



# L'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques. Nou biomarcador no invasiu de l'acumulació d'esforç?

Lluc Montull<sup>1</sup> , Óscar Abenza<sup>2</sup> , Robert Hristovski<sup>3</sup>  i Natàlia Balagué<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport. Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Lleida (UdL), la Seu d'Urgell (Espanya).

<sup>2</sup> Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport. Facultat de Medicina, Universitat de Barcelona (UB) (Espanya).

<sup>3</sup> Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport. Facultat d'Educació Física, Esport i Salut, Universitat Sants Ciril i Metodí de Skopje (Macedònia).

<sup>4</sup> Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport. Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Barcelona (UB) (Espanya).

## Citació

Montull, L., Abenza, O., Hristovski, R. & Balagué, N. (2023). Hysteresis Area of Psychobiological Variables. A New Non-Invasive Biomarker of Effort Accumulation? *Apunts Educación Física y Deportes*, 152, 55-61. [https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2023/2\).152.06](https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2023/2).152.06)

## Editat per:

© Generalitat de Catalunya  
Departament de la Presidència  
Institut Nacional d'Educació  
Física de Catalunya (INEFC)

ISSN: 2014-0983

## \*Correspondència:

Natàlia Balagué  
[nbalague@gencat.cat](mailto:nbalague@gencat.cat)

## Secció:

Entrenament esportiu

## Idioma de l'original:

Anglès

## Rebut:

1 de juliol de 2022

## Acceptat:

10 de novembre de 2022

## Publicat:

1 d'abril de 2023

## Coberta:

Una jove velocista es prepara amb unes sèries en pista per treballar la seva explosivitat.  
@Jérôme Aufort/Adobestock

## Resum

L'àrea d'histèresi, que reflecteix la dependència dels paràmetres psicobiològics respecte als antecedents, s'ha suggerit recentment com a nou marcadore no invasiu de l'estrès i la tolerància en relació amb l'exercici. Tanmateix, encara no s'han explorat adequadament les seves prometedores aplicacions. L'objectiu d'aquest estudi és comprovar si l'àrea d'histèresi de l'esforç percebut (TEP), la freqüència cardíaca (FC) i la concentració d'oxihemoglobina muscular ( $O_2Hb$  muscular) són sensibles a l'acumulació d'esforç al llarg de sèries múltiples d'exercici de cursa. Deu estudiants d'Educació Física van fer cinc sèries consecutives de cursa a velocitat aeròbica màxima. Les sèries consecutives començaven quan els participants comunicaven almenys una  $TEP \leq 11$  (escala de 6 a 20 de Borg). Es van calcular les àrees d'histèresi de la TEP, la FC i l' $O_2Hb$  muscular per a cada sèrie i es va comparar la seva magnitud utilitzant la prova ANOVA de Friedman i la prova de Wilcoxon. Les mides de l'efecte es van calcular mitjançant la  $d$  de Cohen. Les àrees d'histèresi de totes les variables estudiades van canviar entre les sèries inicials i finals: la TEP i la FC van augmentar (entre les sèries 1-4):  $Z = -1.99, p = .04$ ;  $Z = -2.19, p = .03$ , respectivament), i l' $O_2Hb$  muscular va disminuir (entre les sèries 1-4:  $Z = -2.80, p < .01$ ). Es van observar efectes de mida gran ( $d = 1.22 - 1.81$ ) en la FC entre les sèries 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, i en l' $O_2Hb$  muscular entre les sèries 1-4 i 1-5. Els resultats van mostrar que les àrees d'histèresi de la TEP, la FC i l' $O_2Hb$  muscular eren sensibles a l'acumulació d'esforç durant exercicis repetits de cursa efectuats a velocitat aeròbica màxima. Si bé és necessari continuar investigant, l'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques apunta que és un biomarcador sensible per a la supervisió de la fatiga aguda.

**Paraules clau:** dependència dels antecedents, eficàcia de la recuperació, entrenament, fatiga, seguiment esportiu, sistemes adaptatius complexos.

## Introducció

En biologia, el fenomen de la histèresi es refereix a la dependència del sistema objecte d'estudi respecte als antecedents (és a dir, la dependència de la trajectòria), segell distintiu de la seva complexa naturalesa. Es caracteritza per una dinàmica autoorganitzada i no lineal (Hristovski et al., 2010, 2014) i, sovint, es passa per alt en la supervisió de l'exercici i la ciència de l'exercici (Balagué et al., 2020). Explica la manera en què el paràmetre estudiat torna al seu estat inicial amb cert retard després de veure's alterat i per què poden coexistir diversos estats d'aquest paràmetre per a un mateix valor quantitatiu. Per exemple, es pot observar el mateix valor de concentració d'àcid làctic en dos estats fisiològics diferents: durant l'exercici i en repòs (per exemple, durant la recuperació després de l'exercici). El fenomen es produeix perquè el sistema depèn dels seus antecedents; en conseqüència, les trajectòries de comportament majoritari de la variable estudiada són diferents quan el paràmetre de control s'està modificant sistemàticament en direccions oposades (Hristovski et al., 2014).

