



## Efectos causales de variables biomecánicas sobre la velocidad inicial en patinadores de velocidad: un enfoque bayesiano guiado por diagramas acíclicos dirigidos (DAGs)

*Causal effects of biomechanical variables on initial speed in speed skaters: a Bayesian approach guided by directed acyclic graphs (DAGs)*

### Autores

Javier Gaviria Chavarro <sup>1</sup>  
Yulimar Florez Peña <sup>2</sup>  
Miguel Ángel Gómez García <sup>3</sup>  
Diego Fernando Orejuela Aristizabal <sup>4</sup>  
Alfonsina del Cristo Martínez Gutiérrez <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad Santiago de Cali  
<sup>2,3,4</sup> Institución Universitaria Escuela Nacional del Deporte

Autor de correspondencia:  
Javier Gaviria Chavarro  
javier.gaviria@gmail.com

Recibido: 07-10-25  
Aceptado: 10-02-26

### Cómo citar en APA

Gaviria Chavarro, J., Florez Peña, Y., Gómez García, M. Ángel, Orejuela Aristizabal, D. F., & Martínez Gutiérrez, A. del C. (2026). Efectos causales de variables biomecánicas sobre la velocidad inicial en patinadores de velocidad: un enfoque bayesiano guiado por diagramas acíclicos dirigidos (DAGs). *Retos*, 78, 209-219. <https://doi.org/10.47197/retos.v78.117807>

### Resumen

**Introducción:** La complejidad del patinaje de velocidad exige dominio técnico y el desarrollo de variables biomecánicas ligadas a la aceleración inicial, en especial la estabilidad, el tiempo de vuelo y el tiempo de contacto.

**Objetivo:** Estimar el efecto conjunto de TC\_CMJ, TV\_SJ y APY\_D\_FRONTAL sobre VELOCIDAD\_20\_M, ajustando por Edad, Sexo e ÍndiceGrasaCorporal.

**Metodología:** Estudio observacional, analítico y transversal para identificar los efectos de variables biomecánicas en la fase de salida. La muestra se definió por disponibilidad de deportistas del grupo competitivo, con 25 participantes.

**Resultados y discusión:** En el SJ se observó que un mayor tiempo de vuelo se asocia con menor velocidad inicial, lo que sugiere menor eficiencia del impulso orientado horizontalmente. El Y-balance (alcance frontal derecho) indicó que mayores alcances se relacionan con mayor velocidad en los primeros 20 metros, reforzando el papel del equilibrio dinámico y del control postural en la aceleración inicial. En el CMJ, un menor tiempo de contacto se asoció con mayor velocidad; sin embargo, el modelo no aportó evidencia suficiente para afirmar un efecto creíble al 95%. Las variables de ajuste (Edad, Sexo e ÍndiceGrasaCorporal) no mostraron efectos creíbles sobre el resultado principal, apoyando su función como controladores de confusión.

**Conclusiones:** Se recomienda programar entrenamientos de fuerza con énfasis en el vector horizontal, priorizar el trabajo reactivo y el desarrollo postural en dirección anterior. Para el seguimiento, el SJ y el Y-balance se proponen como herramientas clave, ya que permiten monitorear el estado del deportista en relación con la velocidad de salida en 20 metros.

### Palabras clave

Biomecánica; patinaje; causalidad; saltabilidad, aptitud física.

### Abstract

**Introduction:** The technical complexity of speed skating requires solid technical mastery and the development of biomechanical variables linked to initial acceleration, particularly stability, flight time, and contact time.

**Objective:** To estimate the combined effect of TC\_CMJ, TV\_SJ, and APY\_D\_FRONTAL on VELOCIDAD\_20\_M, adjusting for Age, Sex, and Body Fat Index.

**Methodology:** An observational, analytical, cross-sectional study designed to identify the effects of biomechanical variables on the start phase. The sample size was determined by the availability of athletes in the evaluated competitive group, with 25 participants.

**Results and discussion:** In the SJ, longer flight time was associated with lower initial speed, suggesting reduced efficiency of the horizontally oriented impulse. The Y-balance test (right anterior reach) showed that greater reach distances were related to higher speed over the first 20 meters, reinforcing the importance of dynamic balance and postural control during initial acceleration. In the CMJ, shorter contact time was associated with higher speed; however, the model did not provide sufficient evidence to confirm a credible effect at the 95% level. The adjustment variables (Age, Sex, and Body Fat Index) showed no credible effects on the main outcome, supporting their role as confounder controls rather than primary predictors.

**Conclusions:** Training programs should emphasize strength development along a horizontal vector, prioritize reactive training, and enhance anterior-direction postural development. For monitoring purposes, the SJ and Y-balance test are proposed as key tools, as they help track each athlete's status in relation to 20-meter start speed.

### Keywords

Biomechanics; inline skating; causality; jumping; fitness.

## Introducción

El patinaje es un deporte que se divide en modalidades de resistencia (>1500m) o velocidad (100-500m), que se diferencian en la fuerza, y potencia aplicada (Stuart & Cochrane-Snyman, 2021), por ello, se implementa evaluaciones de saltabilidad y longitud de desplazamiento del miembro inferior para determinar en qué estado se encuentra el deportista y encontrar cuáles variables se asocian a la velocidad de salida en los primeros 20 metros. La saltabilidad es esencial en cualquier disciplina deportiva, ya sea para desplazarse o competir, las herramientas diseñadas para evaluarlas han sido: el CMJ, SJ y DJ, investigadas y validadas (Wrona et al., 2023; Abdelkader et al., 2023). En la literatura del entrenamiento de patinaje, los análisis son descriptivos e inferenciales, sin encontrar una causalidad entre las variables, que aporte nuevas perspectivas en el entrenamiento.

