



Cuantificación multivariada de carga interna en basketbol universitario: componentes principales, modelos mixtos y Mahalanobis-Taguchi

Multivariate internal load quantification in university basketball: principal components, mixed models and Mahalanobis-Taguchi

Autores

MAFYD. Alvaro Torres Correa ¹
Dra. Alejandra Flores Sanchez ²
MAFYD. Josue Eduardo Nieto Serrano ¹
Dra. Zeltzin N. Alonso-Ramos ¹
Dr. Germán Hernández-Cruz ¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León (México)

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México)

Autor de correspondencia:
Dr. Germán Hernández Cruz
german.hernandez-crz@uanl.edu.mx

Recibido: 06-04-26
Aceptado: 30-05-26

Cómo citar en APA

Torres Correa, A., Flores Sanchez, A., Nieto Serrano, E. J., Alonso-Ramos, Z. N., & Hernández-Cruz, G. (2026). Cuantificación multivariada de carga interna en basketbol universitario: componentes principales, modelos mixtos y Mahalanobis-Taguchi. *Retos*, 82, 1068-1079. <https://doi.org/10.47197/retos.v82.119410>

Resumen

Introducción: La cuantificación de la carga interna constituye un elemento fundamental para la planificación del entrenamiento en deportes colectivos. Los estudios previos emplearon enfoques univariados que no captaron su naturaleza multidimensional.

Objetivo: Analizar la carga interna en jugadores de basketbol universitario mexicano mediante un enfoque multivariado integrado que combinó análisis de componentes principales, modelos lineales mixtos, sistema Mahalanobis-Taguchi y concordancia Bland-Altman evaluando diferencias por posición de juego, periodo del partido y resultado competitivo.

Metodología: Participaron 17 jugadores masculinos de un equipo universitario con 236 observaciones en 22 partidos oficiales. La carga fisiológica se cuantificó con el Impulso de Entrenamiento (TRIMP de Edwards) por cuarto y la perceptual con la Escala de Percepción Subjetiva del Esfuerzo. Se aplicaron análisis de componentes principales, modelos lineales mixtos, sistema Mahalanobis-Taguchi y concordancia Bland-Altman.

Resultados: El análisis de componentes principales reveló un único componente que explicó el 55.28% de la varianza, evidenciando unidimensionalidad de la carga. Los modelos lineales mixtos identificaron el periodo como factor dominante, con mayor demanda en el segundo y cuarto cuarto. En partidos perdidos la carga no descendió en el tercer cuarto. La percepción del esfuerzo difirió entre posiciones mientras el Impulso de Entrenamiento no, evidenciando disociación perceptual-fisiológica. **Discusión:** Los resultados fueron consistentes con estudios previos que reportaron unidimensionalidad de la carga interna en deportes colectivos. El patrón de dientes de sierra replicó hallazgos de baloncesto de élite y la disociación perceptual-fisiológica sugirió seleccionar indicadores según posición de juego.

Conclusiones: El enfoque multivariado integrado revela patrones de carga interna no detectables mediante análisis univariado convencional, con implicaciones directas para la individualización de la carga de entrenamiento.

Palabras clave

Análisis multivariado; basketbol; carga interna; RPE; TRIMP.

Abstract

Introduction: Internal load quantification constituted a fundamental element for training planning and injury prevention in team sports. Most basketball studies employed univariate approaches that failed to capture the multidimensional nature of load.

Objective: Internal load in Mexican university basketball was analyzed using an integrated multivariate approach combining principal component analysis, linear mixed models, the Mahalanobis-Taguchi system and Bland-Altman concordance, evaluating differences by playing position, game period, and match outcome.

Methodology: Seventeen male players from a university team participated, yielding 236 observations across 22 official games. Physiological load was quantified using the Training Impulse (Edwards' TRIMP) per game quarter and perceptual load with the Rating of Perceived Exertion scale. Principal component analysis, linear mixed models, the Mahalanobis-Taguchi system, and Bland-Altman concordance analysis were applied.

Results: Principal component analysis revealed a single component explaining 55.28% of variance, evidencing unidimensionality of internal load. Linear mixed models identified game period as the dominant factor, with greater demand in the second and fourth quarters. In lost games, load did not decrease in the third quarter. Perceived exertion differed between positions while Training Impulse showed no differences, evidencing perceptual-physiological dissociation. **Discussion:** Results were consistent with prior studies reporting unidimensionality of internal load in team sports. The saw-tooth temporal pattern replicated findings from elite basketball and the positional perceptual-physiological dissociation suggested selecting monitoring indicators according to playing position.

Conclusions: The integrated multivariate approach reveals internal load patterns undetectable through conventional univariate analysis, with direct implications for individualized training load management.

Keywords

Multivariate analysis; Basketball, internal load, RPE, TRIMP.



Introducción

La carga interna es la respuesta del organismo al ejercicio, tomando un papel fundamental en el entrenamiento, pues permite conocer el estado en el que se encuentran los atletas, antes, durante y después de la competencia; conocer estos valores podría ayudar a los entrenadores y preparadores físicos a determinar si sus atletas se están adaptando de manera positiva a los entrenamientos (López et al., 2021). Es por ello por lo que en deportes colectivos ha adquirido un papel central en la planificación del entrenamiento y la prevención de lesiones (Bourdon et al., 2017; Fox et al., 2018).

En basquetbol, las demandas fisiológicas varían considerablemente en función de la posición de juego, el periodo del partido y el contexto competitivo (Scanlan et al., 2012b; Stojanović et al., 2018). En el contexto del basquetbol universitario mexicano, la investigación sobre carga interna es aún incipiente, y no se han reportado estudios que integren múltiples técnicas multivariadas para caracterizar las demandas fisiológicas y perceptuales de la competencia (Guedea-Delgado et al., 2022). Esta carencia limita la capacidad de los cuerpos técnicos para individualizar las cargas de entrenamiento con base en evidencia científica contextualizada.