El fenomen de la histèresi de diversos paràmetres s'ha estudiat en diversos àmbits relacionats amb la salut, com ara la fisiologia (Liu et al., 2014), la biomecànica (Butler et al., 1978) i la medicina (Cabasson et al., 2012). Recentment, el comportament d'histèresi de les variables psicobiològiques s'ha proposat com a marcador no invasiu

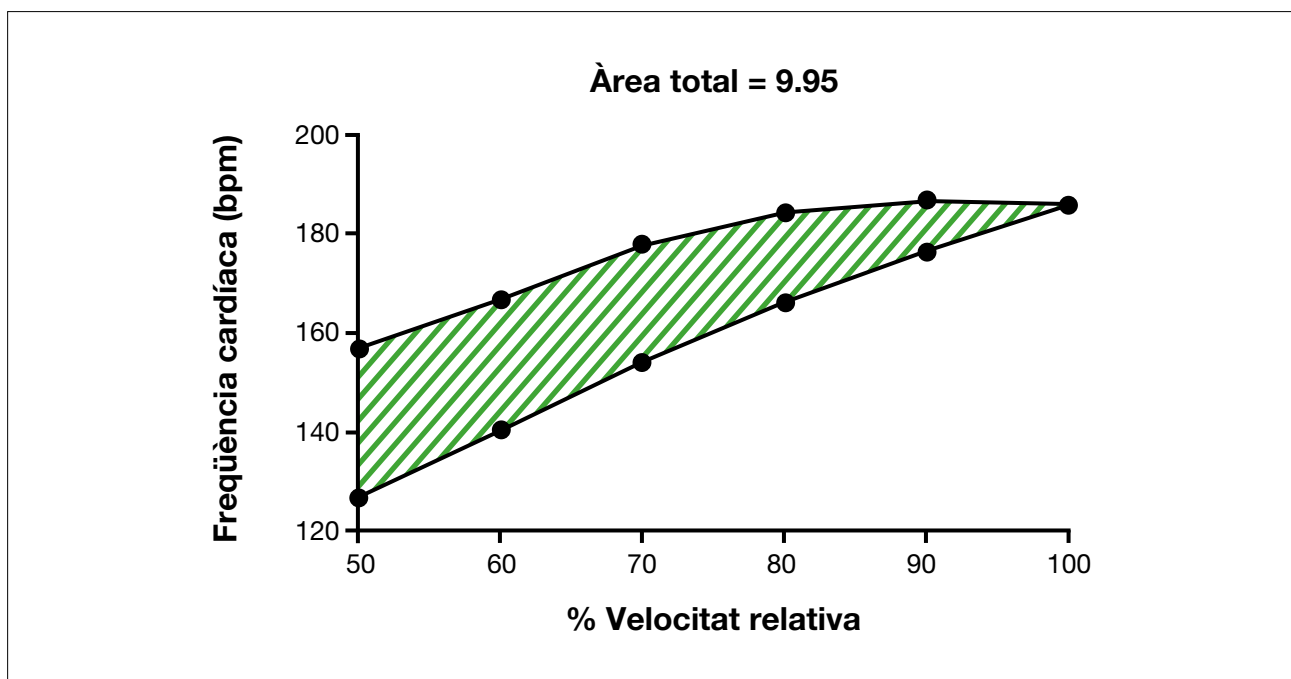
de l'estrès i la tolerància en relació amb la càrrega de treball de l'exercici (Montull et al., 2020) i s'ha aplicat per estudiar els efectes del desentrenament dels programes d'entrenament estandarditzats (Martín-Guillaumes et al., 2021). Tot i així, les seves aplicacions i possibilitats de supervisió encara no s'han explorat adequadament.

La histèresi d'una variable específica es pot quantificar a través de l'àrea d'histèresi, que reflecteix la quantitat d'energia dissipada després de la recuperació de la variable (Mayergoyz, 2003). La Figura 1 representa l'àrea d'histèresi corresponent a l'espai entre les fases creixent i decreixent d'un protocol d'esforç piramidal. Montull et al. (2020) van demostrar que una àrea d'histèresi més baixa que la taxa d'esforç percebut (TEP) i la freqüència cardíaca (FC) s'associa amb una perícia més gran de l'esportista i una eficàcia de recuperació superior. En conseqüència, els autors van suggerir que l'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques també pot ser sensible a l'acumulació d'esforç, que amb prou feines es capta a través de les tècniques d'anàlisi de dades i els protocols d'avaluació que s'apliquen habitualment avui dia (Halsón, 2014).

