gran cantidad de cálculos y algoritmos para ejecutar la estimación de su orientación.

Captura de movimiento óptico

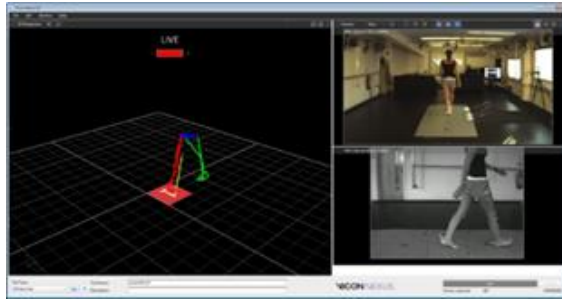


Figura 1. Herramienta Vicon Nexus [Imagen tomada de: <https://www.vicon.com/software/nexus/>].

Captura de movimiento inercial



Figura 2. Imagen de la herramienta IMU [Imagen tomada de: <https://www.thepocketlab.com/store/pocketlab-one>].

Los sistemas magnéticos de captura de movimiento son sistemas poco usuales pero que cada vez su uso es más frecuente. Estos sistemas cuentan con características de portabilidad que permite obtener mediciones fuera de un laboratorio, lo que los hace muy útiles en mediciones deportivas. Se han reportado estudios que indican que los sistemas de captura del movimiento magnéticos proporcionan información cuantitativa de análisis biomecánicos comparables con los datos arrojados por otros sistemas de captura más costosos y voluminosos, y además no requieren de una preparación tediosa del área de estudio gracias a su portabilidad (Echeverry et al, 2018). Estos sistemas han demostrado ser confiables en algunas zonas de operación como los tobillos y las rodillas, sin embargo, en algunas otras zonas de operación como la cadera proporciona menor concordancia de la información (Echeverry et al, 2018). Todos estos métodos pueden ser costosos o complejos de implementar en pruebas de laboratorio y de ruta, por lo que en ocasiones al medir la postura de los ciclistas se puede llegar a realizar prácticas dudosas que no garanticen una base de datos confiable.

Los recursos limitados que tienen los investigadores al momento de desarrollar pruebas de laboratorio en ocasiones, puede llevarlos a realizar prácticas no convencionales. Estas prácticas en las que incurren no son confiables debido a que se pueden generar pérdidas de información relevante para el análisis y conclusión de los procedimientos. Lo anterior se evidencia en investigaciones como la realizada en Milán donde se deseaba saber si al ubicar una alforja en la bicicleta se generaba algún cambio en la postura del usuario. Al desarrollar la investigación se grabó al sujeto de prueba y en la pantalla del computador emisor se ubicó un acetato, en el cual se calcó la silueta del usuario, con el fin de observar si la postura generaba alguna alteración durante el proceso (Global Cycling Network, 2018). Sin duda es una solución muy práctica cuando no se tienen los recursos necesarios, sin embargo, no garantiza la veracidad de los datos obtenidos. Como consecuencia, las prácticas no convencionales pueden afectar no solo la obtención de datos, sino otros factores relevantes en la investigación.



Figura 3. Posición alforja [Imagen tomada de: <https://www.youtube.com/watch?v=wdfB5fbVHck>].



Figura 4. Imagen de la herramienta IMU alforja [Imagen tomada de: <https://www.youtube.com/watch?v=wdfB5fbVHck>].

Al momento de realizar una prueba de laboratorio es fundamental garantizar la seguridad del usuario en la bicicleta. La seguridad física de cualquier individuo dentro de un escenario de estudio es clave fundamental para el desarrollo de las buenas prácticas que se deben llevar a cabo en cualquier investigación. Teniendo en cuenta lo anterior y el estudio realizado en el documento de (Blocken et. al 2012), se evidencia que los investigadores, con el fin de garantizar una postura constante en el ciclista, instalaron una varilla en la bicicleta, la cual termina en la barbilla del usuario y su pecho. De esta forma, el ciclista, al generar movimiento, no pierde su eje de apoyo y logra mantener su postura. El problema radica en que esta práctica no es la más segura ni la más cómoda, a pesar de que se cumple lo que se requiere en temas investigativos, se debe buscar una mejor alternativa que sea amigable con el usuario en prueba y con los investigadores.



Figura 5. Demostración implementación varilla [Imagen tomada de Blocken et al. (2012)].

Con la información obtenida en la investigación se pretende implementar una metodología que cuente con herramientas de captura de movimiento, buscando evaluar la postura de ciclistas de manera efectiva y de fácil implementación en ámbitos investigativos. Con la metodología propuesta, se pretende dar precisión y disminuir los problemas que presentaron algunos investigadores a lo largo de sus estudios, se espera que la postura del ciclista sea constante a pesar de no tener los recursos suficientes para usar un equipo de alto costo.

3. Objetivos

Objetivo General

Diseñar una metodología para caracterizar la postura durante pruebas de laboratorio y de ruta para ciclistas.

Objetivos específicos

1. Definir las variables y los requisitos para el diseño de la metodología.
 2. Definir un protocolo para la medición de la postura de ciclistas en pruebas de ruta y laboratorio.
 3. Implementar el protocolo en un caso de estudio para analizar el efecto del cambio de carga sobre la postura del ciclista.
-

NOTA: La metodología se diseñó con el fin de implementarse tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de ruta, sin embargo, por temas de la contingencia sanitaria (COVID-19), no se pudo realizar la validación de las pruebas de ruta establecidas en el presente trabajo.

4. Resumen diseño en ingeniería

Los requerimientos de desempeño establecidos son que la metodología diseñada permita caracterizar la postura de los ciclistas por medio de la cuantificación de diferentes parámetros posturales, implementando una herramienta sin la necesidad de un equipo especializado adicional. Adicionalmente, el objetivo es que la propuesta del diseño de la herramienta metodológica tenga un impacto real para evaluar la postura de los ciclistas y que al mismo tiempo sea aplicable para pruebas de laboratorio y de ruta.

Debido a la contingencia sanitaria a nivel mundial que se presenta actualmente por el COVID-19 y las medidas de seguridad estipuladas por el gobierno durante el aislamiento preventivo obligatorio, los requerimientos de desempeño esperados de la metodología presentada en este trabajo tienen variaciones en los tres aspectos planteados de la siguiente manera:

- **Precisión:** Se compararon las variables de medición de postura de ciclistas mediante un análisis de varianza (ANOVA³) en un caso de estudio. Este se compone de una comparación entre las dos herramientas y el análisis del efecto que presenta el cambio de intensidad de potencia sobre la postura del ciclista.
- **Complejidad:** Se realizó un cuadro de ponderación de factores, con el fin de comparar las posibles metodologías que se utilizaran. Su objetivo es centrarse en los diferentes factores seleccionados (facilidad de uso de la herramienta, transporte y montaje de los instrumentos, análisis y procesamiento de datos, entre otros) a través del método PURE⁴. Dado a lo anterior, se espera que la facilidad de uso de la herramienta seleccionada supere un valor 3 en una escala de cinco.

³ **ANOVA:** Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

⁴ **Método PURE:** Método de evaluación de usabilidad en el que los expertos asignan una o más calificaciones cuantitativas a un diseño basado en un conjunto de criterios y luego combinan todas estas calificaciones en una puntuación final y una representación visual fácil de entender. (Christian Rohrer, 2017).

- **Morfología:** Al momento de desarrollar la metodología, se deben tener en cuenta ciertos factores para el caso de estudio. Se tuvieron en cuenta las diferentes dimensiones corporales de los sujetos de prueba para poder caracterizar diferentes parámetros posturales. Si bien el género y la edad de los sujetos de prueba son factores importantes para considerar, por razones de la contingencia solo fue posible contar con una población limitada, en su totalidad masculina y en un rango de edad entre los 18 a 42 años. Así mismo, los usuarios deben tener conocimientos previos del ciclismo (dos meses de experiencia).

5. Metodología

El protocolo para la medición de la postura de ciclistas se definió a partir de un conjunto de variables a medir y de requisitos a considerar. A partir de éstos, se procedió a definir las herramientas a utilizar en el protocolo para caracterizar la postura de ciclistas. Posteriormente, se realizó la validación del protocolo y, por último, su implementación para medir la postura de ciclistas durante un caso de estudio.

5.1. Definición de variables y requisitos

En el ciclismo, la mayor parte del movimiento se da sobre el plano sagital, por lo tanto, para el desarrollo de la metodología se decidió trabajar sobre este plano, el cual divide el cuerpo en mitad derecho y mitad izquierdo. Adicionalmente, se decidió trabajar en el tren superior, debido a que en este plano los movimientos se presentan de forma simétrica y es donde se presentan los mayores cambios al momento de mantener una postura constante. Por lo anterior, se realizó una simplificación de los segmentos corporales en tres (3) ángulos asumiendo que son los que presentan una mayor variación durante una prueba de esfuerzo. Sin embargo, se sabe que para tener un resultado más detallado de las pruebas en el tren superior es necesario contar con más ángulos de referencia. Por fines prácticos, se realizó una simplificación al momento de seleccionar los ángulos escogiendo los de mayor relevancia.