La estabilidad consiste en mantener el centro de masa sobre la base de sustentación durante un movimiento, exigencia que se presenta sobre los patinadores (Abdelkader et al., 2023; González-Fernández et al., 2022), los instrumentos como y-balance y start-balance reconocen las asimetrías en los miembros inferiores (González-Fernández et al., 2022) y el estado neuromuscular (Plisky et al., 2021). Además, el desplazamiento en dirección anterior ha mostrado ser un factor físico que influye en la velocidad de la fase de salida en deportistas de patinaje (Gómez García et al., 2025), señalando nuevas formas de aplicar este instrumento.

Asimismo, los análisis puramente asociativos o relacionales pueden conducir a interpretaciones erróneas cuando existen variables confusoras no controladas (Bullock et al., 2023). El uso de DAG y modelos bayesianos permite estimar efectos causales más realistas sobre el entrenamiento, incluso con muestras pequeñas, proporcionando evidencia directamente aplicable para decidir que variables deben priorizarse en la fase inicial de aceleración en la disciplina de patinaje (Pearl, 2009; Hernán & Robins, 2020; Nuzzo et al., 2022). Este método ajusta las rutas causales y disminuye los errores como el ajuste inapropiado por mediadores, aspectos cruciales en estudios que tengan múltiples variables fisiológicas. Los avances en inferencia estadística han combinado los modelos de propensión (como el uso de ponderaciones por el inverso de la probabilidad de tratamiento) con técnicas bayesianas, produciendo estimaciones que controlan sesgos de confusión, y permiten interpretar los hallazgos en términos probabilísticos. Este enfoque presenta ventajas en contextos de muestras pequeñas, donde los efectos esperados son leves pero trascendentales en la práctica (Imbens & Rubin, 2015; Leonelli, 2025; Nuzzo et al., 2022). El uso combinado de puntuación de propensión, gráficos causales y modelos bayesianos mejoran la validez de los estudios observacionales (Ding & Mealli, 2023).

Dichos enfoques permiten la conexión directa de variables relacionadas, siendo alguna de estas: fatiga, elasticidad del sistema neuromuscular y el desplazamiento en anterior, igualmente técnicas de recolección de datos como saltos emplean el tiempo de vuelo como variable asociada a la altura vertical (Gomez-Rodas et al., 2024; Kennedy et al., 2021), y el tiempo de contacto está estrechamente vinculado con la potencia y reactividad del miembro inferior relevantes en el rendimiento deportivo (McGhie et al., 2020), además de otras variables cinemáticas. Reconocer el impacto de cada variable sobre la velocidad del gesto de salida es complejo, ya que la masa muscular, el sexo y el tiempo de entrenamiento influyen en los resultados que se obtienen (Bchini et al., 2023), volviéndose novedoso el análisis de efectos causales. La literatura que aborde la velocidad de salida en los primeros 20 metros en patinadores existe en poca proporción, Song & Moon (2017) analizaron biomecánicamente el gesto de salida, encontrando una relación en los ángulos de rodilla y tobillo, sobre la transferencia de una fase a otra, sin diferencias entre sexos, mientras que Gómez García et al. (2025) analizaron los efectos del tiempo de vuelo, tiempo de contacto y desplazamiento en dirección anterior encontrando un impacto significativo sobre la velocidad. Por tal razón, el objetivo de la investigación es estimar el efecto conjunto de tiempo de contacto en el CMJ (TC\_CMJ), tiempo de vuelo de SJ (TV\_SJ), y apoyo frontal de pierna derecha (APY\_D\_FRONTAL) sobre la velocidad en los primeros 20 metros (VELOCIDAD\_20\_M), ajustando por Edad, Sexo e Índice-GrasaCorporal. Este enfoque contribuye a la literatura del deporte, al analizar el efecto del tiempo de vuelo, tiempo de contacto y apoyo de la pierna derecha en dirección anterior sobre la velocidad, controlando variables de confusión, útil para el diseño de modelos entrenamiento más personalizados y basados en evidencia.

## Método

### **Diseño del estudio**

Se desarrolló un estudio observacional, analítico y transversal, orientado a la identificación de efectos causales directos de variables biomecánicas y funcionales sobre el rendimiento en la fase de aceleración inicial en patinaje de velocidad.

### **Contexto**

El estudio se llevó a cabo en un contexto de entrenamiento técnico–funcional con patinadores de velocidad pertenecientes a escuelas de formación deportiva de la ciudad de Cali (Colombia). Las evaluaciones se realizaron en pista sintética de 200 metros bajo condiciones ambientales estables, en horario matutino (8:00–10:00 a.m.), con el fin de reducir la variabilidad térmica y lumínica.

Las pruebas se efectuaron como parte de un microciclo de control físico–técnico supervisado por entrenadores certificados y personal de apoyo en biomecánica aplicada al rendimiento.