Considerant la fatiga un producte d'interaccions en xarxa multidimensionals, multiescalars i dependents de l'entorn, els valors quantitatius fixos de variables aïllades o els diversos indicadors atemporals que se solen proporcionar per definir-la podrien ser insuficients, i sovint imprecisos, per registrar-la

**Figura 1**

Exemple de freqüència cardíaca que mostra un efecte d'histèresi provocat per la velocitat relativa (paràmetre de control) creixent i, posteriorment, decreixent d'un exercici de cursa piramidal. Adaptat de Montull et al. (2020), amb permís.



(Balagué et al., 2020). Aquesta avaluació atemporal, basada en una concepció excessivament simplificada i distorsionada de l'organisme com un sistema adaptatiu complex (SAC), no té en compte la dinàmica no lineal i fluctuant del comportament dels esportistes ni la idiosincràsia de les seves respostes dinàmiques a l'exercici (Nesselroade i Molenaar, 2010). Per aquesta raó, el marc de la fisiologia en xarxa de l'exercici promou l'avaluació de propietats dels SAC tals com la histèresi i l'ús de l'anàlisi de sèries temporals individuals per avaluar els estats fisiològics (Balagué et al., 2020).

El desconeixement de la resposta d'histèresi en determinats tipus d'entrenament, com l'entrenament per intervals, pot portar a una prescripció inadequada de sèries d'exercici i temps de recuperació. Les sèries d'exercici solen basar-se en intensitats preestablertes i valors psicobiològics fixos (per exemple, la FC corresponent al llindar anaeròbic) i els temps de recuperació, en hipòtesis fixes basades en el metabolisme (per exemple, el sistema de fosfagen tarda de 2 a 5 min a recarregar-se) (Wilmore et al., 2008).

Queda molt per conèixer sobre la resposta d'histèresi a l'exercici. Tan sols s'han estudiat la TEP, la FC i algunes variables relacionades que s'han analitzat per a la detecció de malalties cardiovasculars (Cabasson et al., 2012). L'àrea d'histèresi de la saturació d'oxigen muscular ( $O_2Hb$  muscular) (Hamaoka et al., 2011) podria llançar llum sobre la manera en què els SAC compensen a escala microscòpica l'augment de la demanda que comporta l'acumulació d'esforç.

En vista del que s'ha exposat, l'objectiu d'aquest estudi era comprovar la sensibilitat de l'àrea d'histèresi de la TEP, la FC i l' $O_2Hb$  muscular a l'acumulació d'esforç durant sèries múltiples d'exercici de cursa. La hipòtesi és que les àrees de la TEP i la FC augmentaran al llarg de les sèries, mentre que les àrees de l' $O_2Hb$  muscular disminuiran, ja que l'esforç acumulat redueix la saturació d'oxigen.

## Metodologia

### Participants

L'estudi va comptar amb la participació voluntària de deu estudiants de Ciències de l'Esport (cinc homes i cinc dones:  $20.50 \pm 2.22$  anys;  $1.74 \pm 0.08$  m;  $64.25 \pm 11.57$  kg), que feien exercici entre cinc i vuit hores/setmana i portaven una vida saludable i activa. Per determinar la mida de la mostra, es va utilitzar una mida de l'efecte gran  $\rho = 1$ ,  $\alpha = .05$  i potència  $(1-\beta) = .85$ . Es van explicar tots els procediments experimentals als participants abans que donessin el seu consentiment per escrit per

participar-hi. L'experiment va ser aprovat pel Comitè d'ètica de recerques clíniques de l'Administració esportiva de Catalunya (072015CEICEGC) i es va dur a terme d'acord amb la Declaració de Hèlsinki.

### Protocols d'assaig

#### *Prova de velocitat aeròbica màxima (VAM)*

Es va fer una prova de càrrega creixent i màxima en cinta rodadora (h/p Cosmos Pulsar 3p®) per obtenir la VAM de cada participant. La prova va començar a 8 km/h per als homes i a 6 km/h per a les dones, i la velocitat es va incrementar en 1 km/h cada 100 s fins que no van poder mantenir la velocitat imposada. La velocitat final mantinguda al llarg dels 100 s es va considerar la VAM. Aquesta prova també es va utilitzar per familiaritzar els participants amb l'escala de TEP de 6 a 20 de Borg.