A continuación, se presentan las tres (3) articulaciones a evaluar en el trabajo de investigación:

- **Articulación codo:** ángulo formado entre el brazo y el antebrazo.
- **Articulación del hombro:** ángulo formado entre el brazo y el torso.
- **Espalda:** ángulo formado entre la espalda y el eje vertical

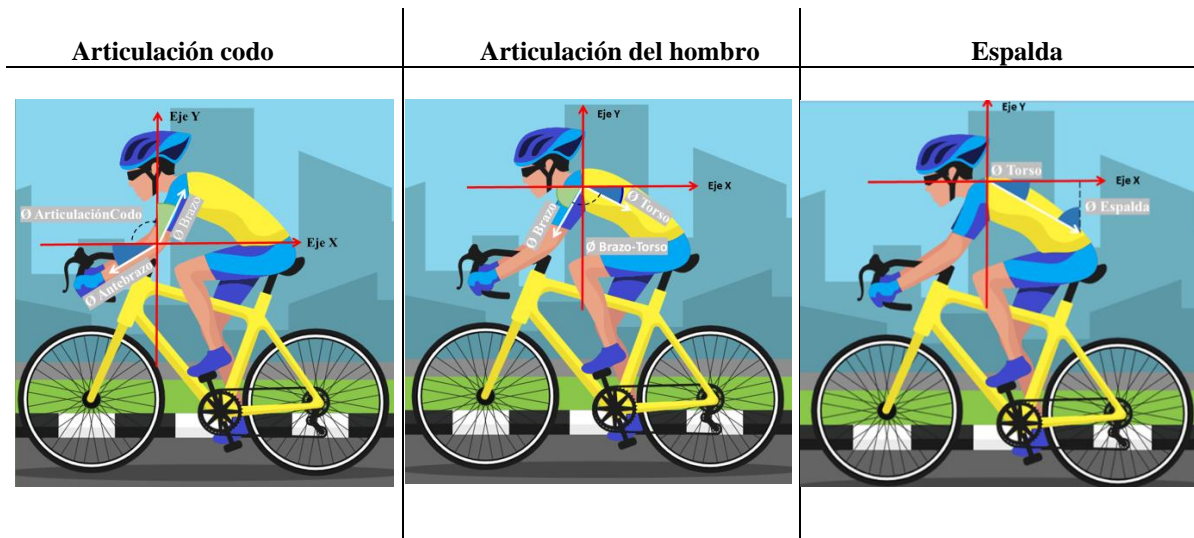


Figura 6. Posiciones angulares de las articulaciones del cuerpo.

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio y de ruta se estipularon algunos requisitos básicos para llevarlas a cabo. En el caso del laboratorio, es necesario contar con buena iluminación y un amplio espacio para el desplazamiento

del ciclista, el grupo de investigadores y para la ubicación de los diferentes equipos a utilizar. Por otro lado, en el escenario de ruta⁵, al no tener las facilidades que presenta el ambiente de laboratorio, debe contar con un personal de apoyo para garantizar la correcta toma de datos durante todo el recorrido. Así mismo, se deben evitar factores externos que puedan afectar la medición de datos como la poca iluminación, clima, circulación de peatones, entre otros.

5.2. Definición del protocolo para la medición de ciclistas

La metodología de selección de la herramienta fue de tipo cualitativa, en la cual se realizó una recolección de información de diferentes herramientas con el fin de establecer un juicio de valor de las herramientas estudiadas. Los estudios cualitativos intentan describir sistemáticamente las características de las variables y fenómenos con el fin de generar y perfeccionar categorías conceptuales, descubrir y validar asociaciones entre fenómenos o comparar los constructos y postulados generados a partir de fenómenos observados en distintos contextos (Quecedo & Castaño, 2002). El proceso de investigación del presente trabajo se desarrolló en tres actividades: (1) Necesidad, (2) Selección preliminar y (3) Selección final. La etapa de necesidad (1) consiste en detallar el objetivo que se desea satisfacer con la herramienta. En la actividad (2), Selección preliminar, se llevó a cabo en dos pasos: (a) Búsqueda en el mercado, (b) Evaluación y selección inicial de los candidatos. En la actividad (3), Selección final, se desarrolló una matriz de ponderación de factores para seleccionar las herramientas finales que cumplirán los objetivos finales del proyecto.

Esta metodología se basó en la recolección de información de las herramientas ya existentes y la evaluación por medio de diversos factores para analizar cuál es la que logra satisfacer los objetivos de la investigación. Se asignó el valor porcentual a cada criterio de la tabla, el cual fue consultado y estudiado por los evaluadores, con el fin de decidir cuantitativamente. Finalmente, se realizó una operación matemática, en donde se multiplicó el porcentaje de cada criterio por el valor numérico de la escala (1 al 5) asignado a cada herramienta en cada criterio, siendo cinco (5) el mayor. Teniendo en cuenta lo anterior, el total acumulado es la suma de cada subtotal calculado al realizar la multiplicación previamente mencionada. La herramienta con mayor valor fue seleccionada.

Se debe tener en cuenta que el tiempo que se tiene para el desarrollo de la investigación fue limitado. Dado lo anterior, se buscó una herramienta con la cual, el proceso de aprendizaje de utilización de los equipos esté acorde al tiempo disponible. Adicionalmente, es recomendable que el equipo se pueda transportar con facilidad y al momento de hacer uso de este su instalación no sea compleja. Por otro lado, debido a que las pruebas son realizadas tanto en laboratorio como en ruta, la herramienta debe permitir la toma de datos cuando el sujeto de prueba se encuentre en movimiento (prueba en ruta). Este requisito es muy importante, debido a que no todas las herramientas existentes en el mercado cumplen con esta condición lo que dificulta la toma de datos en ambiente no controlados.

Según las necesidades del proyecto mencionadas anteriormente, se establecieron los siguientes criterios con base en los objetivos planteados y se asignó un valor porcentual para cada uno. Los más relevantes fueron facilidad de uso y precio/costo, debido a que en el proyecto se buscó facilitar el desarrollo investigativo de los encargados del proceso. Sí la herramienta seleccionada genera facilidad de uso al momento de evaluar la postura, será más llamativa para implementarla en cualquier procedimiento. Por otro lado, se buscó que el costo se adaptara al presupuesto de la investigación. Así mismo, se tuvieron en cuenta los criterios de cantidad de plataformas de uso el cual se busca saber el número de plataformas que pueden procesar los datos obtenidos. Otro criterio que se tuvo en cuenta, fue el *Background* de la herramienta, el cual hace referencia a la facilidad en el entendimiento del desarrollo interno de la herramienta, con el fin de que, si el usuario requiere adaptar, cambiar o incluir algún nuevo proceso, pueda implementarlo sin problema alguno. La reutilización de la herramienta se refiere al nivel de uso que se le puede dar a la herramienta una vez finalice el proyecto, bien sea en una nueva investigación o continuidad del proyecto previamente desarrollado. Finalmente, la accesibilidad hace referencia a la facilidad de disponer de la herramienta en la ciudad en la que se encuentra el desarrollo del proyecto. **Ver Anexo 1 Metodología Selección de la Herramienta.**

⁵ La metodología se diseñó con el fin de implementarse tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de ruta, sin embargo, por temas de la contingencia sanitaria (COVID-19), no se pudo realizar la validación de las pruebas de ruta establecidas en el trabajo.

Tabla 1. Matriz de ponderación de factores preliminar.

Criterios	Facilidad de uso (20%)	Accesibilidad (15%)	Precio/Costo (20%)	Cantidad de plataformas de uso (15%)	Background de la herramienta (15%)	Reutilización de la herramienta (15%)	Puntaje	Total (%)
Computer Vision (COCO base)	1.0	2.8	3.3	2.8	2.5	2.5	14.8	2.4
IMUS	4.5	3.3	3.3	4.0	4.0	4.5	23.5	3.9
Kinovea	4.5	4.8	5.0	2.5	2.8	4.0	23.5	4.0
Kinect/Brekel Kinect	2.8	3.3	2.5	3.3	3.0	2.0	16.8	2.8
Cheap Mocap	2.8	4.0	4.8	1.8	1.8	1.5	16.5	2.9
PoseNet	1.0	3.5	3.5	3.8	3.3	2.5	17.5	2.9
ViconNexus	2.8	3.0	1.5	4.0	4.5	5.0	20.8	3.3

Como se observa en la **Tabla 1**, IMU, Kinovea y Vicon Nexus fueron las herramientas con un mejor resultado, por lo cual se realizó una segunda matriz de ponderación con criterios diferentes, con el objetivo de calificar nuevamente las herramientas seleccionadas y obtener un resultado acorde con los objetivos del proyecto. A continuación, se describen los nuevos criterios:

- **Curva de aprendizaje:** hace referencia a que tan rápido aprenden las personas a utilizar el software/hardware de las herramientas con las que se va a evaluar la postura. Se debe tener en cuenta la complejidad de cada sistema y todos los aspectos que la componen (código fuente, opciones de medición, etc.), con el fin de aprender a utilizar la herramienta de forma correcta.
- **Facilidad de implementación:** hace referencia al traslado, instalación y uso del equipo.
- **Datos extra proporcionados por la herramienta:** Si la herramienta seleccionada genera información adicional a la que se necesita, se considera un valor agregado, ya que esta permitiría nuevos estudios o aplicaciones a diferentes campos en el futuro.
- **Obtención de datos (frecuencia de muestreo):** Se considera importante la frecuencia con la que la herramienta puede obtener los datos, ya que la cantidad de datos pueden ser concluyentes y determinantes para el análisis de la prueba, debido a los movimientos que realiza el ciclista.
- **Aplicabilidad en pruebas de ruta:** Una de las limitantes del proyecto es el uso de la herramienta en las pruebas de ruta, debido a que no es una prueba estática. El transporte de equipos e implementación de los protocolos puede verse afectado debido al lugar de realización y el movimiento del ciclista respectivamente.
- **Comprensión funcionamiento de la herramienta (software):** Se pretende seleccionar una herramienta que no necesite conceptos profesionales para la aplicación, si no que con base en un manual cualquier persona esté en la capacidad de hacer uso de la herramienta.
- **Procesamiento de datos:** En este criterio se evalúa la facilidad que tienen los datos para ser procesados. Esto se refiere a la capacidad de transformar los datos obtenidos de la herramienta de medición en los datos necesarios para estimar postura.