### **Participantes**

Todos los deportistas participaron voluntariamente y contaron con el consentimiento informado de sus padres o tutores legales, así como con la aprobación de la dirección técnica del club. Los criterios de inclusión consideraron:

Pertenecer al proceso formativo con al menos 2 años de experiencia deportiva continua.

Estar clínicamente aptos para realizar pruebas de campo, condición que fue verificada mediante una valoración médica previa que incluyó anamnesis dirigida, examen físico básico (presión arterial, frecuencia cardíaca, auscultación y movilidad) y confirmación de ausencia de lesiones agudas o enfermedades no controladas.

No presentar lesiones musculoesqueléticas en las cuatro semanas previas a la evaluación.

Fueron excluidos los sujetos con registros incompletos o inconsistentes en las variables de interés.

### **Variables**

La variable dependiente fue la velocidad en los primeros 20 metros del gesto técnico de salida (VELOCIDAD\_20\_M), medida en metros por segundo (m/s).

Las variables independientes o exposiciones fueron:

Velocidad de vuelo en el salto en cuclillas (TV\_SJ)

Tiempo de contacto durante el salto con contramovimiento (TC\_CMJ)

Alcance frontal derecho en el Y-Balance Test (APY\_D\_FRONTAL)

Como variables de ajuste (confusoras controladas) se incluyeron: Edad, Sexo e Índice de Grasa Corporal, según la estructura causal especificada en el DAG.

Otras variables medidas (Índice de Masa Muscular, Edad Deportiva y Flexibilidad) fueron consideradas en la construcción del modelo estructural, pero no incluidas en la estimación final debido a que no cumplían criterios de confusión según el criterio del backdoor.

### **Sesgo**

La posibilidad de sesgo de confusión se abordó mediante la construcción del DAG que permitió identificar el conjunto mínimo de ajuste necesario para bloquear los caminos espurios entre las exposiciones y el resultado.

Se minimizaron los sesgos de medición utilizando protocolos estandarizados, dispositivos calibrados y supervisión técnica directa durante las pruebas.

Se controló el sesgo de selección mediante la inclusión de todos los deportistas activos del rango de edad definido, y el sesgo de información se redujo mediante doble registro de los datos y verificación cruzada de los resultados por dos investigadores independientes.



## ***Tamaño de la muestra***

El tamaño muestral ( $n = 25$ ) estuvo determinado por el número total de deportistas disponibles en el grupo competitivo evaluado.

Aunque no se realizó un cálculo formal de potencia estadística previo, la decisión se sustentó en el objetivo exploratorio y causal del estudio, priorizando la validez interna del modelo sobre la inferencia poblacional.

El enfoque bayesiano adoptado permite obtener inferencias robustas incluso con tamaños muestrales moderados, al aprovechar la información previa y las distribuciones posteriores de los parámetros.

### *Instrumentos*

Velocidad (VELOCIDAD\_20\_M): medida con sistema de fotoceldas electrónicas de alta precisión (0,01 s), ubicadas a 0 y 20 m, bajo protocolo estándar de salida de patinaje.

Salto en cuclillas (SJ) y salto con contramovimiento (CMJ): evaluados mediante ADR jumping que registró el tiempo de vuelo y tiempo de contacto.

Y-Balance Test: se empleó el kit validado de YBT para registrar el alcance máximo en la dirección anterior (APY\_D\_FRONTAL), normalizado por la longitud de la pierna dominante.

Composición corporal: determinada mediante bioimpedancia eléctrica multifrecuencia (Tanita BC-418), obteniéndose los índices de masa muscular y grasa corporal.

Flexibilidad: medida a través del test de Sit and Reach estandarizado.

## ***Procedimiento***

Las pruebas fueron hechas en una pista oficial que se adaptó para las diferentes evaluaciones, realizada en un mismo horario y similares condiciones ambientales en todas las sesiones.

Una preparación específica fue efectuada, incluyó un calentamiento general de 7 minutos, después 5 minutos de calentamiento específico adaptado a las pruebas. Los tests se realizaron en estaciones, conforme acababan la prueba iban desplazándose a la siguiente estación. Todas las pruebas incluyeron un intento de familiarización seguido de tres repeticiones válidas, separadas por 60–90 segundos de recuperación. En los saltos SJ y CMJ se descartaron los intentos con balanceo de brazos o despegue asimétrico, y el valor utilizado para el análisis correspondió al promedio de las tres repeticiones válidas.

En el Y-Balance Test se realizaron tres intentos por dirección; los intentos con pérdida de equilibrio fueron eliminados y se seleccionó el alcance máximo.

La velocidad en 20 metros se evaluó en dos intentos máximos separados por 5 minutos, utilizando el menor tiempo registrado como valor definitivo.

Todos los deportistas participaron voluntariamente. El consentimiento informado fue obtenido mediante un formato institucional estandarizado, el primero firmado por los padres o tutores legales y el segundo firmado por el deportista. El documento describía los objetivos del estudio, procedimientos, riesgos potenciales y el derecho a retirarse libremente.

## ***Análisis estadístico***

Para estimar el efecto conjunto de tres variables predictoras, el tiempo de contacto durante la ejecución del salto con contramovimiento (TC\_CMJ), la velocidad de vuelo en el salto en cuclillas (TV\_SJ) y el alcance frontal derecho en el Test Y (APY\_D\_FRONTAL) sobre la velocidad alcanzada en los primeros 20 metros del gesto técnico de salida en patinaje de velocidad (VELOCIDAD\_20\_M), se empleó un enfoque bayesiano mediante modelos de regresión multivariada.