#### *Prova de sèries múltiples*

Una setmana després de fer la prova de VAM, van realitzar la prova de sèries múltiples. Després d'un escalfament de 5 minuts a 8 km/h, els participants van fer cinc sèries consecutives de 100 s al 100% de la VAM (es recomanen entre 30 i 120 s per a les proves de capacitat anaeròbica làctica, Medbo i Tabata, 1993). Van descansar entre sèries fins que van registrar una TEP  $\leq 11$  (lleu) en una escala de 6 a 20 de Borg. Després de cada sèrie, van respondre a la pregunta següent: "Quin és el teu esforç percebut en aquest moment?". Es va col·locar l'escala de TEP de 6 a 20 de Borg en un lloc visible.

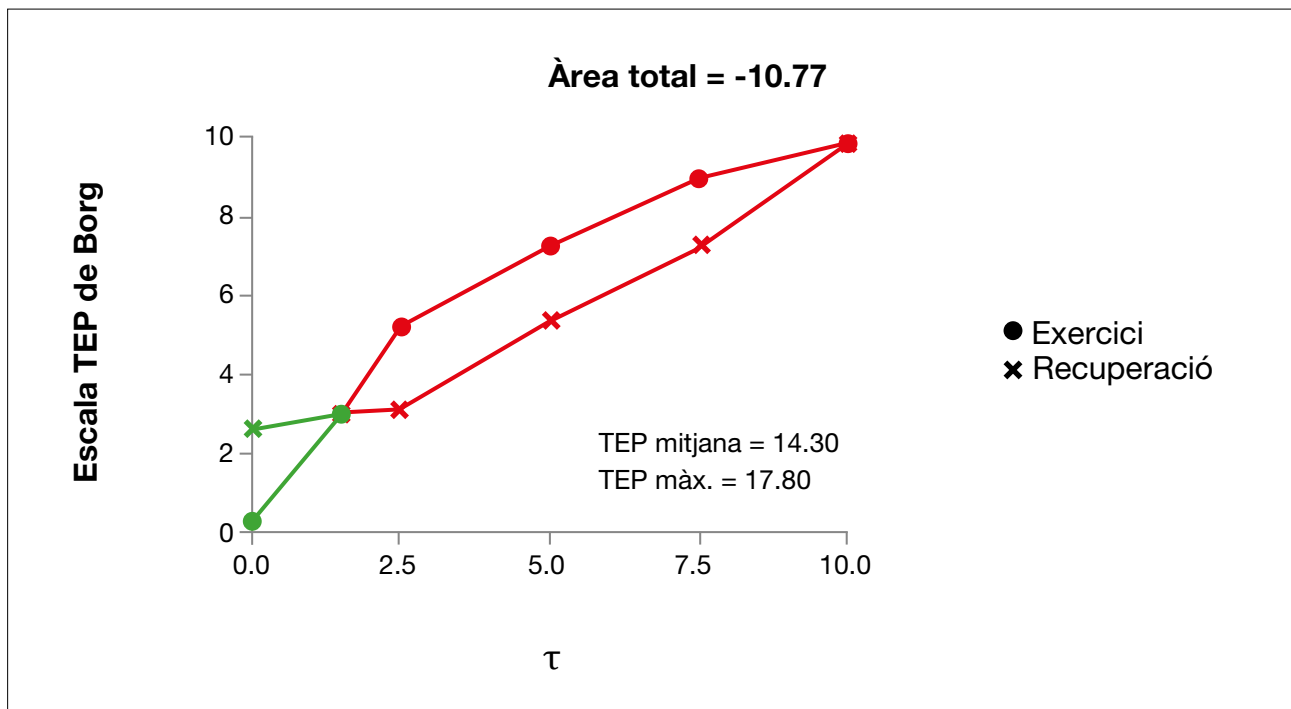
Per evitar manipulacions dels períodes de recuperació, no es va informar els participants del nombre de sèries que havien de fer. Durant la prova, no podien parlar. Al final, se'ls va preguntar per les seves sensacions i podien fer preguntes.

### Obtenció de dades

Durant l'exercici, es van supervisar contínuament la FC (Polar Electro Oy, Finlàndia) i l' $O_2Hb$  muscular (PortaMon, Artinis, Medical System), perquè és una de les variables més directes de la saturació d'oxigen als músculs (McManus et al., 2018). En el vast extern del quàdriceps dels participants, es va col·locar el PortaMon (dispositiu d'espectroscòpia de freqüències properes a l'infraroig), que registra a una freqüència de mostratge de 10 Hz (McManus et al., 2018). Els valors es van recollir cada 25 s, al mateix temps que es registrava la TEP.