Tabla 2. Matriz de ponderación de factores final.

Criterios	Curva de aprendizaje (20%)	Facilidad de implementación (15%)	Datos extra (5%)	Obtención de datos (15%)	Aplicabilidad en pruebas de ruta (20%)	Comprensión de funcionamiento (10%)	Procesamiento de los datos (15%)	Puntaje	Total (%)
Kinovea	3.8	4.8	3.0	3.3	4.0	4.3	3.8	26.8	3.9
IMUS	3.8	3.5	4.0	3.8	3.8	3.8	3.8	26.3	3.7
ViconNexus	2.8	2.3	5.0	5.0	1.0	2.8	4.3	23.0	3.0

A partir de la tabla anterior, se puede observar que la herramienta que mejor se adapta a las necesidades de la investigación es la IMU, ya que su total porcentual fue el más alto. Sin embargo, al analizar las otras dos herramientas, se concluyó que Kinovea, por ser el segundo valor más alto, se puede implementar como apoyo para la toma de datos.

Por lo tanto, se decidió no descartar dicha herramienta para la continuación del estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, la base del estudio de la postura de los ciclistas se realizó con los sistemas IMU y Kinovea (apoyo visual), ya que con esta se obtuvo registro visual de los ciclistas durante la prueba de esfuerzo. **Ver Anexo 2 Matriz Ponderación de factores selección de herramienta.**

El proceso que se llevó a cabo para el diseño de la metodología empieza con la búsqueda en el mercado para encontrar las herramientas disponibles para su posible implementación. La búsqueda se segmentó a partir de las necesidades de encontrar una herramienta que tenga las características necesarias para la captura de movimiento de los ciclistas mientras realizan las pruebas de laboratorio y de ruta. Una vez realizada esta búsqueda, se realizó la evaluación de factores por medio de una matriz de ponderación preliminar con el fin de reducir las opciones y así realizar una investigación a profundidad. Finalmente, se realizó una segunda matriz de ponderación, estableciendo nuevos factores para su evaluación correspondiente y así poder encontrar las herramientas finales, las cuales contaban con las características que más se alinearan a los objetivos planteados. A continuación, se presenta un diagrama explicando los pasos aplicados previamente en la selección de la herramienta:

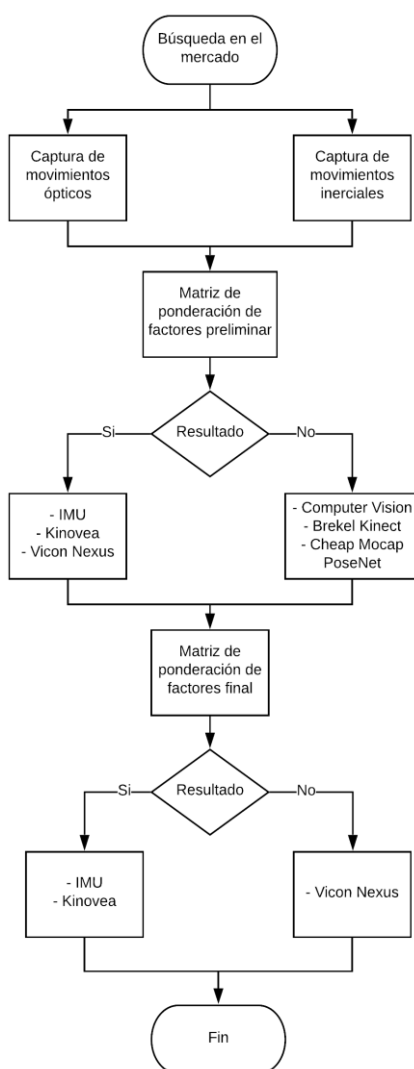


Figura 7. Diagrama selección de la herramienta

5.2.1. Ventajas y desventajas de las dos herramientas seleccionadas:

Tabla 3. Ventajas y desventajas herramientas seleccionadas.

	IMU	Kinovea
Ventajas	Permite realizar el análisis de rotación en tres dimensiones.	Proporciona información visual del sujeto de prueba
	Debido a su pequeño tamaño y su comunicación inalámbrica, permite su implementación de pruebas de laboratorio y de ruta.	Es una herramienta gratuita
	El procesamiento de datos puede automatizarse mediante un algoritmo.	Puede sensor hasta 29 cuadros por segundo.
	Puede sensor hasta 20 muestras por segundo.	Necesita de herramientas de video para proporcionar información de la postura del ciclista
Desventaja	Debido a que se encuentra ubicado en el cuerpo del participante, la IMU esta en capacidad de tomar información durante toda la prueba.	
	No proporciona información visual del sujeto de prueba	Permite realizar el análisis de postura en dos dimensiones.
	Es posible que la conexión de la IMU se pierda debido a la distancia con la estación base (Dispositivo celular).	Procesar la información requiere de un extenso tiempo de trabajo
	Los movimientos bruscos durante la prueba de esfuerzo pueden desacoplar la batería del dispositivo.	Debido a las herramientas de soporte, su implementación en pruebas de ruta es limitada
	Debe tener conocimiento sobre geometría del cuerpo para procesar los datos obtenidos.	
	Tiene un costo asociado	

5.2.2. Implementación herramientas seleccionadas en la metodología

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz de selección final, las ventajas y desventajas de las herramientas seleccionadas, el protocolo para la caracterización de postura se basa en la toma de datos conjunta durante las pruebas de esfuerzo, como se muestra a continuación:

5.2.2.1. Toma de Datos de con IMU PocketLab One

Para la toma de datos con IMU PocketLab One es necesario ubicar los dispositivos sobre los segmentos corporales a analizar. Las IMU proporcionan aceleración angular en sus tres ejes de rotación, por lo tanto, es importante realizar un proceso matemático para hallar la posición angular de cada uno de los segmentos del cuerpo.

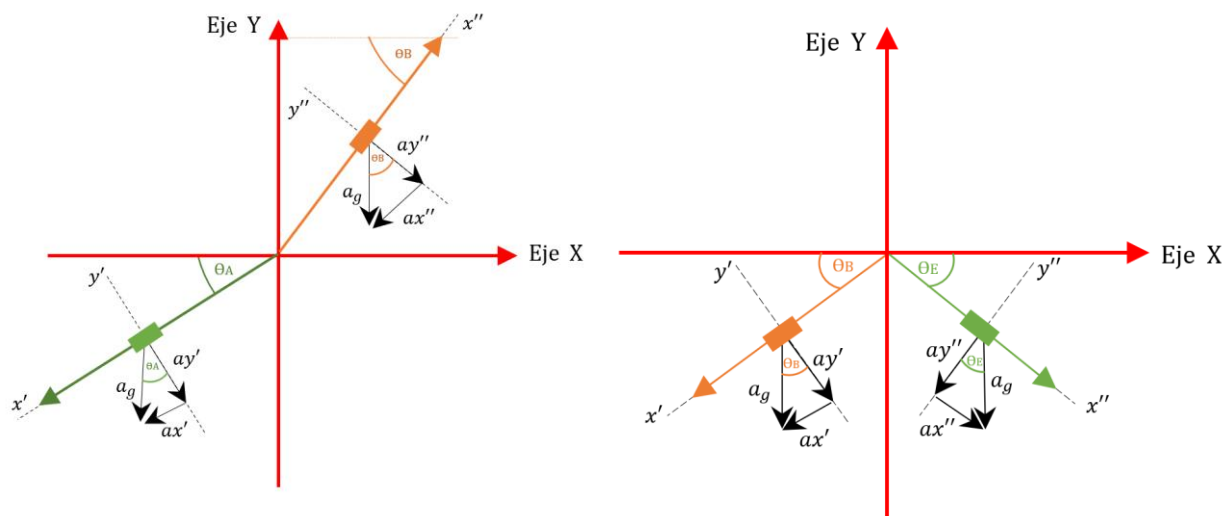


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre IMU PocketLab One

Las siguientes ecuaciones se plantearon según el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 8, donde se muestra como referencia el cuerpo del IMU ubicado sobre el ciclista, para el planteamiento de las ecuaciones se tuvo en cuenta los ejes involucrados del dispositivo para calcular la posición angular de las articulaciones.

	$\theta_{\text{antebrazo}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{\text{antebrazox}}}{a_{\text{antebrazoy}}} \right)$	
Codo	$\theta_{\text{Brazo}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{\text{brazox}}}{a_{\text{brazoy}}} \right)$	(1)
	$\theta_{\text{articulación codo}} = \theta_{\text{antebrazo}} + 90^\circ + (180^\circ - 90^\circ - \theta_{\text{Brazo}})$	
	$\theta_{\text{articulación codo}} = 180^\circ + \theta_{\text{antebrazo}} - \theta_{\text{Brazo}}$	
	$\theta_{\text{espalda}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{\text{espaldez}}}{a_{\text{espaldezax}}} \right)$	
Hombro	$\theta_{\text{Brazo}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{\text{brazox}}}{a_{\text{brazoy}}} \right)$	(2)
	$\theta_{\text{articulación hombro}} = 180^\circ - \theta_{\text{brazo}} - \theta_{\text{espalda}}$	
	$\theta_{\text{espalda}} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{\text{espaldez}}}{a_{\text{espaldezax}}} \right)$	
Espalda	$\theta_{\text{articulación espalda}} = 90^\circ - \theta_{\text{espalda}}$	(3)

Para el desarrollo de las pruebas en laboratorio es necesario contar con un ciclo entrenador, bicicleta y el número de dispositivos según sea requerido para las articulaciones a analizar. La ubicación de las IMU PocketLab One y el equipo necesario se muestra en la **Figura 9**.