La elección metodológica se fundamentó en el uso de modelos de inferencia causal representados mediante diagramas acíclicos dirigidos (DAGs), construidos y validados mediante la herramienta DAGitty. En este modelo estructural, las variables TC\_CMJ, TV\_SJ y APY\_D\_FRONTAL fueron especificadas como exposiciones (causas directas potencialmente modificables), mientras que VELOCIDAD\_20\_M fue definida como la variable de resultado. A partir del análisis estructural de caminos de confusión y posibles

colisionadores, se determinó que el conjunto mínimo suficiente para bloquear los biasing paths y estimar el efecto total conjunto de estas tres variables estaba compuesto por: Edad, Sexo e ÍndiceGrasaCorporal.

Aunque el DAG incluye otras variables como ÍndiceMasaMuscular, EdadDeport y Flexibilidad, estas no fueron incorporadas en el modelo estadístico debido a que su ajuste no es necesario según el criterio de backdoor y podrían, en algunos casos, inducir sesgo o aumentar la varianza sin aportar mayor control de confusión. Por ejemplo, ÍndiceMasaMuscular es una causa de TC\_CMJ y TV\_SJ, pero sus efectos de confusión ya están bloqueados por Edad y Sexo. De igual forma, Flexibilidad es una causa de APY\_D\_FRONTAL, pero no existe un camino de confusión hacia el resultado a través de ella.

Con base en esta estructura causal, se estimó un modelo de regresión bayesiana mediante el paquete brms en R, que permitió implementar modelos jerárquicos utilizando la sintaxis de fórmula típica de lme4 y motores de inferencia basados en Stan. Se especificaron priors débilmente informativos (normal(0,1) para los coeficientes, normal(0,5) para el intercepto y Cauchy(0,1) para la desviación estándar residual). El modelo fue ejecutado utilizando cuatro cadenas de muestreo con 4000 iteraciones cada una (1000 de calentamiento), logrando una convergencia satisfactoria. Inicialmente, se presentaron advertencias relacionadas con la superación del límite máximo de profundidad de los árboles (max\_treedepth) durante la exploración de la distribución posterior mediante el algoritmo NUTS (No-U-Turn Sampler). Para mitigar este problema, se incrementó el valor del parámetro de control max\_treedepth a 15, lo que permitió una exploración más profunda del espacio de parámetros. Posterior a este ajuste, las cadenas completaron su ejecución sin emitir advertencias adicionales, y mostraron tiempos de muestreo consistentes entre sí. Esta intervención fue fundamental para garantizar una adecuada fidelidad del muestreo y la estabilidad de los estimadores posteriores.

## Resultados

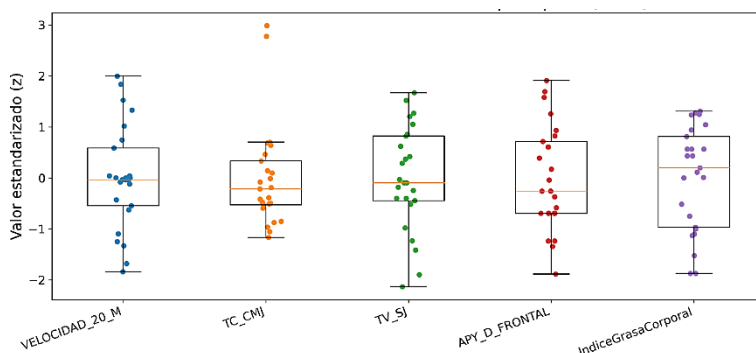
En cuanto a las variables cuantitativas, la edad promedio fue de  $14,36 \pm 0,49$  años, con un rango de 14 a 15 años, lo que refleja una muestra homogénea en cuanto a la edad cronológica. La velocidad promedio en los primeros 20 metros (VELOCIDAD\_20\_M) fue de  $3,46 \pm 0,26$  m/s, con valores entre 2,99 y 3,97 m/s.

Respecto a las variables de rendimiento funcional, el alcance frontal derecho (APY\_D\_FRONTAL) presentó una media de  $60,4 \pm 9,42$  cm (rango: 43–78 cm), mientras que el tiempo de contacto en el salto con contramovimiento (TC\_CMJ) mostró un promedio de  $3219,4 \pm 1513,5$  ms, con un rango de 1489 a 7644 ms, evidenciando alta variabilidad interindividual. La velocidad de vuelo en el salto en cuclillas (TV\_SJ) alcanzó una media de  $533,9 \pm 61,2$  unidades, con valores que oscilaron entre 406 y 634.

En términos de composición corporal, el índice de grasa corporal fue en promedio  $21,04 \pm 7,00\%$ , con un rango amplio de 8,2 a 30,0%, lo que sugiere diferencias relevantes entre participantes en su estado de composición corporal.

La distribución estandarizada del desenlace y de las exposiciones se presenta en la Figura 1, lo que permite apreciar la variabilidad interindividual y la presencia de posibles valores extremos.

Figura 1. Distribución estandarizada de las variables principales.



Nota. Elaboración propia.