**Figura 2**

Exemple d'una àrea d'histèresi total (suma de l'àrea "verda" positiva i de l'àrea "vermella" negativa) de la taxa d'esforç percebuda (TEP) reescalada en funció del temps en o fora de la tasca ( $\tau$ ) (0 = inicial, 10 = màxim). Correspon a un participant fent la primera sèrie a la velocitat aeròbica màxima durant 100 s (temps en la tasca) i descansant 100 s més (temps fora de la tasca). També s'inclouen els valors TPE mitjans i màxims (a l'escala de 6 a 20 esmentada al principi).



## Anàlisi de les dades

### Càlcul de les àrees d'histèresi

Les àrees d'histèresi de les variables psicobiològiques estudiades es van calcular segons Montull et al. (2020). Es va tenir en compte l'espai entre les fases d'exercici i recuperació per a cada variable i sèrie. Atès que la càrrega de treball era constant en totes les sèries d'exercici i nul·la durant la recuperació, el paràmetre de control seleccionat va ser la durada de l'esforç-recuperació ( $\tau$ ). Corresponia al temps actual d'exercici o recuperació dividit entre el temps total d'exercici (100 s). Les variables estudiades i la  $\tau$  es van normalitzar de 0 a 10 per relativitzar-les en la mateixa escala abans de calcular les àrees. Calculem l'àrea d'histèresi total com la suma de les àrees parcials positives i negatives. Les àrees es van considerar positives quan els valors de la fase de recuperació eren superiors als de la fase d'exercici, mentre que es van considerar negatives quan els valors de la fase de recuperació eren inferiors als de la fase d'exercici (vegeu la Figura 2 a tall d'exemple). En cas que la fase de recuperació fos més llarga que la d'exercici, apliquem la mateixa lògica: fins que els valors de recuperació no fossin inferiors al valor inicial d'exercici, l'àrea no es va considerar negativa. Per a aquest càlcul, es va utilitzar Matlab R2020a.

### Anàlisi estadística

Després de demostrar una distribució no normal, es va aplicar la prova ANOVA de Friedman i, a continuació, la prova de Wilcoxon a fi de comparar les diferències de a) les àrees d'histèresi entre totes les sèries (per a cada variable), b) els valors inicials de les variables entre sèries consecutives, i c) les àrees d'histèresi entre les tres variables estudiades. També es va calcular la  $d$  de Cohen per a les àrees d'histèresi i els valors inicials de cada variable entre les sèries inicials (1-2) i finals (4-5). Segons les directrius de Cohen (1988),  $d \geq .2$ ,  $d \geq .5$  i  $d \geq .8$ , representen mides de l'efecte petites, intermèdies i grans, respectivament. El nivell de significació es va fixar en  $p \leq .05$  al llarg de tot l'estudi. Les anàlisis estadístiques es van fer amb SPSS v.15 (SPSS Inc., Chicago, EUA).

## Resultats

La Taula 1 mostra els valors de les àrees d'histèresi i els valors inicials de TEP, FC i  $O_2Hb$  muscular per a cada sèrie d'exercici. A més, il·lustra la manera en què el temps de recuperació en repòs entre sèries va augmentar amb l'acumulació de l'esforç. La Taula 2 mostra les mides de l'efecte i les diferències significatives en les àrees d'histèresi i els valors inicials de TEP, FC i  $O_2Hb$  muscular entre les sèries inicials i finals.

**Taula 1**

Valors de mitjana i interquartil de les àrees d'histèresi totals (suma d'àrees positives i negatives) i valors inicials de la taxa d'esforç percebut (TEP), freqüència cardíaca (FC) i oxihemoglobina muscular ( $O_2Hb$ ) per a les cinc sèries consecutives. També s'inclouen la mitjana i l'interquartil del temps de recuperació entre sèries.

Sèries	TEP		FC		$O_2Hb$ muscular		Temps de recuperació (s)
	Àrees	Valors inicials (de 6 a 20)	Àrees	Valors inicials (bpm)	Àrees	Valors inicials ( $\mu\text{mol}$ )	
1	-16.1 (18.07)	7.5 (1.75)	-25.42 (28.55)	147 (4.5)	58.44 (6.95)	7.11 (19)	87.5 (25)
2	-15.07 (33.2)	10.75 (1)	-11.06 (18.1)	136 (29)	43.85 (11.45)	21.44 (29.32)	100 (43.75)
3	-8.07 (35.6)	11 (0)	-3.06 (23.41)	131.5 (16.75)	47.54 (28.07)	20.05 (27.51)	112.5 (62.5)
4	0.6 (27.2)	11 (0)	8.43 (11.3)	141.5 (23.5)	38.48 (15.24)	20.26 (21.81)	125 (68.75)
5	4.5 (33.71)	11 (0)	15.63 (8.89)	132 (14.5)	43.81 (17.62)	22.85 (22.46)	125 (87.5)

Nota: Les àrees representen el comportament d'histèresi calculat entre les fases d'exercici i recuperació. Els valors inicials són els recollits al principi de les sèries.