La frecuencia cardiaca (FC) es una de las variables fisiológicas más utilizadas para cuantificar la carga interna, por tratarse de un método no invasivo y de costo accesible. A partir de la FC se calcula el TRIMP («Impulso de Entrenamiento», expresado en unidades arbitrarias, UA), que aproxima las demandas fisiológicas del atleta y del que existen distintas variantes —Edwards, Lucia y Banister— (Espasa-Labrador et al., 2023). El método de Edwards, basado en la acumulación ponderada del tiempo en cinco zonas de intensidad de FC, resulta especialmente adecuado para deportes intermitentes y acíclicos como el basquetbol, caracterizados por una intensidad variable y periodos cortos de descanso (Espasa-Labrador et al., 2023; Espasa-Labrador et al., 2021). Su aplicación permite comparar la carga entre los cuatro cuartos, entre mitades del juego (Q1-Q2 frente a Q3-Q4) y entre posiciones, así como examinar la influencia del marcador (Sanders et al., 2021; Yang, 2024).

Por otra parte, el RPE es un método ampliamente utilizado para cuantificar la carga subjetiva del entrenamiento, considerado válido y confiable tanto en deportes individuales como de conjunto (Clemente et al., 2019; Capdevila et al., 2024). Es una de las herramientas más sencillas y accesibles para estimar el efecto de la carga, permitiendo diferenciar el esfuerzo entre situaciones y entre jugadores; de hecho, existe una variante ampliamente difundida conocida como s-RPE (Power et al., 2022). En basquetbol semiprofesional, el RPE ha mostrado además sensibilidad a las demandas fisiológicas y emocionales asociadas a distintas tareas de juego (Camacho-Sánchez et al., 2023).

En cuanto a la intensidad, se ha reportado que durante el 19.3% del tiempo total de juego los atletas se encuentran por encima del 95% de su FC (zona de intensidad máxima) y durante el 56% del tiempo entre el 85-94% de la FC (zona 4, intensidad alta) (Mancha-Triguero et al., 2020). La tendencia reciente en el baloncesto es que las posiciones se asemejan cada vez más entre sí —por ejemplo, los pivotes realizan acciones antes reservadas a los exteriores— (Russell et al., 2021), por lo que las demandas físicas y fisiológicas podrían ser similares entre posiciones, habitualmente agrupadas en interiores y exteriores o en bases, aleros y postes (Svilar et al., 2018). Aun así, no está claro cuál es el periodo de mayor carga ni si existe relación con el marcador (Yang, 2024).

El TRIMP y la Percepción Subjetiva del Esfuerzo (RPE) constituyen las medidas más utilizadas para cuantificar la carga interna en basquetbol (Manzi et al., 2010; Scanlan et al., 2012b). No obstante, la relación entre ambos indicadores no es uniforme y podría estar mediada por factores contextuales como la posición de juego o el resultado del partido (McLaren et al., 2018). Esta potencial disociación entre la respuesta fisiológica y perceptual tiene implicaciones directas para la prescripción de cargas (García et al., 2020). Sin embargo, la mayoría de los estudios han abordado estas variables de forma univariada, limitando la comprensión de las interrelaciones entre los indicadores de carga interna.

Desde la perspectiva analítica, los enfoques multivariados ofrecen ventajas significativas sobre los univariados al considerar simultáneamente la interrelación entre múltiples variables (Hair et al., 2019). Ante esta limitación, el presente trabajo articula varias técnicas complementarias en un único marco analítico. El Análisis de Componentes Principales (PCA) permite reducir la dimensionalidad de los datos e identificar los patrones latentes de carga interna (Weaving et al., 2014). Los Modelos Lineales Mixtos

(LMM) constituyen la herramienta más apropiada para datos con medidas repetidas y diseños desbalanceados, al incorporar la variabilidad inter-individual como efecto aleatorio (Bates et al., 2015). Adicionalmente, el sistema Mahalanobis-Taguchi (MTS) desarrollado en la ingeniería de calidad para clasificar patrones multivariados y seleccionar las variables más informativas mediante distancias de Mahalanobis y razones señal-ruido (Taguchi & Jugulum, 2002) ofrece una vía para identificar qué indicadores de carga discriminan mejor entre contextos competitivos (por ejemplo, partidos ganados frente a perdidos). Su aplicación en ciencias del deporte es prácticamente inédita, lo que motiva su incorporación en este estudio como complemento al PCA y a los LMM.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar la carga interna en basquetbol universitario mexicano mediante un enfoque multivariado integrado que combina, de manera articulada, análisis de componentes principales, modelos lineales mixtos, sistema Mahalanobis-Taguchi y concordancia Bland-Altman, evaluando las diferencias por posición de juego (base, alero, poste), periodo del partido y resultado del partido (ganado/perdido), así como la concordancia entre indicadores fisiológicos (TRIMP) y perceptuales (RPE) según la posición de juego.

Método

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de alcance correlacional-explicativo. Se empleó un diseño observacional, longitudinal y de medidas repetidas. Se registraron datos de 22 partidos oficiales de la temporada. De un total de 374 registros jugador-partido, se incluyeron únicamente las observaciones en las que el jugador participó en los cuatro cuartos del partido con registro completo de frecuencia cardíaca y reporte de RPE post-partido, resultando en 236 observaciones válidas (bases: 59; aleros: 81; postes: 96). Se excluyeron 138 registros correspondientes a jugadores que no completaron los cuatro periodos, principalmente por decisiones tácticas del cuerpo técnico (rotaciones) y por normativa de la competencia. El número de observaciones por jugador osciló entre 4 y 22 (mediana = 15), configurando un diseño naturalmente desbalanceado que reflejaba las condiciones reales de participación en el basquetbol universitario, donde no todos los jugadores eran alineados en todos los partidos ni permanecían en cancha los cuatro periodos completos. La selección de modelos lineales mixtos como técnica analítica principal se justifica, en parte, por su capacidad para manejar diseños desbalanceados sin necesidad de eliminar observaciones ni imputar datos faltantes (Bates et al., 2015).