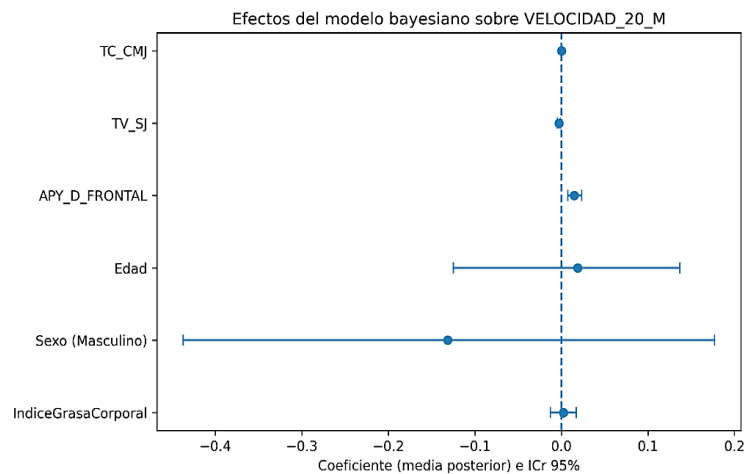
El modelo bayesiano permite estimar el efecto conjunto de las variables TC\_CMJ, TV\_SJ y APY\_D\_FRONTAL sobre la variable de resultado VELOCIDAD\_20\_M, ajustando por Edad, Sexo e IndiceGrasaCorporal. El modelo presentó buena convergencia y estabilidad en las cadenas de muestreo. Los coeficientes estimados y sus respectivos intervalos de credibilidad del 95% se presentan a continuación.

Tabla 1. Descriptivos de las variables.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	IC 95% (Q2.5 - Q97.5)
Intercepto	4.236	0.958	[2.359 ; 6.106]
TC_CMJ	-0.000044	0.000026	[-0.000097 ; 0.000008]
TV_SJ	-0.00292	0.00088	[-0.00466 ; -0.00117]
APY_D_FRONTAL	0.01484	0.00382	[0.00730 ; 0.02340]
Edad	0.01873	0.0640	[-0.125 ; 0.137]
Sexo (Masculino)	-0.1314	0.1557	[-0.437 ; 0.177]
IndiceGrasaCorporal	0.00249	0.00759	[-0.0126 ; 0.0172]

Nota. Elaboración propia.

Figura 2. Efectos del modelo bayesiano sobre la velocidad de 20m.

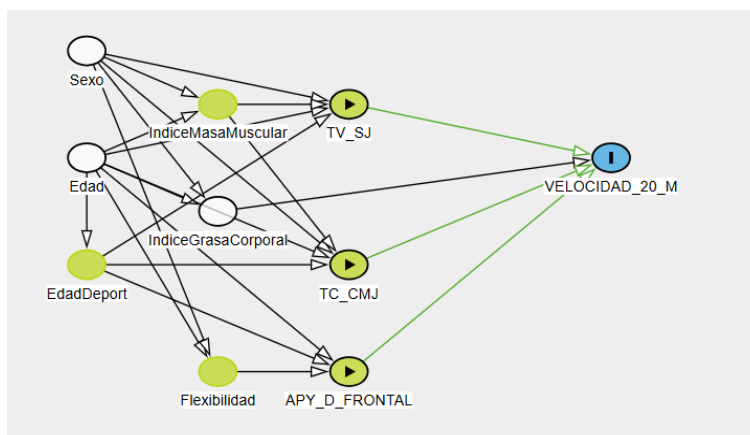


Nota. Elaboración propia.

El modelo presentó buena convergencia y estabilidad en las cadenas de muestreo. Los coeficientes estimados y sus respectivos intervalos de credibilidad del 95% se presentan a continuación. Adicionalmente, estos efectos se resumen de forma visual en la Figura 2.

Desde una perspectiva inferencial bayesiana, se considera que un efecto es compatible con un impacto creíble cuando su intervalo de credibilidad del 95% no incluye el cero.

Figura 3. Diagrama acíclico dirigido.



Nota. Elaboración propia.

Bajo este criterio, los efectos de las siguientes variables fueron creíbles y relevantes:

**TV\_SJ** (Velocidad de vuelo en SJ): El coeficiente estimado fue negativo ( $-0.00292$ ), con un IC95% completamente por debajo de cero  $[-0.00466 ; -0.00117]$ . Esto sugiere que un mayor tiempo de vuelo en el salto en cuclillas se asocia con una menor velocidad en la salida, lo que puede interpretarse como una menor eficiencia de impulso en la dirección horizontal.

**APY\_D\_FRONTAL** (Alcance frontal derecho en Y-Balance Test): El efecto estimado fue positivo ( $0.01484$ ), con un IC95% entre  $[0.00730 ; 0.02340]$ . Esto indica que mayores valores de alcance están asociados con mayor velocidad en los primeros 20 metros, lo cual refuerza la relevancia del equilibrio dinámico y control postural en la fase inicial del desplazamiento.