Figura 9. Demostración de la implementación de las IMU PocketLab One

5.2.2.2. Toma de Datos de con Kinovea

Para la toma de datos con Kinovea es necesario ubicar marcadores ópticos, con el objetivo de facilitar el procesamiento de los datos a los investigadores. Adicionalmente se debe ubicar una cámara que capture el plano sagital del ciclista. Kinovea proporciona directamente la posición angular de las articulaciones.

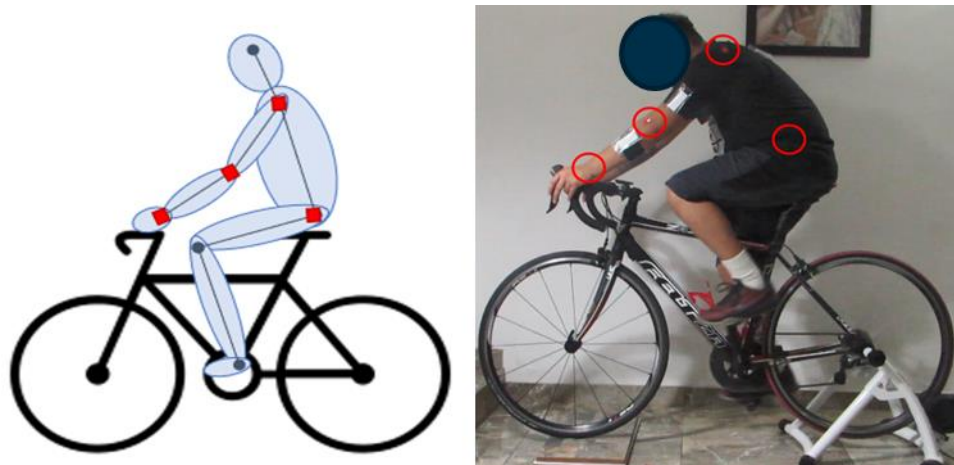


Figura 10. Demostración de la implementación de los marcadores para Kinovea

5.2.3. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos para el desarrollo del proyecto consiste en el tratamiento de la información obtenida por parte de las herramientas seleccionadas IMU y Kinovea. Cada herramienta proporciona información diferente con respecto a la postura del ciclista, por lo cual fueron procesadas de forma independiente. A continuación, se explicará el procesamiento de datos empleado para calcular los ángulos de las articulaciones en cada una de las herramientas.

5.2.3.1. Procesamiento de datos IMU

El procesamiento de los datos se desarrolló en cuatro etapas: (1) Generación de archivos .CSV, (2) Adaptación de las variables de entrada, (3) Filtro de media móvil (4) Generación del reporte de resultados. En la etapa (1), generación de archivos .CSV, se exportan los datos obtenidos de la IMU y se almacenan en la nube. En la segunda etapa, adaptación de las variables de entrada, se ajustaron los arreglos de datos de modo que correspondan al último minuto de la prueba. Después de esto, se realizaron los cambios de variables de aceleración angular a posición angular como se muestra en la **Figura 6** por medio de un algoritmo en el software de ingeniería Matlab®. En la etapa (3), filtro de media móvil⁶, se diseñó un filtro digital para los datos obtenidos y así visualizar la información de una manera más clara, eliminando el ruido de la gráfica. Finalmente, en la última etapa se generaron las gráficas según la necesidad de la investigación. **Ver Anexo 3 Manual Usuario PocketLab One y Anexos 11 al 14 (códigos Matlab).**

5.2.3.2. Procesamiento Kinovea

El procesamiento de los datos se desarrolló en tres etapas: (1) Procesamiento de video, (2) Generación de archivos .CSV y (3) Generación del reporte de resultados. En la etapa (1), procesamiento de video, se ajustó el intervalo de tiempo en el video que se utilizó y se ubicaron los segmentos del cuerpo en el ciclista como se muestra en la **Figura 11**. En la segunda etapa generación de archivo .CSV, se exportó la información obtenida anteriormente. Por último, en la etapa (3) se organizaron los datos y se generaron las gráficas según la necesidad de la investigación en el software de ingeniería Matlab®. **Ver Anexo 5 Manual Usuario Kinovea.**

⁶ **Filtro digital de media móvil:** es un filtro que opera sobre señales digitales. Es una operación matemática que toma una secuencia de números (la señal de entrada) y la modifica produciendo otra secuencia de números (la señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características, en especial la atenuación de componentes no deseados como el ruido. En un filtro de media móvil de largo M, la salida actual consiste en el promedio de las últimas M muestras de la entrada [Smith, 1997].

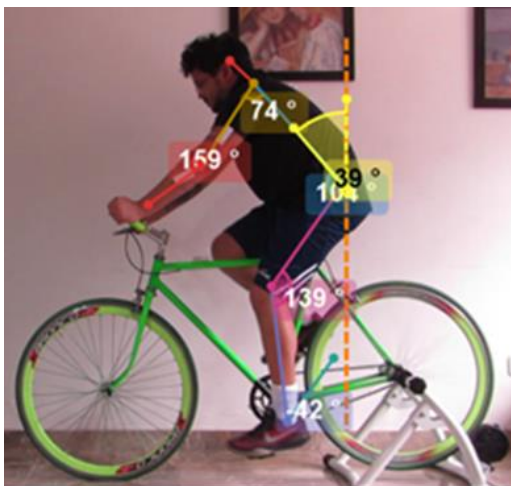


Figura 11. Diagrama posición ángulos Kinovea.

El gran reto que se tiene en el presente trabajo de investigación es la realización de las pruebas en ambientes no controlados, es decir, en pruebas de ruta. Por un lado, las IMU (como las de referencia *PocketLab One* con las que cuenta la Universidad Javeriana) necesitan estar conectadas vía *bluetooth* a dispositivos móviles para almacenar datos tales como la aceleración o velocidad angular. Las IMU *PocketLab One* debido a su comunicación inalámbrica permite su implementación en pruebas de ruta sin interrupción de la captura de datos. Esta conexión puede llegar a presentar problemas durante la prueba, lo cual puede ocasionar la pérdida de los datos y la repetición de esta.

Una de las deficiencias de IMU *PocketLab One* es que no proporcionan información visual sobre el ciclista. Esta deficiencia se fortalece al usar Kinovea como herramienta de apoyo, la cual brinda información visual. Por ejemplo, al momento de procesar los datos es posible observar la oscilación del usuario mientras pedalea, la desviación de la espalda y finalmente seguir el comportamiento de los segmentos del cuerpo que se desean medir. De esta forma, es posible detectar fácilmente datos atípicos en la prueba de esfuerzo.

Por otro lado, para la utilización de Kinovea, es necesario contar con equipos de apoyo como cámaras sobre trípodes en diferentes puntos de la pista, donde se llevan a cabo las pruebas. El problema de esto es que la obtención de datos es limitada, debido a que únicamente se pueden tomar datos sobre los segmentos de la pista que la cámara pueda capturar, lo que significa una pérdida significativa de datos. Otra de las desventajas que presenta Kinovea es con respecto al extenso tiempo y la intervención del investigador en el procesamiento de los datos, mientras que el procesamiento con las IMU puede ser automatizado mediante un algoritmo.

5.3. Implementación de la metodología en un caso de estudio: Efecto de la carga de pedaleo sobre la postura

Para verificar el uso del protocolo para la medición de postura de ciclistas, se implementaron los procedimientos durante la ejecución de pruebas para analizar el efecto que tiene el cambio de la intensidad de pedaleo sobre la postura de ciclistas. La metodología de pruebas de esfuerzo fue de tipo mixta (cualitativa y cuantitativa), en la cual se realizó una recolección de información para establecer el procedimiento de una prueba de esfuerzo y la recolección de datos de los participantes con el fin de caracterizar su postura respectivamente. La investigación con metodologías mixtas utiliza la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos (por ejemplo, una entrevista y un *test score*) o métodos mixtos de investigación (por ejemplo, una etnografía y un experimento) (Pole, 2009). El desarrollo de la metodología presente se realizó en tres actividades: (1) Descripción de escenarios, equipos y otros recursos, (2) Procedimiento de las pruebas de esfuerzo y (3) Inicio del caso de estudio. La actividad (1) consistió en detallar las consideraciones que se deben tener en cuenta para los dos escenarios (ruta y laboratorio). La actividad (2) se basó en establecer el procedimiento de una prueba de esfuerzo y el diseño del consentimiento informado. Finalmente, la actividad (3), inicio del caso de estudio consistió en evaluar la eficacia de las herramientas para caracterizar la postura de ciclistas e investigar si el cambio de la intensidad de potencia afecta en la misma.

5.3.1. Hipótesis

Se planteó como pregunta del caso de estudio: ¿La variación en la intensidad de potencia afecta la postura de los ciclistas en las pruebas de esfuerzo? Se formuló la hipótesis de que el cambio en la intensidad de potencia en pruebas de laboratorio y de ruta afecta de forma estadísticamente significativa la posición angular de las articulaciones estudiadas en los ciclistas.