Consideraciones éticas

El estudio se desarrolló conforme a los principios éticos de la Declaración de Helsinki para la investigación con seres humanos. Por tratarse de una investigación observacional y no invasiva limitada al registro de la frecuencia cardíaca mediante dispositivos comerciales de uso rutinario en el equipo y a la aplicación de una escala de percepción subjetiva del esfuerzo, sin intervención experimental ni modificación de la rutina de entrenamiento o competición, el estudio no implicó riesgos para los participantes. Antes de su inclusión, todos los participantes fueron informados de forma detallada acerca de los objetivos, los procedimientos y el uso de los datos, y otorgaron su consentimiento informado por escrito de manera voluntaria, pudiendo retirarse en cualquier momento sin consecuencia alguna. Se garantizó en todo momento la confidencialidad y el anonimato de los datos, tratados de forma agregada y con fines exclusivamente científicos.

Participantes

Participaron 17 jugadores masculinos (edad: 21.4 ± 1.77 años; peso: 81.4 ± 9.2 kg; estatura: 1.85 ± 0.06 m; bases, $n = 4$; aleros, $n = 6$; postes, $n = 7$) del equipo representativo de basquetbol de una universidad, participantes en una liga universitaria nacional de primera división durante la temporada 2024–2025 (Tabla 1). Los participantes contaban con una experiencia competitiva promedio de 1.7 años en el equipo representativo y procedían de categorías formativas previas participando con los selectivos de sus estados. Los criterios de inclusión fueron: ser jugador activo del equipo representativo, participar en al menos 3 partidos oficiales durante la temporada y no presentar lesiones que limitaran su participación. La liga universitaria únicamente permite 18 jugadores dentro del roster general de cada equipo, es por eso que en el estudio se incluyeron únicamente 17 sujetos de estudio.



Tabla 1. Características descriptivas individuales de la muestra.

Sujeto	Posición	Edad (años)	Estatura (m)	Peso (kg)
1	Alero	21	1.80	78.0
2	Poste	23	1.88	88.4
3	Alero	20	1.85	72.3
4	Poste	23	1.93	87.0
5	Alero	20	1.76	71.0
6	Base	19	1.77	78.1
7	Base	21	1.82	76.9
8	Alero	20	1.84	75.8
9	Alero	20	1.97	103.0
10	Poste	20	1.91	73.7
11	Poste	23	1.83	81.0
12	Poste	25	1.88	90.3
13	Poste	20	1.94	92.0
14	Base	23	1.76	70.1
15	Base	22	1.79	72.8
16	Alero	20	1.85	82.9
17	Poste	24	1.90	92.0
Media $\pm$ DE		21.4 $\pm$ 1.77	1.85 $\pm$ 0.06	81.4 $\pm$ 9.2

Nota: DE: desviación estándar; m: metros; kg: kilogramos.

Variables e instrumentos

La carga interna fisiológica se cuantificó mediante el TRIMP, calculado a partir de la frecuencia cardiaca registrada con monitores Polar Team Pro (Polar Electro, Kempele, Finlandia). En todos los casos el TRIMP se calculó exclusivamente mediante el método de Edwards (suma ponderada del tiempo acumulado en cinco zonas de intensidad de la FC máxima); no se emplearon las variantes de Lucia ni de Banister. El TRIMP se calculó de forma independiente para cada cuarto del partido (TRIMP_Q1, TRIMP_Q2, TRIMP_Q3, TRIMP_Q4) y de forma global (TRIMP_G). La carga interna perceptual se evaluó mediante la escala de Percepción Subjetiva del Esfuerzo (RPE; escala CR-10 de Borg). Los jugadores estaban familiarizados con la escala mediante su uso rutinario durante la temporada. Se registró un único valor de RPE global por partido, obtenido individualmente y de forma aislada (sin influencia de los compañeros) a los 30 minutos de finalizado cada encuentro, conforme al procedimiento habitual para el RPE de sesión. El resultado del partido (ganado/perdido) se registró como variable contextual.

Análisis estadístico

El análisis se estructuró en cinco fases complementarias:

Fase 1 - Análisis de Componentes Principales (PCA): Se verificaron los supuestos mediante el índice KMO y el test de esfericidad de Bartlett. Se aplicó PCA con datos estandarizados sobre las variables TRIMP_Q1-Q4 y RPE (excluyendo TRIMP_G por multicolinealidad). Se empleó el criterio de Kaiser (eigenvalue > 1) para la retención de componentes.

Fase 2 - Modelos Lineales Mixtos (LMM): Se ajustó un LMM con TRIMP como variable dependiente, posición y cuarto como efectos fijos, y sujeto como intercepto aleatorio. Se evaluó la interacción posición por cuarto y se incorporó el resultado del partido como covariable. La significancia de los efectos se evaluó mediante pruebas de razón de verosimilitud (LRT). Se calculó la correlación intraclase (ICC) y se verificaron los supuestos mediante inspección gráfica y pruebas formales.

Fase 3 - Sistema Mahalanobis-Taguchi (MTS): Se definió el espacio de referencia con los partidos ganados y se calcularon las distancias de Mahalanobis normalizadas (MD/k) para los partidos perdidos. La selección de variables útiles se realizó mediante el análisis de ganancia basado en la razón señal-ruido (SNR) de Taguchi.

Fase 4 - Concordancia Bland-Altman: Se evaluó la concordancia entre TRIMP y RPE estandarizados mediante gráficos de Bland-Altman por posición, calculando el sesgo medio, los límites de concordancia al 95% y el test de proporcionalidad.

Fase 5 - Análisis de potencia: Se realizó un análisis de potencia post-hoc para el efecto de posición con 17 sujetos en 3 grupos. Todos los análisis se realizaron en R (v4.3), con un nivel de significancia de alfa = 0.05.