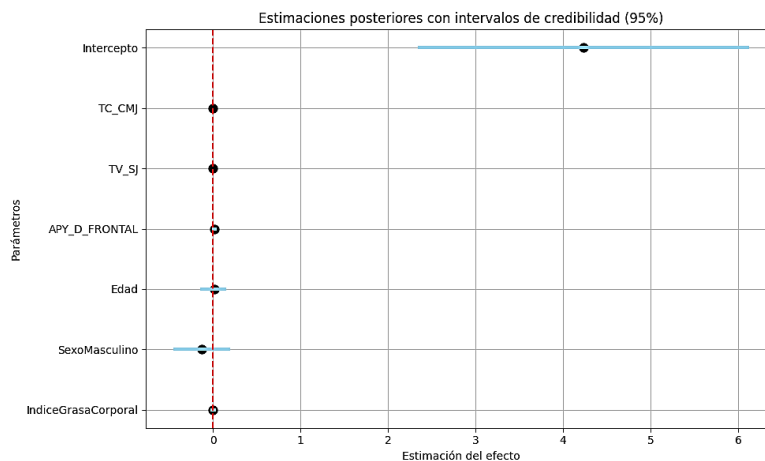
Por otro lado:

**TC\_CMJ** (tiempo de contacto en el salto con contramovimiento) mostró un efecto negativo ( $-0.000044$ ), pero su intervalo de credibilidad  $[-0.000097 ; 0.000008]$  incluyó el cero. Aunque este resultado sigue la misma dirección esperada teóricamente (a menor tiempo de contacto, mayor velocidad), el modelo no encontró suficiente evidencia para asegurar un efecto creíble al 95%.

Ninguna de las variables de ajuste (Edad, Sexo, ÍndiceGrasaCorporal) mostró efectos creíbles en el resultado principal, lo cual valida su papel como controladores de confusión y no como predictores principales.

Los resultados obtenidos se interpretan como efectos causales directos de la velocidad de vuelo en el salto en cuclillas (TV\_SJ) y del alcance frontal derecho (APY\_D\_FRONTAL) sobre la velocidad en 20 metros (VELOCIDAD\_20\_M), bajo los supuestos del modelo causal representado mediante el DAG propuesto. Dicho modelo especifica que las exposiciones son causas potencialmente modificables y que el ajuste por Edad, Sexo e Índice de Grasa Corporal bloquea todos los caminos de confusión. Por tanto, los efectos estimados reflejan la influencia causal directa de dichas variables en la aceleración inicial de los patinadores.

Figura 4. Gráfico de estimaciones.



Nota. Elaboración propia.

## Discusión

Los resultados de este estudio confirman la influencia significativa de factores biomecánicos y neuromusculares sobre el rendimiento en la fase inicial del patinaje de velocidad, particularmente en los primeros 20 metros del gesto de salida. Tal como ha sido reportado previamente en la literatura, el control postural unipodal, la eficiencia en la aplicación de fuerza y la capacidad de reacción neuromuscular son determinantes en el desempeño de acciones explosivas en deportes de desplazamiento (Roy & Gupta, 2023; Sehgal et al., 2023).

En este estudio, se observó que la variable APY\_D\_FRONTAL, que representa el alcance en la dirección anterior del test Y-Balance desde el apoyo derecho, tuvo un efecto positivo y creíble sobre la velocidad. Este hallazgo respalda trabajos previos que vinculan el equilibrio dinámico con una mayor eficiencia biomecánica durante la fase de aceleración en patinaje e incluso en disciplinas como el hockey sobre hielo y el atletismo (Bakaraki et al., 2021; Gupta et al., 2023). La estabilidad obtenida en un solo apoyo no solo facilita la transferencia eficiente de la fuerza generada desde el tren inferior, sino que también minimiza oscilaciones compensatorias que podrían traducirse en pérdida de potencia (Bakaraki et al., 2021).

La variable TV\_SJ, correspondiente a la velocidad de vuelo en el salto en cuclillas, mostró un efecto negativo y estadísticamente creíble. Este resultado puede parecer contraintuitivo si se considera que un mayor tiempo de vuelo podría asociarse con mayor capacidad de salto. Sin embargo, estudios como el de Gajewski et al. (2018) han demostrado que en gestos como el SJ, un mayor tiempo de vuelo puede reflejar una estrategia menos eficiente de propulsión horizontal, especialmente cuando la fuerza es dirigida en un eje vertical no congruente con la dirección de carrera. Por tanto, este hallazgo refuerza la necesidad de considerar no solo la magnitud del salto sino la dirección de la fuerza aplicada en relación con la técnica específica del deporte (de Ruiter et al., 2006).

Por su parte, TC\_CMJ, que representa el tiempo de contacto en el salto con contramovimiento, mostró una estimación negativa acorde con la literatura, pero con un intervalo de credibilidad que incluyó el cero. Estudios previos han mostrado que menores tiempos de contacto en el CMJ se asocian con una mayor eficiencia neuromuscular y producción rápida de fuerza (Markovic & Mikulic, 2010; Sáez-Michea et al., 2023). Aunque en este análisis no se obtuvo una evidencia concluyente, su dirección esperada y su proximidad al umbral de credibilidad sugieren que podría tener una importancia práctica relevante en poblaciones más amplias o con mayor variabilidad.

Desde el punto de vista aplicado, estos resultados ofrecen implicaciones claras para el diseño de programas de entrenamiento en patinadores juveniles. Por ejemplo, la inclusión sistemática de ejercicios de estabilidad dinámica sobre superficies inestables o asimétricas podría mejorar el control postural en

condiciones funcionales. Asimismo, el entrenamiento pliométrico orientado a reducir el tiempo de contacto en acciones reactivas puede favorecer el desarrollo de una aceleración inicial más explosiva (Sehgal et al., 2023; Roy & Gupta, 2023).