5.3.2. Procedimiento de las pruebas de esfuerzo

La muestra seleccionada debe constituirse por hombres y mujeres en la misma proporción, que habiten en la ciudad de Bogotá mínimo desde hace 4 años, con respecto a su información antropométrica es necesario que tengan una altura entre 160 y 180 cms. Deben tener un rango de edad de los 18 a 26 años, Finalmente, se incluye como requerimiento que los participantes practiquen ciclismo frecuentemente (4 veces a la semana) bien sea como medio de transporte o como práctica deportiva. Es importante que el participante no cuente con lesiones previas. Debido a la contingencia sanitaria a nivel mundial durante el año 2020 que se presenta por el COVID-19 y las medidas de seguridad estipuladas por el Gobierno Nacional durante la cuarentena, no fue posible cumplir a cabalidad con las características estipuladas para la muestra seleccionada.

5.3.2.1. Descripción de la población seleccionada

Debido a lo anterior, la muestra se selecciono a conveniencia ya que, para conservar la seguridad de los investigadores y los ciclistas, se utilizó una técnica de muestreo no probabilístico y no aleatorio para seleccionar a los participantes de acuerdo con la facilidad de acceso y disponibilidad de las personas.

Los sujetos del estudio fueron cuatro personas pertenecientes al barrio Álamos norte que asistieron de manera voluntaria a las pruebas de esfuerzo. La muestra está compuesta en su totalidad por hombres, la parte más gruesa de la muestra se concentra en la franja comprendida entre los 17 y 25 años conformando un 75% y el participante restante tiene 45 años lo equivalente al 25 % de la muestra. Por otro lado, el rango de estatura es de 165 a 185 cms. Con respecto al peso, se tiene un 75% de la muestra en el rango de 60 a 80 kilogramos y un 25% restante con 92 kg. Esto se debe a que el ciclista numero 3 presenta gran cantidad de masa muscular debido a que realiza entrenamiento intenso con cargas.

Del grupo de participantes que se tiene que realizan ejercicio al menos cuatro veces por semana, en las cuales 2 de estas son practicando ciclismo en formato aficionado y practica no intensiva. Finalmente, ninguno de los participantes reportó lesiones previas. A continuación, se muestra la información de los participantes que realizaron las pruebas de esfuerzo y una imagen tomada durante las pruebas.

Tabla 4. Informaciones participantes de las pruebas de esfuerzo.

	Ciclista #1	Ciclista #2	Ciclista #3	Ciclista #4
Edad (años)	25	23	45	17
Altura (cm)	166	168	171	185
Peso (kg)	60	80	92	73

Teniendo en cuenta la comodidad y necesidad de los ciclistas, se solicitó asistir a las pruebas de esfuerzo con ropa cómoda (tenis, licra o pantaloneta y camiseta) para realizar la actividad física

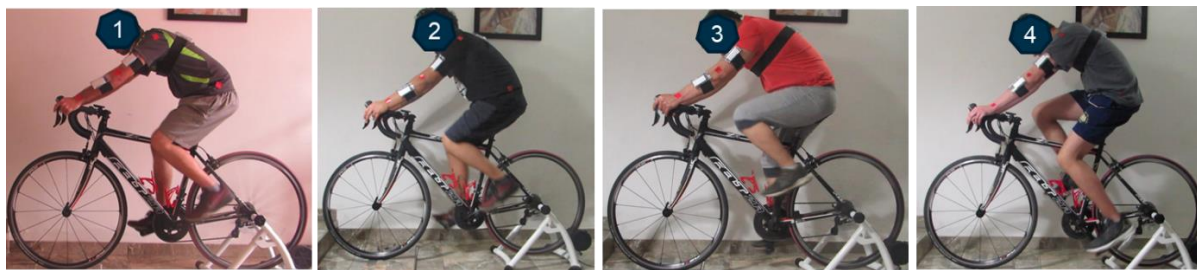


Figura 12. Registro fotográfico de los cuatro participantes durante las pruebas de esfuerzo

Para el desarrollo de las pruebas de esfuerzo, se diseñó un consentimiento informado para ser firmado por los participantes en donde se les informó a detalle las actividades que realizarían durante las pruebas y el objetivo de investigación. Así mismo, se les informó que cualquier información que compartieran con el grupo de investigación sería completamente confidencial. **Ver anexo 7 Consentimiento Informado y Anexo 8 Ficha Médica.**

A continuación, se presentan los equipos utilizados para realizar las pruebas en cada uno de los escenarios.

Tabla 5. Equipos para las pruebas de laboratorio y ruta.

Pruebas de laboratorio	Pruebas de ruta
➤ Cámara de video <i>Canon PowerShot SX50 HS</i>	➤ Cámara de video <i>Canon PowerShot SX50 HS</i>
➤ Marcadores ópticos sobre el sujeto de prueba	➤ Marcadores ópticos sobre el sujeto de prueba
➤ <i>Unidad de Medida Inercial PocketLab One</i> (por sus siglas en ingles IMU)	➤ <i>Unidad de Medida Inercial PocketLab One</i> (por sus siglas en ingles IMU)
➤ Ciclo entrenador <i>Ciclotrón Mac Turbo Trainer.</i>	➤ Bicicleta <i>Felt ZA</i>
➤ Bicicleta <i>Felt ZA</i>	

Debido a la contingencia sanitaria a nivel mundial que se presenta actualmente por el COVID-19 y las medidas de seguridad estipuladas por el Gobierno Nacional durante la cuarentena, todas las pruebas se realizaron en un espacio cerrado y no fue posible realizar la medición de postura en prueba de ruta.

5.3.2.2. Fases de las pruebas de esfuerzo

➤ Prueba preliminar

El desarrollo de las pruebas de esfuerzo inició con una fase preliminar en la cual se pretendía conocer el estado físico de cada uno de los participantes. El objetivo de la prueba fue evaluar tres (3) potencias de entrega diferentes en cada uno de los ciclistas. Para lo anterior, fue necesario encontrar cual es la potencia media según sus capacidades físicas. Para establecer el parámetro de potencia media se mantuvo una cadencia promedio estipulada por el ciclista y se varió la resistencia de la bicicleta hasta lograr una percepción del esfuerzo (valor de 5) según la escala de Borg. Una vez se obtuvo la potencia media del ciclista, se le explica al participante que durante la prueba debe manejar tres (3) tipos de potencia, alta, media y baja.

La potencia se define como el producto de la resistencia de la bicicleta y la velocidad promedio. Las potencias alta, media y baja se consiguen manteniendo constante la resistencia media hallada anteriormente y variando la cadencia de pedaleo de cada uno de los participantes para obtener el 80%, 60% y 40% de su percepción del esfuerzo según la escala de Borg.

➤ Prueba final

Una vez calculadas las tres potencias para cada participante, se procede a realizar seis pruebas con cada uno. En cada prueba el orden de las intensidades de pedaleo se organiza de manera aleatoria. Una vez se define este orden el sujeto de prueba inicia las etapas a continuación: Etapa de calentamiento, etapa de esfuerzo y post-esfuerzo. Cada ciclista inicia en una fase de calentamiento durante tres minutos, posteriormente se le asigna una potencia a entregar (alta, media o baja), la cual debe mantenerse durante cinco minutos y finalizará con un minuto de reposo. Este proceso se repite dos veces más (con las potencias restantes) para terminar el ciclo. Las pruebas se realizaron con un periodo de descanso entre pruebas mínimo de veinticuatro (24) horas, estableciendo un cronograma específico para cada participante, con el fin de garantizar que la prueba se desarrolle a la misma hora cada día.

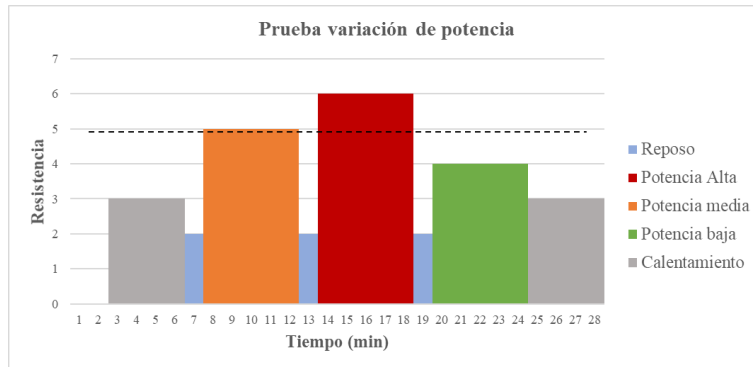


Figura 13. Modelo de prueba.

6. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados de implementar el diseño de una metodología para medir la postura de ciclistas en pruebas de ruta y laboratorio. Al analizar la búsqueda en el mercado de las posibles opciones se obtuvieron dos herramientas que presentaron el mejor resultado en los criterios seleccionados por los investigadores. La selección se realizó evaluando aspectos funcionales y técnicos. Se documentaron los aspectos fundamentales para soportar la solución, creando una base de datos de soluciones disponibles y realizando diferentes procesos de selección, llegando al resultado obtenido, cumpliendo con los objetivos.

Según la búsqueda en el mercado de las herramientas encontradas que pueden servir para la estimación de postura en ciclistas, se obtuvieron dos diferentes grupos de soluciones: captura de movimiento óptico y captura de movimiento inercial. Con la búsqueda realizada fue evidente que la mayoría de las herramientas estudiadas corresponden a sistemas ópticos de captura de movimiento. La única herramienta encontrada dentro de la categoría de captura de movimiento inercial fue la IMU PocketLab One.

Los resultados del diseño y la implementación de la metodología para la selección de la herramienta evidenciaron la necesidad de una herramienta conjunta para satisfacer los objetivos de la investigación. Estas herramientas unidas se complementan fortaleciendo las desventajas de la otra obteniendo así, mejores resultados.