Resultados

Estadística Descriptiva

Tabla 2 presenta las medias y desviaciones estándar del TRIMP por cuarto y del RPE, desagregadas por posición de juego y por resultado del partido. En términos generales, el cuarto periodo (Q4) registró la mayor carga fisiológica media y los postes presentaron tanto el TRIMP global como el RPE medio más elevados. En los partidos perdidos la carga del cuarto periodo fue, en promedio, superior a la de los ganados.

Tabla 2. Estadística descriptiva

Grupo	n	TRIMP Q1	TRIMP Q2	TRIMP Q3	TRIMP Q4	TRIMP_G	RPE
Total (global)	236	44.8 ± 19.5	56.9 ± 20.0	50.8 ± 21.4	59.7 ± 24.5	53.0 ± 16.5	6.4 ± 1.8
Posición — Base	59	43.8 ± 20.6	55.5 ± 22.3	46.0 ± 20.5	57.7 ± 26.1	50.7 ± 17.7	5.9 ± 1.9
Posición — Alero	81	39.0 ± 17.7	52.8 ± 17.8	46.5 ± 18.7	54.8 ± 22.3	48.3 ± 13.7	5.8 ± 1.6
Posición — Poste	96	50.2 ± 18.9	61.3 ± 19.7	57.4 ± 22.5	65.0 ± 24.5	58.5 ± 16.5	7.1 ± 1.6
Resultado — Ganado	115	44.2 ± 18.6	56.2 ± 19.5	49.6 ± 20.1	56.3 ± 23.0	51.6 ± 15.7	6.3 ± 1.8
Resultado — Perdido	121	45.3 ± 20.4	57.6 ± 20.6	51.9 ± 22.6	62.8 ± 25.5	54.4 ± 17.2	6.4 ± 1.9

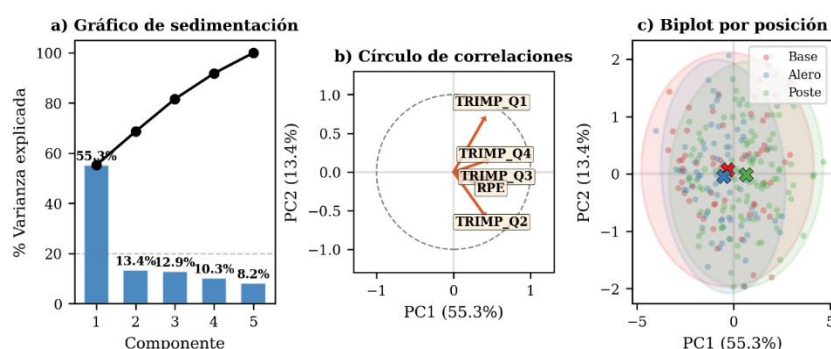
Nota. UA = unidades arbitrarias; RPE = escala CR-10 de Borg; DE = desviación estándar. Valores descriptivos crudos; pueden diferir ligeramente de las medias marginales estimadas por el modelo lineal mixto

Análisis de Componentes Principales

La adecuación muestral es verificada satisfactoriamente (KMO = 0.813; test de Bartlett: chi-cuadrado = 322.30, $p < .001$). El criterio de Kaiser determina la retención de un único componente principal (PC1), el cual explica el 55.28% de la varianza total (eigenvalue = 2.776). PC1 presenta cargas factoriales equilibradas para las cinco variables: TRIMP_Q3 (0.485), TRIMP_Q4 (0.469), TRIMP_Q2 (0.431), TRIMP_Q1 (0.429) y RPE (0.420), sugiriendo que la carga interna se comporta como un constructo unidimensional donde las respuestas fisiológicas y perceptuales covarían de manera consistente.

Las comparaciones de los scores de PC1 entre posiciones mediante la prueba de Kruskal-Wallis resultan significativas ($H = 24.09$, $p < .001$, eta-cuadrado = 0.106). Las comparaciones post-hoc con corrección de Bonferroni revelan diferencias significativas entre postes y aleros ($U = 2227$, $p < .001$, $r = 0.367$) y entre postes y bases ($U = 2019$, $p = .003$, $r = 0.241$), sin diferencias entre bases y aleros ($p = 0.458$).

Figura 1. Resultados del Análisis de Componentes Principales: gráfico de sedimentación (a), círculo de correlaciones (b) y biplot por posición de juego (c).



Nota: PC1 explica el 55.3% de la varianza total. Las elipses en el biplot representan intervalos de confianza del 95% por posición de juego. Las cruces indican el centroide de cada grupo.

Modelos Lineales Mixtos

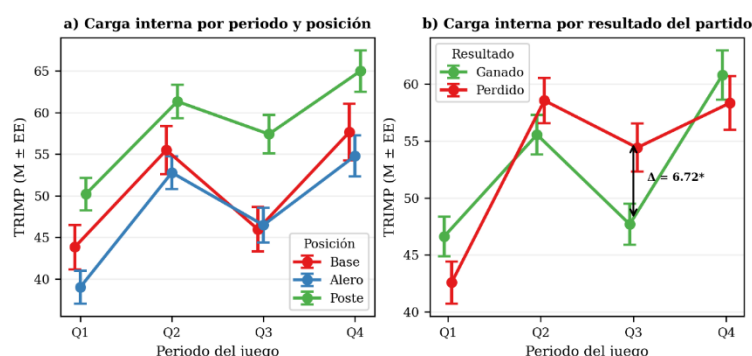
El LMM con intercepto aleatorio por jugador revela un efecto significativo del periodo de juego (chi-cuadrado = 95.31, $p < .001$), mientras que el efecto de posición (chi-cuadrado = 4.98, $p = .760$) y la interacción posición x periodo (chi-cuadrado = 2.80, $p = 0.833$) no alcanzan significancia estadística. La

ICC es de 0.326, indicando que el 32.6% de la variabilidad en TRIMP se atribuye a diferencias inter individuales.