A pesar de estos hallazgos, es importante reconocer ciertas limitaciones. El tamaño muestral, aunque controlado y homogéneo, fue reducido ( $n=25$ ), lo que restringe la capacidad del modelo para identificar efectos sutiles. Además, no se evaluaron variables como la fuerza isométrica del tren inferior, que podrían complementar la explicación del rendimiento. Futuras investigaciones deberían considerar diseños longitudinales y modelos jerárquicos multinivel para capturar el efecto de la variabilidad entre deportistas y sus trayectorias de desarrollo.

## Conclusiones

La fase inicial del patinaje de velocidad está fuertemente influenciada por variables biomecánicas y neuromusculares específicas. De manera particular, el equilibrio dinámico medido a través del alcance frontal del test Y (APY\_D\_FRONTAL) y la eficiencia del gesto de salto (TV\_SJ) mostraron efectos creíbles y significativos sobre la velocidad alcanzada en los primeros 20 metros, destacando su relevancia como componentes funcionales del desempeño en situaciones de aceleración explosiva.

El análisis bayesiano confirmó que un mayor control postural se asocia con una mayor capacidad de generar desplazamiento eficiente desde el inicio del gesto, mientras que un mayor tiempo de vuelo en el salto en cuclillas se vincula negativamente con el rendimiento en la salida. Estos resultados refuerzan la importancia de incorporar de manera estructurada tanto el entrenamiento de la estabilidad dinámica como estrategias específicas de aplicación de fuerza horizontal en la preparación física de patinadores juveniles.

Aunque el tiempo de contacto en el salto con contramovimiento (TC\_CMJ) mostró un patrón consistente con lo reportado en la literatura indicando que una menor duración podría favorecer una mayor velocidad, no se alcanzó una credibilidad estadística robusta, lo que sugiere que su efecto podría depender de factores adicionales como la coordinación intermuscular o la fatiga aguda.

Desde una perspectiva aplicada, los entrenadores deben priorizar el desarrollo de capacidades neuromusculares reactivas y la optimización del equilibrio funcional como componentes clave para mejorar la aceleración inicial. La planificación del entrenamiento debe contemplar pruebas de diagnóstico como el test Y-Balance y los saltos verticales con instrumentación, no solo como herramientas evaluativas, sino también como referencia para la periodización individualizada.

Finalmente, este estudio ofrece una base metodológica sólida para futuras investigaciones en ciencias del deporte, especialmente aquellas interesadas en integrar modelos causales y análisis bayesiano en contextos de evaluación del rendimiento juvenil. Se recomienda ampliar el tamaño muestral, incluir medidas de fuerza específica y aplicar diseños longitudinales para validar y generalizar estos hallazgos en distintas fases del desarrollo deportivo.

## Agradecimientos

Agradecemos a la liga Vallecaucana de Patinaje por el escenario deportivo y los deportistas.

## Financiación

La investigación fue financiada por los investigadores, sin aporte de terceros.