**Taula 2**

Diferències en les àrees d'histèresi entre les sèries inicials i finals i els valors inicials de taxa d'esforç percebut (TEP), freqüència cardíaca (FC) i oxihemoglobina ( $O_2Hb$ ) muscular. La *d* de Cohen es representa en valors, mentre que es marquen les diferències significatives a partir de la prova de Wilcoxon (\* $p < .05$ ).

		Sèries 1-4	Sèries 1-5	Sèries 2-4	Sèries 2-5
TEP	Àrees	0.68*	0.61	0.44	0.37
	Valors inicials	A partir de la sèrie 2, els participants havien de començar l'exercici quan $TEP \leq 11$			
FC	Àrees	1.37*	1.71*	1.25*	1.81*
	Valors inicials	0.67	1.06	0.26	0.03
$O_2Hb$ muscular	Àrees	1.52*	1.22*	0.36	0.19
	Valors inicials	0.16	0.48	0.01	0.32

Nota: Les àrees representen el comportament d'histèresi calculat entre les fases d'exercici i recuperació. Els valors inicials són els recollits al principi de les sèries.

Les àrees de FC van augmentar al llarg de les sèries ( $\chi^2 = 14.16$ ;  $p < .01$ ), i les àrees d' $O_2Hb$  muscular van disminuir ( $\chi^2 = 9.84$ ;  $p = .04$ ). Les diferències van ser significatives entre les sèries inicials (1 i 2) i finals (4 i 5): FC (1-4:  $Z = -2.19$ ,  $p = .03$ ; 2-4:  $Z = -2.09$ ,  $p = .04$ ; 1-5:  $Z = -2.29$ ,  $p = .02$ ; 2-5:  $Z = -2.60$ ,  $p < .01$ ) i  $O_2Hb$  muscular (1-4:  $Z = -2.80$ ,  $p < .01$ ; 1-5:  $Z = -2.19$ ,  $p = .03$ ). Tal com es mostra a la Taula 2, es van trobar mides de l'efecte grans ( $d = 1.22 - 1.81$ ) de les àrees d'histèresi en la FC entre les sèries 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, i en l' $O_2Hb$  muscular entre les sèries 1-4 i 1-5. La TEP només va augmentar entre les sèries 1 i 3 i la sèrie 4 ( $Z = -1.98$ ,  $p = .04$ ;  $Z = -1.99$ ,  $p = .04$ , respectivament), amb mides d'efecte petites i intermèdies entre les sèries inicials i finals.

Totes les àrees van mostrar un gran interquartil, així com grans diferències entre les variables ( $\chi^2 = 59.08$ ,  $p < .01$ ). Concretament, entre l' $O_2Hb$  muscular amb la FC ( $Z = -6.11$ ,  $p < .01$ ) i la TEP ( $Z = -6.00$ ,  $p < .01$ ).

D'altra banda, no hi va haver diferències significatives entre els valors inicials de sèries consecutives (vegeu les Taules 1 i 2). Només la TEP i l' $O_2Hb$  muscular van ser diferents entre les sèries 1 i 2 ( $Z = -2.35$ ,  $p = .02$ ;  $Z = -2.80$ ,  $p < .01$ , respectivament). Així mateix, es van observar mides de l'efecte petites i intermèdies entre les sèries inicials i finals dels esmentats valors inicials (excepte per a la FC entre les sèries 1 i 5).

**Discussió**

Aquest estudi, que avalua les àrees d'histèresi de la TEP, la FC i l' $O_2Hb$  muscular durant sèries repetides de curses, va descobrir un augment de les àrees de TEP i FC, i una disminució de les àrees d' $O_2Hb$  muscular, en les últimes sèries en comparació amb les primeres.

Les àrees d'histèresi d' $O_2Hb$  muscular van disminuir a mesura que s'acumulava l'esforç, la qual cosa reforça la



hipòtesi de l'àrea d'histèresi com a possible biomarcador de l'estrès i la tolerància a l'exercici (Montull et al., 2020). Això va il·lustrar les diferències entre càrrega interna i externa (es va mantenir la VAM en totes les sèries) en funció de l'acumulació d'esforç. Aquesta diferència també es va plasmar en l'augment del temps de recuperació al llarg de les sèries.

En contrast amb les àrees d'histèresi, els valors inicials de TEP, FC i O<sub>2</sub>Hb muscular abans de les sèries van ser bastant similars. Aquests resultats donen suport a la hipòtesi que els valors quantitius fixos de TEP, FC i O<sub>2</sub>Hb muscular no poden oferir prou fiabilitat com a indicadors de la càrrega interna (Montull et al., 2020, 2022).