Las comparaciones post-hoc entre periodos muestran que Q2 y Q4 presentan valores significativamente superiores a Q1 (Q1 vs Q2: +12.18, $p < .001$; Q1 vs Q4: +14.90, $p < .001$), configurando un patrón temporal de dientes de sierra. La incorporación del resultado del partido como covariable revela una interacción significativa Resultado x Periodo (chi-cuadrado = 10.83, $p = .013$). En los partidos ganados, la carga descende en Q3 ($M = 47.69$), mientras que en los perdidos se mantiene elevada ($M = 54.41$, diferencia = 6.72 unidades de TRIMP).

El análisis de potencia post-hoc indica una potencia de 0.19 para detectar el efecto de posición observado ($f = 0.344$) con 17 sujetos, por debajo del umbral convencional de 0.80. Se estima que un mínimo de 85 participantes sería necesario para lograr una potencia adecuada.

Figura 2. Carga interna (TRIMP) por periodo del partido según posición de juego (a) y resultado del partido (b)



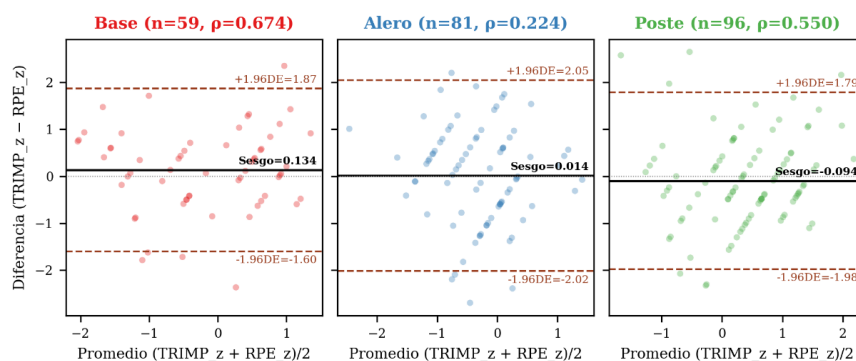
Nota: Los valores representan la media $\pm$ error estándar (EE). Δ indica la diferencia en unidades TRIMP entre partidos ganados y perdidos en Q3. $*p < .001$.

Disociación perceptual-fisiológica

El análisis del RPE como variable dependiente separada revela diferencias significativas entre posiciones (Kruskal-Wallis: $H = 31.98$, $p < .001$). Los postes reportan RPE superior ($Mdn = 7.5$) respecto a bases ($Mdn = 6.0$) y aleros ($Mdn = 6.0$), contrastando con la ausencia de diferencias significativas en TRIMP en el LMM.

El análisis de concordancia Bland-Altman entre TRIMP y RPE estandarizados muestra un sesgo medio cercano a cero (0.000 ± 0.971), con límites de concordancia al 95% de -1.902 a 1.902 y un 6.4% de observaciones fuera de estos límites. La concordancia varía sustancialmente entre posiciones: bases (LoA = 3.47; $\rho = 0.674$), postes (LoA = 3.77; $\rho = 0.550$) y aleros (LoA = 4.07; $\rho = 0.224$). No se detecta sesgo proporcional significativo en ninguna posición ($p > .05$).

Figura 3. Análisis de concordancia Bland-Altman entre TRIMP estandarizado y RPE estandarizado por posición de juego.



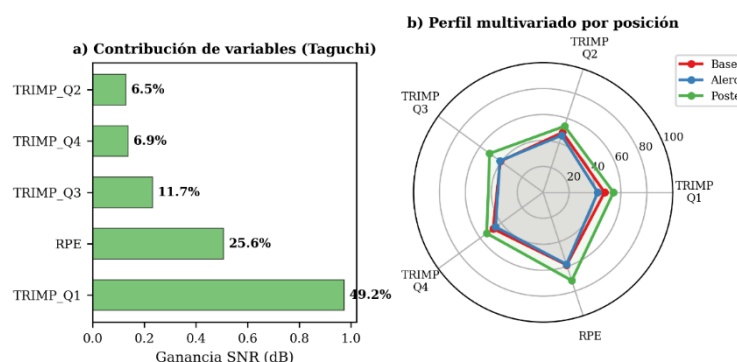
Nota: Las líneas discontinuas representan los límites de concordancia al 95% (± 1.96 DE). La línea continua indica el sesgo medio. ρ = coeficiente de correlación de Spearman entre TRIMP_z y RPE_z por posición.

Sistema Mahalanobis-Taguchi

La distancia de Mahalanobis normalizada no difiere significativamente entre partidos ganados ($MD/k = 0.992$) y perdidos ($MD/k = 0.999$; $U = 6531$, $p = 0.456$), confirmando que la magnitud global de la carga no constituye un factor diferenciador del resultado. Sin embargo, la diferencia de TRIMP entre Q4 y Q3 (Delta Q4-Q3) revela diferencias altamente significativas entre partidos ganados ($+13.11 \pm 24.23$) y perdidos ($+3.92 \pm 21.60$; $p < .001$).

El análisis de ganancia mediante SNR de Taguchi identifica al TRIMP del primer periodo (contribución = 45.2%) y al RPE (contribución = 23.6%) como las variables con mayor capacidad informativa. Las distancias cruzadas entre perfiles posicionales confirman que aleros y postes presentan los perfiles más distantes ($MD = 1.336$), mientras que bases y aleros son los más similares ($MD = 1.096$).

Figura 4. Sistema Mahalanobis-Taguchi: contribución de variables mediante análisis de ganancia SNR (a) y perfil multivariado de carga interna por posición de juego (b).



Nota: Los porcentajes en el panel (a) indican la contribución relativa de cada variable a la capacidad discriminativa del modelo. El perfil radar (b) refleja los valores medios por posición en las cinco variables de carga interna.

Discusión

El presente estudio integra, en un mismo marco analítico, PCA, LMM, MTS y análisis Bland-Altman para la cuantificación multivariada de la carga interna en basquetbol universitario. Los resultados revelan patrones que el análisis univariado convencional no podría identificar, con implicaciones directas para la individualización del entrenamiento.