## Referencias

- Abdelkader, N., Romanelli, A., & Hogg-Johnson, S. (2021, December 1). *Does induced fatigue alter dynamic balance in athletes? A systematic review*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8791551/>
- Alshehre, Y., Alkhathami, K., Brizzolara, K., Weber, M., & Wang-Price, S. (2021). Reliability and Validity of the Y-balance Test in Young Adults with Chronic Low Back Pain. *International journal of sports physical therapy*, 16(3), 628–635. <https://doi.org/10.26603/001c.23430>
- Bchini, S., Hammami, N., Selmi, T., Zalleg, D., & Bouassida, A. (2023). Influence of muscle volume on jumping performance in healthy male and female youth and young adults. *BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00639-x>
- Botero, C. W., Palma, B. E. P., Parrací, C. R., Rodas, A. G., Restrepo, D. F. A., & Claros, J. a. V. (2023). Vertical jump performance and the relationship with sprint speed at 20 m and 50 m in professional soccer players. *F1000Research*, 12, 663. <https://doi.org/10.12688/f1000research.131225.1>
- Bullock, G. S., Ward, P., Hughes, T., Thigpen, C. A., Cook, C. E., & Shanley, E. (2023). Using randomized controlled trials in the sports medicine and performance environment: Is it time to reconsider and think outside the methodological box? *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 53(6), 331–334. <https://doi.org/10.2519/jospt.2023.11824>
- de Ruiter, C. J., Van Leeuwen, D., Heijblom, A., Bobbert, M. F., & de Haan, A. (2006). Fast unilateral isometric knee extension torque development and bilateral jump height. *Medicine and science in sports and exercise*, 38(10), 1843–1852. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000227644.14102.50>
- Gajewski, J., Michalski, R., Buśko, K., Mazur-Różycka, J., & Staniak, Z. (2018). Countermovement depth - a variable which clarifies the relationship between the maximum power output and height of a vertical jump. *PubMed*, 20(1), 127–134. <https://doi.org/10.5277/abb-01058-2017-02>
- Gómez García, M. Ángel, Florez Peña, Y., Gaviria Chavarro, J., & Orejuela Aristizabal, D. F. (2025). Análisis de factores físicos en los primeros 20 metros de la fase de salida en patinaje de velocidad. *Retos*, 67, 1356–1366. <https://doi.org/10.47197/retos.v67.115092>
- Gomez-Rodas, A., Marín, M. B., Santamaría, J. G., Del Rio Gaviria, C., Calderón, S. F., Restrepo, D. F. A., & Palma, B. E. P. (2024). Validez y fiabilidad de la aplicación My Jump 2 para la estimación del tiempo de vuelo y la altura del salto vertical con una sola pierna en futbolistas de élite sub-20. *Journal of Sport and Health Research*, 16(3), 373–384. <https://doi.org/10.58727/jshr.97670>
- González-Fernández, F. T., Martínez-Aranda, L. M., Falces-Prieto, M., Nobari, H., & Clemente, F. M. (2022). Exploring the Y-Balance-Test scores and inter-limb asymmetry in soccer players: differences between competitive level and field positions. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, 14(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00438-w>
- Hernán, M. A., & Robins, J. M. (2020). Causal inference: What if. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.
- Hooper, T. L., James, C. R., Brismée, J. M., Rogers, T. J., Gilbert, K. K., Browne, K. L., & Sizer, P. S. (2016). Dynamic balance as measured by the Y-Balance Test is reduced in individuals with low back pain: A cross-sectional comparative study. *Physical therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 22, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2016.04.006>
- Kennedy, R. A., & Drake, D. (2021). Improving the Signal-To-Noise Ratio When Monitoring Countermovement Jump Performance. *Journal of strength and conditioning research*, 35(1), 85–90. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002615>
- Lin, J., Shen, J., Zhang, J., Zhou, A., & Guo, W. (2023). Correlations between horizontal jump and sprint acceleration and maximal speed performance: a systematic review and meta-analysis. *PeerJ*, 11, e14650. <https://doi.org/10.7717/peerj.14650>
- Markovic, G., & Mikulic, P. (2010). Neuro-Musculoskeletal and performance adaptations to Lower-Extremity plyometric training. *Sports Medicine*, 40(10), 859–895. <https://doi.org/10.2165/11318370-000000000-00000>
- McGhie, D., Østerås, S., Ettema, G., Paulsen, G., & Sandbakk, Ø. (2020). Strength Determinants of Jump Height in the Jump Throw Movement in Women Handball Players. *Journal of strength and conditioning research*, 34(10), 2937–2946. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002684>
- Nuzzo J. L. (2023). Narrative Review of Sex Differences in Muscle Strength, Endurance, Activation, Size, Fiber Type, and Strength Training Participation Rates, Preferences, Motivations, Injuries, and

- Neuromuscular Adaptations. *Journal of strength and conditioning research*, 37(2), 494–536. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000004329>
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, Reasoning, and Inference* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803161>
- Plisky, P., Schwartkopf-Phifer, K., Huebner, B., Garner, M. B., & Bullock, G. (2021). Systematic Review and Meta-Analysis of the Y-Balance Test Lower Quarter: Reliability, Discriminant Validity, and Predictive Validity. *International journal of sports physical therapy*, 16(5), 1190–1209. <https://doi.org/10.26603/001c.27634>
- Sáez-Michea, E., Alarcón-Rivera, M., Valdés-Badilla, P., & Muñoz, E. G. (2023). Efectos de seis semanas de entrenamiento isoinercial sobre la capacidad de salto, velocidad de carrera y equilibrio postural dinámico. *Retos*, 48, 291–297. <https://doi.org/10.47197/retos.v48.95284>
- Song, J., Lee, D. H., & Moon, Y. (2017). Kinematics of the running-like sprint start in long-track speed skating. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 17(4), 563–575. <https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1372161>
- Song, J., Lee, D., & Moon, J. (2017). Biomechanical analysis of speed skating 500 m start phase. *Korean Journal of Sport Science*, 760–767. <https://doi.org/10.24985/kjss.2017.28.3.760>
- Stuart, A., & Cochrane-Snyman, K. C. (2021). Strength training and development in competitive speed skating. *Strength and Conditioning Journal*, 44(3), 1–10. <https://doi.org/10.1519/ssc.00000000000000663>
- Wrona, H. L., Zerega, R., King, V. G., Reiter, C. R., Odum, S., Manifold, D., Latorre, K., & Sell, T. C. (2023). Ability of Countermovement Jumps to Detect Bilateral Asymmetry in Hip and Knee Strength in Elite Youth Soccer Players. *Sports (Basel, Switzerland)*, 11(4), 77. <https://doi.org/10.3390/sports11040077>

### Datos de los/as autores/as y traductor/a:

Javier Gaviria Chavarro	<a href="mailto:javier.gaviria@gmail.com">javier.gaviria@gmail.com</a>	Autor/a
Yulimar Florez Peña	<a href="mailto:yulimar.pena2@endeporte.edu.co">yulimar.pena2@endeporte.edu.co</a>	Autor/a
Miguel Ángel Gómez García	<a href="mailto:gomezgarciamiguel440@gmail.com">gomezgarciamiguel440@gmail.com</a>	Autor/a
Diego Fernando Orejuela Aristizabal	<a href="mailto:diego.orejuela@endeporte.edu.co">diego.orejuela@endeporte.edu.co</a>	Autor/a
Alfonsina del Cristo Martínez Gutiérrez	<a href="mailto:adcmartinez@endeporte.edu.co">adcmartinez@endeporte.edu.co</a>	Autor/a