La propietat de degeneració dels SAC (Edelman i Gally, 2001; Montull et al., 2020) podria explicar per què els participants van poder mantenir la mateixa velocitat al llarg de les sèries malgrat els efectes psicobiològics de l'acumulació d'esforç. S'han d'activar diferents sinergies psicobiològiques quan s'acumula l'esforç per compensar els efectes de la fatiga i complir l'objectiu de la tasca.

Segons els resultats, les sinergies psicobiològiques eren en gran manera individuals i contextuals. Les àrees d'histèresi de la TEP, la FC i l'O<sub>2</sub>Hb muscular van variar en gran manera al llarg de les sèries, tal com mostra la seva elevada dispersió estadística. Aquestes observacions donen suport a resultats previs que van estudiar la TEP i la FC (Montull et al., 2020) i les relacions no proporcionals observades entre càrregues internes i externes (Impellizzeri et al., 2019).

Malgrat que el temps de recuperació va augmentar a mesura que avançaven les sèries de cursa, també van augmentar les àrees d'histèresi de la TEP i la FC, que van passar de valors negatius a positius després de la tercera sèrie. Aquesta transició indica que els valors de TEP i de recuperació de la FC van ser superiors als de l'exercici fins que la TEP va descendir per sota d'11. Aquest fenomen il·lustra la imminent inestabilitat de les sinergies psicobiològiques (Hristovski et al., 2014), que es pot utilitzar com a senyal d'alerta prèvia (Scheffer et al., 2009) per ajudar a "pronosticar" l'esgotament i la desconnexió de la tasca provocats pels efectes de la fatiga aguda. En conseqüència, sembla possible captar els efectes esmentats i anticipar-s'hi utilitzant l'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques.

La supervisió de l'àrea d'histèresi també ha resultat útil per captar l'eficàcia de les intervencions d'entrenament (Martín-Guillaumes et al., 2021) i augmentar la precisió diagnòstica en cardiopaties (Zimarino et al., 2016). Així doncs, aquests resultats reforcen el seu potencial per a la supervisió d'intervencions esportives i mèdiques. En l'esport, pot ajudar a gestionar de manera més precisa la recuperació durant i després de l'exercici (Montull et al.,

2020). L'accés als valors instantanis de l'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques durant un entrenament per intervals pot permetre als esportistes i entrenadors controlar més adequadament les càrregues de treball de l'entrenament (freqüència, durada, intensitat, recuperació). Això va en línia amb propostes recents orientades a evitar temps d'exercici de treball/descans preestablerts (és a dir, receptes), i, en canvi, a fomentar una adaptació contínua de les càrregues de treball d'entrenament a l'evolució de l'estat de forma física dels esportistes i equips (Balagué et al., 2019, 2020; Pol et al., 2020).

Malgrat el seu potencial, és possible que l'àrea d'histèresi de les variables fisiològiques no proporcioni informació precisa sobre l'acumulació d'esforç. Les percepcions subjectives, capaces de comprimir informació múltiple de canals interoceptius i exteroceptius i, per tant, de reflectir la càrrega de treball interna de manera més integrada, podrien ser un bon complement per a la supervisió (Montull et al., 2022).

Aquest estudi va utilitzar únicament la TEP per controlar el temps de recuperació. Es justifica la realització de nous estudis que afegeixin altres variables com la FC per controlar el període de recuperació. També està justificada la realització de nous estudis sobre l'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques en poblacions amb diferents estats de salut i d'entrenament o forma física. Finalment, aquest estudi subratlla la importància de desenvolupar tecnologia amb capacitat per supervisar i avaluar la resposta d'histèresi durant l'exercici de manera instantània.

## Conclusions

Aquest estudi va demostrar la sensibilitat de l'àrea d'histèresi de la TEP, la FC i l'O<sub>2</sub>Hb muscular a l'acumulació d'esforç durant exercicis de cursa repetits efectuats a la VAM. L'àrea d'histèresi de les variables psicobiològiques i fisiològiques promet ser un nou biomarcador per controlar la fatiga aguda i avaluar els estats de salut i el rendiment.