6.1. Resultados de la implementación de la metodología en un caso de estudio

Una vez desarrolladas todas las pruebas de esfuerzo se estudió la posición angular promedio (\bar{X}) y la desviación estándar (s) de cada ángulo medido, para ver el comportamiento de la postura con respecto a la potencia de cada uno de los ciclistas según la herramienta. A continuación, se muestran a manera de ejemplo los datos registrados durante una de las pruebas, en una de las intensidades de pedaleo (potencia baja) del ciclista #2. Se presenta la posición angular de la articulación de la espalda a través del tiempo registrada con Kinovea (**Figura 14**) y con las IMU (**Figura 15**).

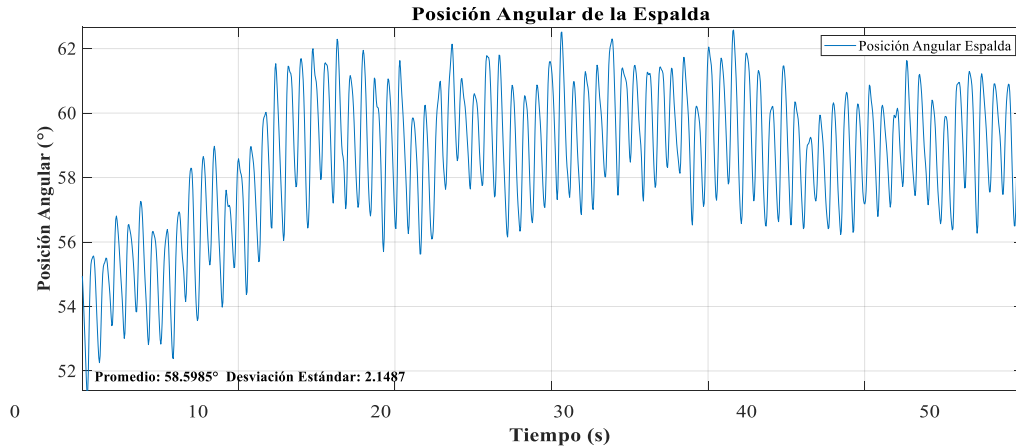


Figura 14. Ejemplo posición angular de la articulación de la espalda Kinovea.

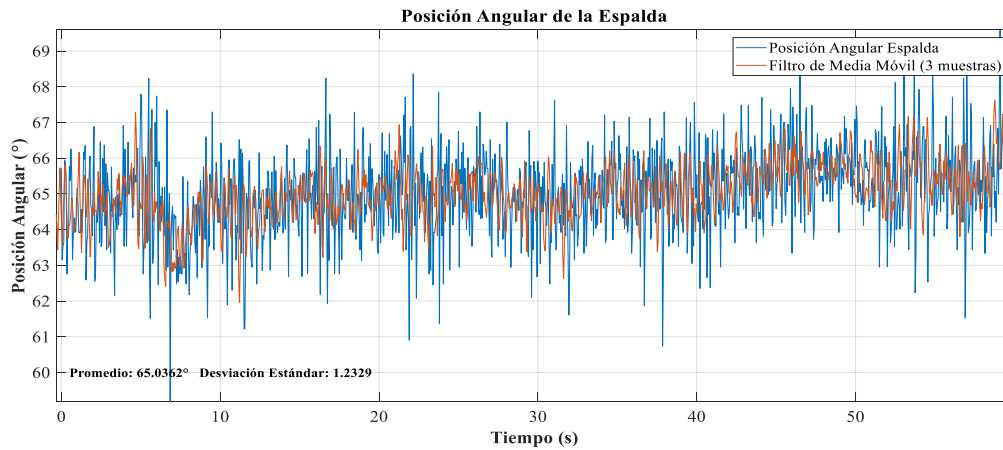


Figura 15. Ejemplo posición angular de la articulación de la espalda IMU.

En las gráficas anteriores, se muestra la variación de la posición angular a través del tiempo para la espalda del ciclista #2. Se esperaría que la variación de los datos a lo largo del tiempo sea lo más cercano a cero, es decir, una línea recta paralela al eje x en la gráfica. Sin embargo, en la práctica esto no sucede debido a diversos factores como la dificultad de mantener la postura constante, el cansancio que hace que el ciclista realice movimientos innecesarios y principalmente a la oscilación natural del cuerpo debido al movimiento oscilatorio del pedaleo. Por lo anterior, se realiza un promedio de los datos, con el fin de asignarle un valor característico en el intervalo de tiempo a la posición angular. El filtro de media móvil se aplica únicamente en la gráfica de los datos de la IMU, debido a que se presentan picos generados por el ruido asociado a la herramienta. En este se puede decidir el número de la muestra (número de datos a promediar) con el fin de suavizar los datos atípicos presentados en la gráfica.

Análisis estadístico

Con la información anterior se realizó un diseño de experimentos el cual consiste en un análisis de varianza (ANOVA). En este experimento se desea caracterizar la posición angular de las articulaciones de los ciclistas (medidas en grados), con una significancia del 5%. Los factores que se tuvieron en cuenta durante el estudio fueron: Intensidad de potencia con tres niveles (Baja, Media y Alta) y herramienta de estudio con dos niveles (Kinovea e IMU PocketLab One). Para el Anova también se consideró un bloque llamado “ciclistas” constituido por los cuatro participantes.

Se definieron seis (6) replicas para el diseño de experimentos. Adicionalmente para evitar un efecto de cansancio en las pruebas de esfuerzo, el orden de las intensidades de potencia que deben suministrar los ciclistas se realizó de forma aleatoria.

Hipótesis del experimento

Hipótesis nula = H_0 : la media (μ_i) de la posición angular de cada articulación en la herramienta 1 es igual a la media de la posición angular de cada articulación en la herramienta 2.

Hipótesis alterna = H_1 : se niega que la media (μ_i) de la posición angular de cada articulación en la herramienta 1 es igual a la media de la posición angular de cada articulación en la herramienta 2.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (3)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_k \quad (4)$$

Tabla 6. Análisis de varianza para la articulación del Codo.

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Codo					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1766,232 ^a	8	220.779	13.429	0.000
Interceptación	3944150.250	1	3944150.250	239897.649	0.000
Herramienta	992.664	1	992.664	60.377	0.000
Potencia	6.209	2	3.104	0.189	0.828
Herramienta * Potencia	9.411	2	4.705	0.286	0.752
Ciclista#	757.949	3	252.650	15.367	0.000
Error	2219.531	135	16.441		
Total	3948136.013	144			
Total corregido	3985.763	143			

a. R al cuadrado = ,443 (R al cuadrado ajustada = ,410)

En la **Tabla 6** es posible observar los resultados del análisis estadístico, en dónde la última columna llamada “Sig”, muestra el *P-Value* para aceptar o rechazar la hipótesis nula para cada uno de los factores estudiados (ciclista, potencia y herramientas).

Al realizar el análisis de varianza resultante en la **Tabla 6**, se pudo determinar que con un nivel de significancia del 5% se rechaza la hipótesis nula para el bloque “ciclistas” y el factor herramienta. Es decir, tanto la herramienta con la que se evalúa la posición angular del codo como el ciclista que presenta la prueba, presentan un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Se puede evidenciar que para las articulaciones del hombro y de la espalda solo el bloque “ciclistas” tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta. En conclusión, la postura del ciclista depende en mayor medida de las características antropométricas del ciclista. En la **Figura 15**, se puede comprobar que la posición angular del codo es la que presenta mayor variación según la herramienta.

Debido a que el R al cuadrado (R^2) es de 0,44 se puede concluir que es un modelo en el cual no se ajusta bastante bien a la variable real (articulación del codo), ya que solo explica un 44% de esta variable, lo anterior se puede presentar por la falta de participantes durante la prueba de esfuerzo, ya que una muestra de 4 ciclistas no es representativa a la hora de efectuar un análisis estadístico.

Comparación de los Resultados Obtenidos para Ambas Herramientas

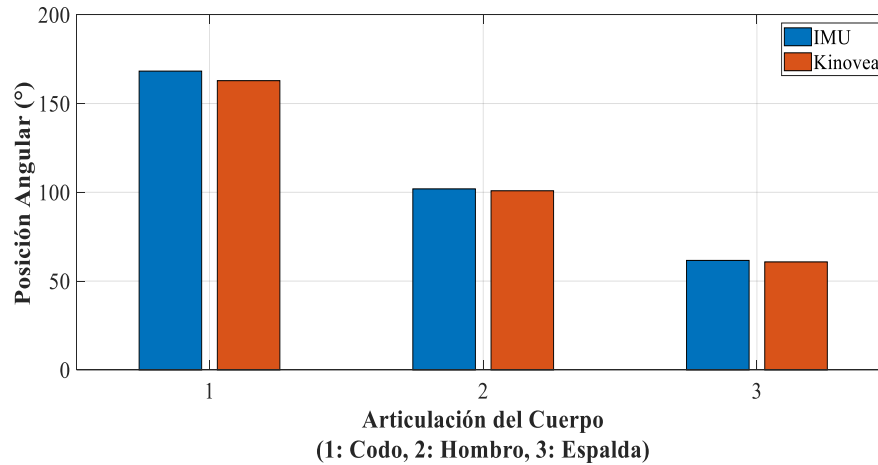


Figura 16. Comparación de la posición angular de las articulaciones del cuerpo en IMU y Kinovea

