

# TEORÍA Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA SENSORIOMOTOR

## PROPIOCEPCIÓN Y CONTROL NEUROMUSCULAR: DEFINICIONES BÁSICAS:

**Propiocepción definición tradicional:** sensaciones cinestésicas y vestibulares. Nacen de la excitación de los mecanorreceptores localizados en la piel, cápsulas, ligamentos articulares, músculos, tendones y aparato vestibular. Es un proceso basado en la activación de estas organelas microscópicas que envían información aferente a múltiples niveles dentro del sistema nervioso central.

Toda esta información es decodificada y convertida en patrones organizados que posteriormente responderán a la demanda mecánica inducida sobre los segmentos corporales, proporcionando así una respuesta de control y activación muscular.

## QUÉ ES ESTRICTAMENTE PROPIOCEPCIÓN?

La propiocepción, estrictamente hablando, sólo se refiere a la información aferente procedente de los propioceptores que contribuye a las sensaciones conscientes e inconscientes del sentido muscular, el equilibrio postural y la estabilidad articular.

Por esta razón, todos los mecanismos de control intrínsecos propios del sistema nervioso que permiten el control del cuerpo quedan fuera de esta definición.

## UNA NUEVA DENOMINACIÓN?

En 1997 la Fundación para la Investigación y Educación en Medicina del Deporte estableció un nuevo consenso general para la denominación de estos procesos. Dada la dificultad para integrar las definiciones de propiocepción y control neuromuscular fue adoptado el término de *Sistema sensoriomotor* para representar la composición de los complejos sistemas fisiológicos neurosensores y neuromusculares, los cuales han sido frecuentemente simplificados e inapropiadamente descritos como propiocepción. (Lephart, 2000)

## QUÉ ES EL SISTEMA SENSORIOMOTOR?

El sistema sensoriomotor incorpora todas las señales aferentes, eferentes y los componentes de integración central y de procesamiento envueltos en el mantenimiento de la estabilidad articular funcional.

## ROL DE LOS MECANORRECEPTORES PERIFÉRICOS EN EL MODELO

Aunque las aferencias visuales y vestibulares contribuyen de alguna manera a la integración y decodificación de la información por parte del SNC, los mecanorreceptores periféricos son más importantes desde el punto de vista de la clínica ortopédica.

Los mecanorreceptores periféricos envían información aferente hacia los tres niveles de control motor: la médula espinal, el tallo cerebral y la corteza cerebral.

Cada centro de control motor :médula espinal, tallo cerebral, corteza cerebral y áreas asociadas :cerebelo y ganglios basales utilizan la información propioceptiva de manera diferente.

## UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN POR LOS CENTROS DE CONTROL MOTOR

La corteza somatosensora procesa la información propioceptiva para proveer consciencia de la posición articular (sensación de posición articular) y el movimiento articular (cinestesia).

Al nivel espinal, se integra y procesa la información propioceptiva inconsciente para producir activación muscular a través de reflejos monosinápticos y de conexiones neurales polisinápticas.

El tallo cerebral integra la información periférica propioceptiva con los centros vestibulares, visuales y otras aferencias somatosensoriales. El cerebelo, y las áreas asociadas como los ganglios basales, permiten monitorear, ajustar, secuenciar y anticipar acciones musculoesqueléticas.

## TEORÍAS QUE EXPLICAN LA FUNCIÓN DEL SISTEMA SENSORIOMOTOR

Se ha postulado que cada tipo de mecanorreceptor tiene sensibilidad a un solo estímulo y transmite señales individuales al sistema nervioso central para ser procesadas

También se ha sugerido que existen patrones más complejos de información aferente transmitida por poblaciones (grupos) de mecanorreceptores, es decir, estos últimos responden en grupo a un mismo estímulo (Bergenheim et al, 1996).

## THE FINAL COMMON INPUT

Se ha sugerido que los mecanorreceptores articulares poseen una capacidad limitada para iniciar reflejos a partir de la información de las alfa motoneuronas pues tienen umbrales de excitación demasiado altos y sólo pueden ser estimulados de manera adecuada bajo cargas fisiológicas demasiado altas (Grigg, 1994).

Los únicos receptores nerviosos que están en capacidad de generar dichas respuestas son los mecanorreceptores tendinosos y musculares.

Los husos neuromusculares y los mecanorreceptores tendinosos son a su vez altamente influenciados por la información emitida de los receptores articulares (Johansson; Sjolander y Sojka, 1990).

Los husos neuromusculares integran la información periférica aferente y transmiten una señal modificada final que es la responsable de regular la coordinación de los reflejos.