La unidimensionalidad de la carga interna evidenciada por el PCA (un único componente que explica el 55.28% de la varianza) es consistente con hallazgos previos en deportes colectivos (McLaren et al., 2018; Weaving et al., 2014). Las cargas factoriales equilibradas entre el TRIMP por cuartos y el RPE sugieren que estas medidas capturan un mismo constructo latente, aunque los análisis subsecuentes revelan matices importantes en esta aparente homogeneidad.

El hallazgo más robusto del estudio es el efecto significativo del periodo de juego sobre la carga interna. El patrón de dientes de sierra (Figura 2; $Q1 < Q2 > Q3 < Q4$) replica parcialmente lo reportado por diversos autores (Ben Abdelkrim et al., 2007; Scanlan et al., 2012a) en cuanto a la mayor demanda de los periodos finales, pero aporta una descripción más detallada de la dinámica intra-partido. La disminución de la carga en Q3 respecto a Q2 podría explicarse por los ajustes tácticos del medio tiempo y un reinicio de la dinámica competitiva.

La interacción significativa resultado $\times$ periodo constituye un hallazgo novedoso. En los partidos ganados, los jugadores parecen disponer de una ventana de recuperación parcial en Q3, lo que les permitiría

optimizar su rendimiento en el periodo decisivo (Q4). En los partidos perdidos, la necesidad de mantener una intensidad sostenida genera una carga acumulada que podría comprometer el rendimiento posterior. Este hallazgo se ve reforzado por el análisis del MTS, donde la variable $\Delta Q4-Q3$ es la única que diferencia significativamente entre resultados ($p < .001$), sugiriendo que la capacidad de modular la intensidad entre periodos está asociada al rendimiento competitivo.

El valor de la correlación intraclase (ICC = 0.326) indica que el 32.6% de la variabilidad total en TRIMP se atribuye a diferencias entre jugadores, reflejando que las respuestas individuales a las demandas del partido son sustancialmente heterogéneas. Este hallazgo refuerza la necesidad de estrategias de monitoreo individualizadas, ya que un enfoque basado únicamente en promedios grupales podría enmascarar diferencias relevantes entre atletas. La heterogeneidad inter-individual observada es consistente con lo reportado por Petway et al. (2020) en contextos de basquetbol de distintos niveles competitivos.

Los resultados del PCA y del LMM ofrecieron conclusiones aparentemente contradictorias respecto al efecto de la posición. Mientras que el PCA identificó diferencias significativas entre posiciones ($H = 24.09$, $p < .001$), el LMM no las confirmó ($p = .760$). Esta discrepancia se explica por la pseudorreplicación: el PCA trató las 236 observaciones como unidades independientes, cuando en realidad provienen de solo 17 jugadores con mediciones repetidas. Al reducir la unidad de comparación efectiva a 4 bases, 6 aleros y 7 postes, la potencia para el efecto observado fue de 0.19 ($f = 0.344$). Esto sugiere que la ausencia de significancia en el LMM podría atribuirse a un error tipo II más que a una verdadera ausencia de diferencias entre posiciones.

La disociación perceptual-fisiológica según la posición constituye uno de los hallazgos más relevantes para la práctica profesional. El RPE difiere significativamente entre posiciones ($p < .001$), con los postes reportando mayor esfuerzo percibido, mientras que el TRIMP no difiere al controlar la variabilidad individual. Esta disociación, evidenciada además por la baja concordancia Bland-Altman en los aleros ($\rho = 0.224$), implica que utilizar exclusivamente el RPE para monitorear la carga de los aleros podría conducir a estimaciones imprecisas de su carga fisiológica real. Desde el punto de vista teórico, esta disociación es coherente con los modelos contemporáneos del esfuerzo percibido. El modelo psicobiológico interpreta el RPE como el resultado de la descarga subjetiva asociada al sentir del jugador, de modo que esfuerzos discontinuos y explosivos como los de los aleros pueden generar una percepción del esfuerzo no proporcional a la respuesta cardiovascular acumulada. Y en el caso de los postes, sus tareas dentro de la cancha suelen generar mayores choques y golpes propios de la competencia, que podrían generar una mayor percepción del esfuerzo.

La concordancia diferencial por posición observada en el análisis Bland-Altman con $\rho = 0.224$ para los aleros frente a $\rho = 0.674$ para los bases sugiere que el perfil de esfuerzo de cada posición modula la relación entre las respuestas fisiológica y perceptual. Los aleros, con un patrón de esfuerzos explosivos y discontinuos de alta intensidad, exhiben la menor concordancia, lo que podría vincularse con el fenómeno de disociación documentado en ejercicios de alta intensidad intermitente (McLaren et al., 2018). En contraste, los bases, con un perfil de mayor continuidad táctica, muestran la mayor concordancia. Estos hallazgos amplían la propuesta de García et al. (2020) y subrayan que la selección del indicador de monitoreo debe responder no solo al deporte, sino específicamente a las exigencias funcionales de cada posición.

La aplicación del Sistema Mahalanobis-Taguchi en ciencias del deporte constituye una contribución metodológica del presente estudio. Aunque la MD no logró discriminar entre partidos ganados y perdidos con las variables originales, el análisis de ganancia de Taguchi identificó al TRIMP_Q1 y al RPE como las variables más informativas, lo que contradice la intuición de que Q4 sería el indicador más determinante. Esta priorización tiene implicaciones aplicadas concretas: sugiere que la carga del arranque del partido (Q1) y la percepción global del esfuerzo concentran la mayor parte de la información discriminante, por lo que podrían ser indicador para una monitorización específica cuando los recursos tecnológicos son limitados. En términos del MTS, la utilidad del método no reside tanto en clasificar el resultado a partir de la magnitud de la carga —que no difirió entre ganados y perdidos— como en jerarquizar variables y detectar la variable dinámica ($\Delta Q4-Q3$) que sí discrimina el resultado, ofreciendo un criterio objetivo para reducir el conjunto de indicadores sin pérdida sustancial de información. Futuras aplicaciones podrían emplear el espacio de Mahalanobis como sistema de alerta temprana para identificar perfiles de carga atípicos a nivel individual.