## Referències

- Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, M., Garcia-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2020). Network physiology of exercise: Vision and perspectives. *Frontiers in Physiology*, 11, 1607. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.611550>
- Balagué, N., Pol, R., & Guerrero, I. (2019). Science or pseudoscience of physical activity and sport? *Apunts Educación Física y Deportes*, 136, 129-136. [http://dx.doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2019/2\).136.09](http://dx.doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2019/2).136.09)
- Butler, D., Grood, E., Noyes, F., & Zernicke, R. (1978). Biomechanics of ligaments and tendons. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 6, 125-181.
- Cabasson, A., Meste, O., Bailon, R., & Laguna, P. (2012). Validation of the PR-RR hysteresis phenomenon. *Computing in Cardiology*, 39, 597-600.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>

- Edelman, G. M., & Gally, J. A. (2001). Degeneracy and complexity in biological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(24), 13763–13768. <https://doi.org/10.1073/pnas.231499798>
- Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(S2), 139–147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Hamaoka, T., McCully, K. K., Niwayama, M., & Chance, B. (2011). The use of muscle near-infrared spectroscopy in sport, health and medical sciences: Recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1955), 4591–4604. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0298>
- Hristovski, R., Balagué, N., & Schöllhorn, W. (2014). Basic notions in the science of complex systems and nonlinear dynamics. In K. Davids, R. Hristovski, D. Araújo, N. Balague, C. Button, & P. Passos (Eds.), *Complex Systems in Sport* (1st ed., pp. 3–17). London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203134610>
- Hristovski, R., Venskaityte, E., Vainoras, A., Balagué, N., & Vazquez, P. (2010). Constraints-controlled metastable dynamics of exercise-induced psychobiological adaptation. *Medicina*, 46(7), 447–453. <https://doi.org/10.3390/medicina46070064>
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (2019). Internal and external training load: 15 years on. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 270–273. <https://doi.org/10.1123/ijpspp.2018-0935>
- Liu, Q., Yan, B. P., Yu, C. M., Zhang, Y. T., & Poon, C. C. Y. (2014). Attenuation of systolic blood pressure and pulse transit time hysteresis during exercise and recovery in cardiovascular patients. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(2), 346–352. <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2286998>
- Martín-Guillaumes, J., Montull, L., Ventura, J. L., Javierre, C., Aragonés, D., & Balagué, N. (2021). Response variability and detraining effects of standardized exercise programs. *Austin Sports Medicine*, 6(1):1048. <https://doi.org/10.26420/austinsportsmed.2021.1048>
- Mayergoyz, I. D. (2003). *Mathematical models of hysteresis and their applications*. *Electromagnetism* (2nd ed.). London: Academic Press.
- McManus, C. J., Collison, J., & Cooper, C. E. (2018). Performance comparison of the MOXY and PortaMon near-infrared spectroscopy muscle oximeters at rest and during exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 23(1), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.23.1.015007>
- Medbo, J. I., & Tabata, I. (1993). Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 75(4), 1654–1660. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.4.1654>
- Montull, L., Slapšinskaitė-Dackevičienė, A., Kiely, J., Hristovski, R., & Balagué, N. (2022). Integrative proposals of sports monitoring: Subjective outperforms objective monitoring. *Sports Medicine - Open*, 8(41). <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00432-z>
- Montull, L., Vázquez, P., Hristovski, R., & Balagué, N. (2020). Hysteresis behaviour of psychobiological variables during exercise. *Psychology of Sport and Exercise*, 48, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101647>
- Nesselroade, J. R., & Molenaar, P. C. (2010). Analyzing intra-person variation: Hybridizing the ACE model with P-technique factor analysis and the idiographic filter. *Behavior Genetics*, 40(6), 776–783. <https://doi.org/10.1007/s10519-010-9373-x>
- Pol, R., Balagué, N., Ric, A., Torrents, C., Kiely, J., & Hristovski, R. (2020). Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sport processes. *Sports Medicine - Open*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00256-9>
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
- Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L. (2008). *Physiology of sport and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Zimarino, M., Montebello, E., Radico, F., Gallina, S., Perfetti, M., Iachini Bellisarii, F., Severi, S., Limbruno, U., Emdin, M., & De Caterina, R. (2016). ST segment/heart rate hysteresis improves the diagnostic accuracy of ECG stress test for coronary artery disease in patients with left ventricular hypertrophy. *European Journal of Preventive Cardiology*, 23(15), 1632–1639. <https://doi.org/10.1177/2047487316655259>

**Conflicte d'interessos:** les autories no han comunicat cap conflicte d'interessos.



© Copyright Generalitat de Catalunya (INEFC). Aquest article està disponible a l'URL <https://www.revista-apunts.com/ca/>. Aquest treball està publicat sota una llicència Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. Les imatges o qualsevol altre material de tercers d'aquest article estan inclosos a la llicència Creative Commons de l'article, tret que s'indiqui el contrari a la línia de crèdit; si el material no s'inclou sota la llicència Creative Commons, els usuaris hauran d'obtenir el permís del titular de la llicència per reproduir el material. Per veure una còpia d'aquesta llicència, visiteu <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ca>