## TIPOS DE MECANORRECEPTORES PERIFÉRICOS

Dado que la articulación de la rodilla es la más estudiada a nivel propioceptivo, la clasificación que a continuación se presenta se basa en los estudios realizados en dicha articulación:

**Corpúsculos de Ruffini:** Se encuentran principalmente en la cápsula articular y son principalmente numerosos en las capas superficiales. Se pueden encontrar también en los ligamentos cruzados, en el ligamento meniscofemoral, en los ligamentos colaterales y en los meniscos (Johansson et al, 2000). Las terminaciones de Ruffini presentan un umbral bajo al estrés mecánico y son de adaptación lenta, por tanto, estas terminaciones envían información sobre la posición estática de la articulación, la presión intrarticular y la amplitud y velocidad de las rotaciones articulares.

**Corpúsculos de Pacini:** Se encuentran en las capas profundas de la cápsula articular, en los ligamentos cruzados, en el ligamento meniscofemoral, en los ligamentos

colaterales, en las almohadillas grasas intra y extrarticulares de la rodilla y en el menisco medial (Schutte et al, 1987). Son corpúsculos encapsulados de forma cónica y son ligeramente pequeños. Poseen un umbral bajo al estrés mecánico pero, al contrario de las terminaciones de Ruffini, se adaptan rápidamente; así, el corpúsculo de Pacini, es relativamente poco sensible en condiciones estáticas y cuando la articulación es rotada a rapidez constante, pero es muy sensitivo a la aceleración y a la desaceleración. De esta manera, estos corpúsculos se comportan como mecanorreceptores totalmente dinámicos.

**Receptores articulares como los del órgano tendinoso de Golgi:** Estas terminaciones han sido identificadas en los ligamentos cruzados, ligamentos colaterales y los meniscos (Johansson, et al, 2000). Son los más grandes de los mecanorreceptores articulares y son finamente encapsulados y fusiformes, lo que los hace parecer a sus homólogos tendinosos. Son de adaptación lenta, poseen altos umbrales de estimulación mecánica y son completamente inactivos cuando la articulación está inmóvil. Estos mecanorreceptores posiblemente se activan en rangos de movimiento extremos.

**Terminaciones nerviosas libres:** Están ampliamente distribuidas en la mayoría de las estructuras articulares. Pueden ser encontradas en la cápsula, los ligamentos cruzados y en los meniscos. (Hogervorst y Brand, 1998) La mayoría de estas terminaciones permanecen relativamente inactivas durante condiciones normales pero se vuelven activas cuando los tejidos articulares sufren daños o deformaciones mecánicas y cuando se exponen a ciertas sustancias pues un considerable número de ellas son quimiosensibles y se activan al exponerse a ciertos iones y a un sinnúmero de sustancias bioquímicas y mediadores inflamatorios tales como la serotonina, histamina, bradiquinina y prostaglandinas. (Grubb et al, 1991)

**Órganos tendinosos de Golgi.** Estos mecanorreceptores son sensibles a la deformación mecánica de los tendones donde se encuentran ubicados. Como los tendones son estructuras parecidas a un resorte, éstos son deformados por acción mecánica cuando la fuerza muscular aumenta, así los órganos tendinosos de Golgi parecen ser sensores de fuerza. Generalmente, el órgano tendinoso de Golgi actúa como un sensor de emergencia anunciando a la médula espinal sobre la presencia de fuerzas extremas que puedan dañar el complejo músculo – tendón, la cual a su vez envía mensajes inhibitorios al músculo activado.

**Receptores cutáneos.** La piel humana alberga receptores que son sensibles a diferentes modalidades :

- Termorreceptores sensibles a la temperatura
- Nociceptores sensibles al dolor y a daños potenciales

- Mecanorreceptores sensibles a la presión.
- Mecanorreceptores cutáneos: los corpúsculos de Meissner y los discos de Merkel que están localizados en la epidermis y la dermis.
- Terminaciones de Ruffini
- Corpúsculos de Pacini

Los discos de Merkel responden a la presión vertical pero no a desplazamientos laterales, los corpúsculos de Meissner son sensibles a los cambios rápidos de presión en áreas pequeñas de la piel, las terminaciones de Ruffini responden a la deformación de la piel y los corpúsculos de Pacini responden rápidamente a la deformación mecánica y la vibración.

**El huso neuromuscular.** El huso neuromuscular se encuentra dentro del músculo y tiene la capacidad de detectar los cambios en la longitud y rapidez de contracción de las fibras musculares. Los husos neuromusculares tienen forma elongada y están dispersos entre las fibras musculares en grandes cantidades.

## EL HUSO NEUROMUSCULAR: LA GRAN ESTRELLA

En el huso neuromuscular se distinguen dos tipos de fibras:

- **Fibras Intrafusales en bolsa**
- **Fibras intrafusales en cadena**

En ambos tipos de fibras se distinguen :

- **Las fibras nerviosas primarias (información dinámica)** inervan a todas las fibras intrafusales.
- **Las fibras nerviosas secundarias (información estática)** inervan exclusivamente a las fibras intrafusales en cadena.