Tabla 7. Comparaciones múltiples de las medias.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Ciclista #		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1,0	2,0	0.212	0.791	0.993	-1.845	2.269
	3,0	1.101	0.791	0.506	-0.956	3.158
	4,0	4,672602*	0.791	0.000	2.615	6.730
2,0	1,0	-0.212	0.791	0.993	-2.269	1.845
	3,0	0.889	0.791	0.675	-1.168	2.947
	4,0	4,460735*	0.791	0.000	2.403	6.518
3,0	1,0	-1.101	0.791	0.506	-3.158	0.956
	2,0	-0.889	0.791	0.675	-2.947	1.168
	4,0	3,571485*	0.791	0.000	1.514	5.629
4,0	1,0	-4,672602*	0.791	0.000	-6.730	-2.615
	2,0	-4,460735*	0.791	0.000	-6.518	-2.403
	3,0	-3,571485*	0.791	0.000	-5.629	-1.514

Se basa en las medias observadas.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

Según el enunciado anterior, al rechazar la hipótesis nula, se afirma que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las posiciones angulares de los ciclistas. Por lo anterior, se realizó una comparación múltiple en la posición angular del codo con el fin de identificar que par de medias difieren entre sí. En la **Tabla 7**, se puede observar que existe diferencia entre el ciclista #4 con respecto a los demás participantes, debido a que su significancia es menor a 0,05. Esto puede ocasionarse, debido a que el ciclista #4 tiene características antropométricas diferentes a los demás participantes. Observando la tabla 4 se puede inferir que la única diferencia entre los demás ciclistas y el ciclista #4 es la altura considerándose un dato atípico, debido al que el peso y la edad se encuentran entre el 75% de la distribución de la muestra. Por otro lado, en el **Anexo 22 Resultado pruebas finales**, se encuentran las tablas de comparación de la posición angular de las otras articulaciones (espalda y hombro), donde se muestra la diferencia entre cada uno de los ciclistas.

Tabla 8. Prueba de inter-sujetos para el Hombro

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Hombro					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1271,428 ^a	4	317.857	17.461	0.000
Intersección	6876.861	1	6876.861	377.766	0.000
Peso	452.996	1	452.996	24.884	0.000
Estatura	693.269	1	693.269	38.083	0.000
Potencia	39.199	2	19.600	1.077	0.344
Error	2530.358	139	18.204		
Total	1483392.227	144			
Total corregido	3801.786	143			

a. R al cuadrado = ,334 (R al cuadrado ajustada = ,315)

Se realizó una prueba de efecto inter-sujeto, con el fin de ver el comportamiento de las covariables (variables antropométricas) de los ciclistas, como se muestra en la **Tabla 8** se puede ver que hay un efecto significativo en la variable de la estatura y el peso al momento de tomar la posición angular de hombro, lo anterior confirma que es relevante realizar el estudio con un grupo de personas que presenten características antropométricas homogéneas, evitando así, alteraciones en los resultados de la postura en los ciclistas. Al momento de evaluar las tres articulaciones se encontró que la estatura es una variable que influye en el comportamiento de los datos obtenidos, mientras que el peso solo es significativo en la articulación del hombro.

A partir de los valores obtenidos para todos los ciclistas, pedaleando con diferentes potencias, y utilizando las dos herramientas seleccionadas, se procedió a analizar los resultados. En primer lugar, se buscó observar si los valores de postura varían según la persona que desarrolle la prueba de esfuerzo. Es decir, observar si el bloque en el análisis de varianza tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Según el *P-Value* del bloque “ciclista” con un resultado de 0.00 se rechaza H₀ (debido a que es menor al nivel de significancia usado de 0.05). Esto quiere decir que, las medias de los tratamientos no son iguales y por lo tanto hay un efecto del bloque sobre la variable de respuesta. Esto se puede comprobar gráficamente en las **Figuras 17 y 18**. Esto demuestra que los ciclistas que participaron en las pruebas se posicionan de forma diferente en la bicicleta y que sus medidas antropométricas, como altura y peso, pueden afectar la variable de respuesta.

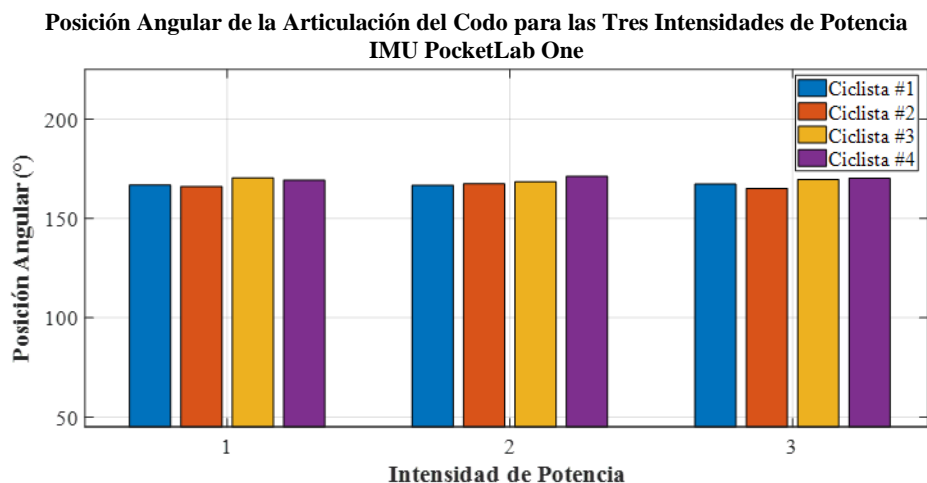


Figura 17. Comparación de la posición angular de la articulación del codo para todos los ciclistas IMU PocketLab One

Posición Angular de la Articulación del Codo para las Tres Intensidades de Potencia Kinovea

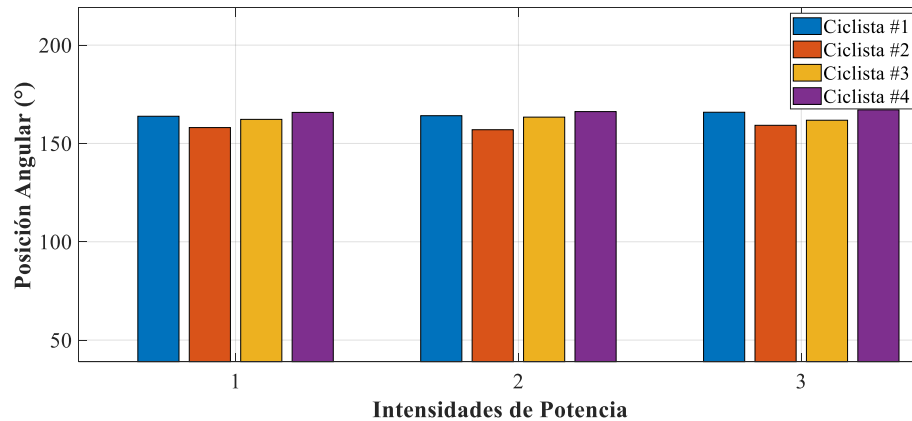


Figura 178. Comparación de la posición angular de la articulación del codo para todos los ciclistas Kinovea

Según el análisis se puede evidenciar que las variables de respuesta no tienen ninguna variación significativa, según la intensidad de potencia que ejecute el ciclista durante la prueba de esfuerzo. Considerando el resultado de la Anova y con un nivel de confianza del 95%, no se rechaza la hipótesis nula para el *P-Value* correspondiente a la potencia (0,83). Por lo tanto, las medias entre los tratamientos son iguales, es decir, la intensidad de potencia no tiene un efecto significativo sobre la postura del ciclista. De lo anterior, se puede inferir que el mayor cambio de postura se presenta en el primer minuto, en el que se realiza el cambio de potencia. Es decir, el ciclista aprovecha este intervalo de tiempo para adaptarse a la potencia que debe generar y después de un tiempo considerable esta variación disminuye. Esto se puede validar en las Figuras 14 y 15, en donde se muestran que no existen cambios significativos de la posición angular, ya que en el procesamiento de datos se analizó el último minuto de cada etapa de esfuerzo. Adicionalmente, si se prolongan los tiempos de prueba de cada potencia, se puede llegar al punto de fatiga del ciclista, en el cual se observa si se presentan cambios en la postura que sean representativos.

Medición del impacto

Con el proyecto se pretende tener un efecto investigativo y sociocultural, debido a que se quiere implementar esta metodología con el fin de beneficiar a investigadores que no cuentan con la tecnología necesaria para la verificación de postura y a los ciclistas, los cuales desean practicar este deporte.

Conclusiones y recomendaciones

Este estudio se enfoca en analizar los ángulos de las articulaciones del ciclista en el tren superior, debido a que en esta zona se presenta mayor dificultad al momento de mantener una postura constante. De todos los ángulos que se podían tomar en esta zona del cuerpo, se localizó la importancia de la selección en codo, hombro y el ángulo de inclinación de la espalda con respecto al eje vertical del ciclista, donde se consideró que son las articulaciones del cuerpo que menos incomodidad presentan al momento de ubicar las IMU PocketLab One.

Durante el desarrollo de la selección y validación de las herramientas se logró establecer que las IMU PocketLab One y Kinovea permitieron cumplir los objetivos planteados en el proyecto porque ambas herramientas fueron capaces de caracterizar la postura de ciclistas en pruebas de esfuerzo. Así mismo, los resultados de ambas herramientas fueron estudiados estadísticamente y sus resultados fueron similares según el *P-Value* del análisis de varianza, mostrado en la Tabla 8. Adicionalmente, permitió que el grupo de investigación tuviera en cuenta algunas recomendaciones del protocolo al momento de realizar las pruebas finales con los ciclistas. Por último, se determinaron los beneficios y las desventajas de las herramientas para trabajar conjuntamente con el fin de que se complementen, fortaleciendo sus desventajas, y de esta forma obtener mejores resultados.