En conjunto, la triangulación de métodos con supuestos distintos (PCA, LMM y MTS) fortalece la validez interna del estudio: la convergencia de resultados otorga robustez a los hallazgos, mientras que las divergencias —como la observada entre PCA y LMM respecto a la posición— aportan información valiosa sobre los riesgos de pseudorreplicación en diseños de medidas repetidas y desbalanceados (Bates et al., 2015).

El presente estudio presenta algunas limitaciones. El tamaño de muestra a nivel de sujeto ($n = 17$) limita la potencia estadística para detectar diferencias entre posiciones en el LMM, como confirma el análisis de potencia (0.19). Además, el TRIMP basado en frecuencia cardíaca podría no capturar completamente la carga mecánica asociada al juego de contacto característico de los postes. Asimismo, la naturaleza observacional del estudio impide establecer relaciones causales entre la distribución temporal de la carga y el resultado del partido, ya que factores no controlados como la calidad del rival, el sistema táctico o el contexto situacional podrían mediar en las relaciones observadas. El carácter ecológico del diseño, aunque limita la inferencia causal, garantiza la validez externa de los hallazgos. Futuros estudios con diseños experimentales o cuasiexperimentales, mayor tamaño muestral y la incorporación de indicadores de carga externa (acelerometría, distancia recorrida, número de acciones explosivas), cuya relación con los indicadores de carga interna ha sido documentada en revisiones sistemáticas recientes (Helwig et al., 2023), permitirán profundizar en los mecanismos subyacentes.

Conclusiones

El enfoque multivariado integrado reveló que: la carga interna en basquetbol universitario se comportó como un constructo unidimensional; el periodo del partido fue el factor dominante, con un patrón de dientes de sierra donde Q2 y Q4 representaron los periodos de mayor demanda; la distribución temporal de la carga, y no su magnitud, estuvo asociada al resultado competitivo; se observó una disociación perceptual fisiológica mediada por la posición de juego, con los aleros presentando la menor concordancia entre TRIMP y RPE y el TRIMP del primer periodo y el RPE fueron las variables más informativas según el análisis de Taguchi. Estos hallazgos subrayan la necesidad de adoptar enfoques multivariados en el monitoreo de la carga interna y de considerar la posición de juego al seleccionar indicadores de carga para la toma de decisiones en el entrenamiento.

Aplicaciones prácticas

Los resultados permiten formular recomendaciones para entrenadores y preparadores físicos. En primer lugar, conviene priorizar la monitorización de la carga en Q2 y Q4, identificados como los periodos de mayor demanda, programando en torno a ellos las estrategias de hidratación, rotaciones, tiempos fuera y pausas en los entrenamientos. En segundo lugar, la capacidad de reducir la carga en Q3 en los partidos ganados sugiere utilizar medios para reducir la intensidad en el tercer periodo como un indicador práctico de adaptación y gestión competitiva: una carga sostenidamente elevada en Q3 podría señalar dificultad para controlar el ritmo del partido. En tercer lugar, dado que los aleros muestran la menor concordancia entre TRIMP y RPE, se recomienda no estimar su carga únicamente a partir del RPE, sino complementarla con indicadores fisiológicos objetivos (FC/TRIMP); en cambio, en los bases el RPE resulta un sustituto más fiable de la carga fisiológica. En cuarto lugar, el TRIMP del primer periodo puede emplearse como indicador temprano de la dinámica de carga del encuentro, útil para anticipar ajustes. Finalmente, la incorporación de técnicas multivariadas (PCA, LMM y MTS) en los programas de monitoreo permite capturar patrones e individualizar la prescripción de la carga de un modo que los análisis univariados no permiten, incluso cuando se dispone de un número reducido de variables.

Agradecimientos

Se agradece a los jugadores integrantes del equipo representativo de basquetbol participante por su valiosa colaboración, así como a las autoridades deportivas y académicas de la institución por las facilidades brindadas para la realización de la investigación. (Datos identificativos omitidos para la revisión a ciegas.)



Financiación

Este estudio fue financiado mediante una beca doctoral otorgada por una agencia nacional de ciencia y tecnología (nombre omitido para la revisión a ciegas).

Afiliación de los autores

Alvaro Torres Correa, Universidad Autónoma de Nuevo León

Alejandra Flores Sánchez, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Josue Eduardo Nieto Serrano, Universidad Autónoma de Nuevo León

Zeltzin N. Alonso-Ramos, Universidad Autónoma de Nuevo León

Germán Hernández-Cruz, Universidad Autónoma de Nuevo León

Referencias

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Ben Abdelkrim, N., El Fazaa, S., & El Ati, J. (2007). Time-motion analysis and physiological data of elite under-19-year-old basketball players during competition. *British Journal of Sports Medicine*, 41(2), 69–75. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2006.032318>
- Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Gabbett, T. J., Coutts, A. J., Burgess, D. J., Gregson, W., & Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S2-161–S2-170. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2017-0208>
- Camacho-Sánchez, R., Pla, P., Serna, J., & Lavega-Burgués, P. (2023). Efecto de las tareas motrices en el comportamiento fisiológico y emocional de jugadores de baloncesto semiprofesional. *Retos*, 48, 1031–1039. <https://doi.org/10.47197/retos.v48.96321>
- Capdevila, L., Guillen, J., Lalanza, J., Zamora, V., Rodas, G., & Caparrós, T. (2024). Protocolo de VFC no invasivo y nuevo índice para evaluar la carga de entrenamiento interna durante el calentamiento de baloncesto. *Retos*, 54, 169–179. <https://doi.org/10.47197/retos.v54.102596>
- Clemente, F. M., Mendes, B., Brett, S. da G. T., Praça, G. M., Silvério, A., Carriço, S., & Duarte, E. (2019). Perceived training load, muscle soreness, stress, fatigue, and sleep quality in professional basketball: A full season study. *Journal of Human Kinetics*, 67, 199–207. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0002>
- Espasa-Labrador, J., Peña, J., Caparrós, T., Cook, M., & Fort-Vanmeerhaeghe, A. (2021). Relationship between internal and external load in elite female youth basketball players. *Apunts Sports Medicine*, 56(211), 100357. <https://doi.org/10.1016/j.apunsm.2021.100357>
- Espasa-Labrador, J., Fort-Vanmeerhaeghe, A., Montalvo, A. M., Carrasco-Marginet, M., Irurtia, A., & Calleja-González, J. (2023). Monitoring internal load in women's basketball via subjective and device-based methods: A systematic review. *Sensors*, 23(9), 4447. <https://doi.org/10.3390/s23094447>
- Fox, J. L., Stanton, R., & Scanlan, A. T. (2018). A comparison of training and competition demands in semi-professional male basketball players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 89(1), 103–111. <https://doi.org/10.1080/02701367.2017.1410693>
- García, F., Vázquez-Guerrero, J., Castellano, J., Casals, M., & Schelling, X. (2020). Differences in physical demands between game quarters and playing positions on professional basketball players during official competition. *Journal of Sports Science & Medicine*, 19(2), 256–263. <https://www.jssm.org/jssm-19-256.htm>