El objetivo de realizar la comparación de los resultados de las herramientas seleccionadas con el sistema de referencia es verificar la similitud o diferencia de los datos obtenidos. El resultado de este estudio concluye que, al implementar el protocolo por medio de la realización de pruebas de laboratorio, se demostró que las herramientas utilizadas tienen

un efecto significativo sobre la posición angular, únicamente en la articulación del codo. Esto significa que, las herramientas funcionan mejor conjuntamente usando los valores de posición angular de las articulaciones provenientes de las IMU con el apoyo visual de Kinovea durante las pruebas de esfuerzo. Lo anterior es debido a que el procesamiento de los datos de IMU PocketLab One es automático mediante un algoritmo desarrollado en Matlab, mientras que los datos de Kinovea se procesan de forma manual (ubicación de los segmentos del cuerpo sobre la imagen), lo que da espacio a que se generen errores por parte de los investigadores.

Así mismo, durante las pruebas de esfuerzo, el bloque “ciclista” tuvo un efecto significativo sobre las variables de respuesta debido a que presentaban diferencias entre las medias comparadas, mientras que la variación de las potencias demostró que no afecta directamente la postura del ciclista.

Para mejorar el experimento y verificar que se obtiene mayor similitud entre los resultados de las IMU y Kinovea, se recomienda contar con un mayor número de sujetos de prueba con características antropométricas similares (altura y peso), debido a que, por factores estadísticos al tener el tamaño adecuado de participantes, se puede garantizar precisión a la hora de determinar si existe diferencia significativa entre los grupos evaluados, lo que lleva a tener una conclusión más acertada. Otro factor para considerar es la estatura de los participantes, se debe plantear un rango homogéneo con el fin de evitar datos atípicos y que los resultados presentados no difieran con respecto a los ciclistas si no a la herramienta o la variación de la potencia que son los factores estudiados.

Validar las herramientas seleccionadas con un sistema de referencia es de suma importancia para garantizar la precisión y el correcto manejo de estas por parte de los evaluadores durante las pruebas de esfuerzo. Estas se pueden validar con cualquier sistema comercial de captura de movimiento de alta precisión que haya sido probado previamente y garanticen un correcto funcionamiento. Para este trabajo se planteó el uso de Vicon Nexus, el cual está disponible en la Pontificia Universidad Javeriana. Este sistema consiste en una plataforma en donde se ubica el sujeto de prueba y un grupo de cámaras alrededor, permitiendo una vista en tres dimensiones durante la prueba. Esta herramienta fue seleccionada como sistema de referencia debido a su amplio uso en aplicaciones e investigaciones de captura de movimiento.

Glosario

- **Alforjas:** bolsas o costales que se utilizan de a dos y que, por su disposición, permiten repartir el peso. Lo habitual es que se amarren a una bicicleta, una motocicleta o un caballo para trasladar equipaje.
- **Raquis cervical:** El raquis, en este sentido, es la estructura formada por huesos, cartílagos y fibras que se encuentra en la línea media de los seres vertebrados, (Columna vertebral).

Tabla de anexos o apéndice

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de archivo	Relevancia
1	Metodología selección de la herramienta	Propio	PDF	5
2	Matriz ponderación de factores selección herramienta	Propio	Excel	3
3	Manual de usuario PocketLab One	Propio	PDF	3
4	Videos tutoriales IMU y Kinovea (https://drive.google.com/drive/folders/14AXBIEPtpw1BEUJtnAJy5hOJiaei_vM?usp=sharing)	Propio	Enlace	3
5	Manual de usuario Kinovea	Propio	PDF	3
6	Metodología pruebas de esfuerzo	Propio	PDF	5
7	Consentimiento informado	Propio	PDF	2
8	Ficha Medica	Propio	PDF	1
9	Resultados Kinovea	Propio	CSV	1

10	Resultados IMU (https://drive.google.com/drive/folders/102iKtl_hh6E4rTYnvMjxOEXSZBeD-mgt?usp=sharing)	Propio	Enlace	1
11	AngulosArticulacion	Propio	MATLAB	2
12	Graficas	Propio	MATLAB	1
13	FiltroMovil	Propio	MATLAB	1
14	Dbarras	Propio	MATLAB	1
15	Indicadores Kinovea	Propio	Excel	2
16	Indicadores IMU	Propio	Excel	2
17	Datos pruebas finales	Propio	SPSS	3
18	Resultados pruebas finales	Propio	SPSS	3

Referencias

- Antón, M. M., Izquierdo, M., Ibáñez, J., Asiain, X., Mendiguchia, J., & Gorostiaga, E. M. (2015). Predicción del Rendimiento en Pruebas Contrarreloj en el Llano y en Ascenso en Ciclistas Aficionados de Elite-International Endurance Work Group. *PubliCE*.
- Bini, R.R. & Carpes, F.P. (Eds.) (2014). *Biomechanics of Cycling*. doi: 10.1007/978-3-319-05539-8.
- Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmeliet, J., & Hespel, P. (2013). CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, 71, 435-445.
- Carrasco Zumba, J. S., Salgado Castillo, F. D., Zeas Carrillo, C. S., & Alvarado Cando, O. S. (2016). Sistema de detección y clasificación de postura de ciclistas, Bikefit, mediante Kinect V. 2.
- Coronado, R. G., Borda, J. A. P., & Pérez, Y. T. (2018). Análisis biomecánico de la técnica de ejecución en el arranque de ciclismo de pista entre deportista semi profesional y amateur. *Ingenio Magno*, 9(2), 94-104.
- Echeverry, L. L. G., Henao, A. M. J., Molina, M. A. R., Restrepo, S. M. V., Velásquez, C. A. P., & Bolívar, G. J. S. (2018). Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: una revisión sistemática. *Prospectiva*, 16(2), 24-34.
- Global Cycling Network. (2018). What is the Best Bag for Commuting by Bike? Saddle Bag Vs. Panniers Vs. Backpack [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=wdfB5fbVHck>
- Gorman, S. L., Rivera, M., & McCarthy, L. (2014). Reliability of the function in sitting test (FIST). *Rehabilitation research and practice*, 2014.
- Iván S, (2019). Mundo entrenamiento: El deporte bajo evidencia científica. Recuperado de <https://mundoentrenamiento.com/kinovea-analiza-tus-movimientos/>
- Mangia, A. L., Cortesi, M., Fantozzi, S., Giovanardi, A., Borra, D., & Gatta, G. (2017). The use of IMMUs in a water environment: instrument validation and application of 3D multi-body kinematic analysis in medicine and sport. *Sensors*, 17(4), 927.
- Matthew, R. P., Seko, S., & Bajcsy, R. (2017). Fusing motion-capture and inertial measurements for improved joint state recovery: An application for sit-to-stand actions. 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1893-1896.

Navarrete Martínez, I. (2017). Efectividad de la terapia manual miofascial en el suelo pélvico combinada con un bike fit y reeducación ergonómica de la postura para el tratamiento de los trastornos urogenitales por la compresión perineal del ciclista-Estudio piloto (Bachelor's thesis).

Nexus | Software For Motion Capture In Life Sciences. (2020). Recuperado de <https://www.vicon.com/software/nexus/>

PocketLab One | PocketLab. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2020, de <https://www.thepocketlab.com/store/pocketlab-one>

Polanco, A. P., Suárez, D. R., & Muñoz, L. E. (2017). Effect of Body Posture on Comfort During Cycling. In ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

Polanco, A., Marconi, E., Muñoz, L., Suárez, D., & Doria, A. (2019). Effect of Rider Posture on Bicycle Comfort. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE2019. Proceedings of the ASME 2019.

Polanco, A., Muñoz, L., Doria, A., & Suárez, D. (2020). Selection of Cyclists' Posture for Time-Trial Events Considering Performance and Comfort. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE2020. Proceedings of the ASME 2020.

Pole, K. (2009). Diseño de metodologías mixtas. Una revisión de las estrategias para combinar metodologías cuantitativas y cualitativas.

Quecedo Lecanda, R., & Castaño Garrido, C. M. (2002). Introducción a la metodología de investigación cualitativa. *Revista de psicodidáctica*.

Roberts, M., Mongeon, D., & Prince, F. (2017). Biomechanical parameters for gait analysis: a systematic review of healthy human gait. *Physical Therapy and Rehabilitation*, 4(1), 6.

Rohrer, C. (2017) Quantifying and Comparing Ease of Use Without Breaking the Bank. Nielsen Norman group.

Rylands, L. P., Roberts, S. J., & Hurst, H. T. (2015). Variability in laboratory vs. field testing of peak power, torque, and time of peak power production among elite bicycle motocross cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(9), 2635-2640.

Sigcho Cueva, J. C. (2015). Evaluación antropométrica de los colectivos ciclistas de la ciudad de Loja (Bachelor's thesis).

Singaña, B., & Estefanía, P. (2018). Aplicación de la técnica punción seca en los puntos gatillo del síndrome miofascial del músculo trapecio superior en los ciclistas profesionales atendidos en Fisiomed entre los meses agosto–septiembre de 2017 (Bachelor's thesis, PUCE).

Smith, S.W., “The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing”, 1997, California Technical Pub.

V. a. correr, La escala de Borg, descubre tu índice de fatiga, Vamos a correr, 03 10 2012. Disponible en: <https://www.vamosacorrer.com/noticias/la-escala-de-borg-descubre-tu-indice-de-fatiga-3183.html>