- Guedea-Delgado, J. C., Nájera Longoria, R. J., Zubiaur Ochoa, P., López Guillen, L. G., Carrasco Mendoza, M. M., Mar Sánchez, R., & Ramírez Félix, D. R. (2022). Percepción acerca de las funciones y el nivel de conocimiento general en entrenadores de basquetbol en México. *Revista Mexicana de Ciencias de la Cultura Física*, 1(2), 1–14. <https://doi.org/10.54167/rmccf.v1i2.970>
- Hair, J. F., Black, W. C., Anderson, R. E., & Babin, B. J. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Pearson.
- Helwig, J., Diels, J., Röhl, M., Mahler, H., Gollhofer, A., Roecker, K., & Willwacher, S. (2023). Relationships between external, wearable sensor-based, and internal parameters: A systematic review. *Sensors*, 23(2), 827. <https://doi.org/10.3390/s23020827>
- López, J. A. B., Martínez, S. G., Valero, A. F., & Cuartero, J. O. (2021). Cuantificación de la carga de entrenamiento y competición: Análisis comparativo por posiciones en un equipo de la Liga Española de Baloncesto Oro. *Retos*, 42, 882–890. <https://doi.org/10.47197/retos.v42i0.87268>
- Mancha-Triguero, D., García-Rubio, J., Antúnez, A., & Ibáñez, S. J. (2020). Physical and physiological profiles of aerobic and anaerobic capacities in young basketball players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1409. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041409>
- Manzi, V., D'Ottavio, S., Impellizzeri, F. M., Chaouachi, A., Chamari, K., & Castagna, C. (2010). Profile of weekly training load in elite male professional basketball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(5), 1399–1406. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d7552a>
- McLaren, S. J., Macpherson, T. W., Coutts, A. J., Hurst, C., Spears, I. R., & Weston, M. (2018). The relationships between internal and external measures of training load and intensity in team sports: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(3), 641–658. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0830-z>
- Petway, A. J., Freitas, T. T., Calleja-González, J., Medina Leal, D., & Alcaraz, P. E. (2020). Training load and match-play demands in basketball based on competition level: A systematic review. *PLoS ONE*, 15(3), e0229212. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229212>
- Power, C. J., Fox, J. L., Dalbo, V. J., & Scanlan, A. T. (2022). External and internal load variables encountered during training and games in female basketball players according to playing level and playing position: A systematic review. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 107. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00498-9>
- Russell, J. L., McLean, B. D., Stolp, S., Strack, D., & Coutts, A. J. (2021). Quantifying training and game demands of a National Basketball Association season. *Frontiers in Psychology*, 12, 793216. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.793216>
- Sanders, G. J., Boos, B., Rhodes, J., Kollock, R. O., & Peacock, C. A. (2021). Competition-based heart rate, training load, and time played above 85% peak heart rate in NCAA Division I women's basketball. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(4), 1095–1102. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002876>
- Scanlan, A. T., Dascombe, B. J., & Reaburn, P. R. J. (2012a). The construct and longitudinal validity of the basketball exercise simulation test. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(2), 523–530. https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2012/02000/the_construct_and_longitudinal_validity_of_the.28.aspx
- Scanlan, A. T., Dascombe, B. J., Reaburn, P., & Dalbo, V. J. (2012b). The physiological and activity demands experienced by Australian female basketball players during competition. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(4), 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.12.008>
- Stojanović, E., Stojiljković, N., Scanlan, A. T., Dalbo, V. J., Berkemans, D. M., & Milanović, Z. (2018). The activity demands and physiological responses encountered during basketball match-play: A systematic review. *Sports Medicine*, 48(1), 111–135. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0794-z>
- Svilar, L., Castellano, J., Jukic, I., & Casamichana, D. (2018). Positional differences in elite basketball: Selecting appropriate training-load measures. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(7), 947–952. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0534>
- Taguchi, G., & Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi strategy: A pattern technology system*. John Wiley & Sons.
- Weaving, D., Marshall, P., Earle, K., Nevill, A., & Abt, G. (2014). Combining internal- and external-training-load measures in professional rugby league. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 905–912. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0444>
- Yang, K. (2024). Quarterly fluctuations in external and internal loads among professional basketball players. *Frontiers in Physiology*, 15, 1419097. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1419097>



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

Alvaro Torres Correa
Alejandra Flores Sanchez
Josue Eduardo Nieto Serrano
Zeltzin N. Alonso-Ramos
Germán Hernández-Cruz

alvaro.torresc@uanl.edu.mx
alejandra.flores@uacj.mx
eduardo.nietosr@uanl.edu.mx
zeltzin.alonsorms@uanl.edu.mx
german.hernandezcrz@uanl.edu.mx

Autor/a
Autor/a
Autor/a
Autor/a
Autor/a