## MECANISMO DE CONTROL AUTOMÁTICO DEL HUSO NEUROMUSCULAR (COACTIVACIÓN ALFA – GAMA)

El huso neuromuscular tiene la propiedad de recibir información de unas motoneuronas de menor tamaño llamadas motoneuronas gama. Estas motoneuronas inervan la parte estriada de las fibras intrafusales del huso neuromuscular localizada en los extremos del huso neuromuscular produciendo el estiramiento de la zona

central, lo cual desencadena el envío de mensajes por parte de las terminaciones primarias y secundarias terminando en la contracción de las fibras extrafusales.

## FUNCIÓN ESENCIAL DEL HUSO NEUROMUSCULAR

A excepción del huso neuromuscular, ninguno de los demás mecanorreceptores tiene la capacidad de ser modulado por el sistema nervioso central. Es así que el huso neuromuscular es la primera fuente sensorial para mantener el balance durante la postura erguida (Fitzpatrick y McCloskey, 1994)

El huso neuromuscular tendría la posibilidad potencial de ser modificado por el entrenamiento (Ashton – Miller et al, 2001)

La actividad del huso neuromuscular puede ser incrementada voluntariamente (Kakuda; Wessberg y Vallbo, 1997)

## LOS TRES NIVELES DEL CONTROL MOTOR

Se puede decir que las respuestas motoras generalmente se ubican en tres niveles de control motor: El nivel espinal o reflejo monosináptico para las respuestas motoras simples, las regiones bajas del cerebro o respuesta intermedia para reflejos más complicados y la corteza cerebral o control voluntario para el control de los movimientos altamente complicados.

**Espinal** :Es utilizado en circunstancias en las que se exige reactividad en respuesta a estímulos externos; estas respuestas son altamente estereotipadas y de rápida acción, es también llamado respuesta M1. Por ser de origen espinal es muy rápido pudiéndose dar dentro de 20 a 60 milisegundos después de la iniciación de un estímulo perturbador (Wojtys y Huston, 1994)

**Nivel de las regiones bajas del cerebro (tallo cerebral):** También llamado respuesta intermedia, reacción preprogramada o M2-M3, se activa bajo estímulos externos, la respuesta es automática pero no tan estereotipada como el reflejo espinal. Su activación puede darse en un lapso de tiempo de 130 a 170 milisegundos después de un acto perturbador y se compone de patrones de movimiento coordinados (Shultz y Perrin, 1999)

**Nivel de la corteza cerebral.** Es el nivel más alto de control motor y es allí donde la información procedente de los mecanorreceptores es decodificada e influenciada por la consciencia cognitiva para crear comandos motores para iniciar los movimientos

voluntarios. Su respuesta ocurre unos 220 a 360 milisegundos después de iniciado un acto perturbador (Blackburn y Voight, 1996)

## EVALUACIÓN DEL SISTEMA SENSORIOMOTOR

**Evaluación cinestésica:** La cinestesia es una submodalidad de la propiocepción asociada con la sensación de acción y es medida determinando el umbral de detección de acción pasiva con el uso de instrumentos isocinéticos sofisticados diseñados especialmente para este propósito

**Evaluación de la sensación de posición articular.** Es otra submodalidad de la propiocepción cuya medición consiste en la identificación de un ángulo articular estático por métodos de replicación

**Evaluación en estabilómetros** La somatosensación es un término usado para describir la integración funcional de los mecanismos de aferencias periféricas involucrados en el control postural y está directamente relacionada con el término balance que es el proceso de mantener el centro de gravedad dentro de la base de sustentación del cuerpo.

**Evaluaciones electromiográficas.** Además de estas formas de evaluación de la propiocepción, se ha utilizado la información electromiográfica que es la medición de la actividad eléctrica muscular para valorar los tiempos de respuesta neural a estímulos mecánicos, las características de la contracción muscular refleja a estímulos eléctricos y mecánicos y el análisis dinámico de la función neuromotora.

## ENTRENAMIENTO NEUROMUSCULAR

Es claro que es posible entrenar el sistema sensoriomotor para producir respuestas más rápidas y coordinadas a demandas de carga imprevistas sobre las articulaciones (Ashton – Miller, 2001)

## SISTEMAS DE PROTECCIÓN ARTICULAR

**Stiffness Muscular:** Es una primera línea de protección articular, independiente del nivel espinal, relacionada con el sistema de tono muscular inconsciente y regulado por el sistema de coactivación alfa-gama motoneurona.

El músculo actúa aisladamente por dos maneras: *rigidez pasiva* (propiedades elásticas del músculo ante la ausencia de contracción) y la *rigidez activa* que se evidencia

cuando el músculo es sometido a estiramiento y genera tensión incluso sin conexión neural (Massion, 2000)

### **Reflejos musculares:**

La segunda línea de defensa es el mecanismo de reflejo monosináptico o nivel espinal de control motor. En este sistema de protección, los elementos estrella son los ligamentos .

Los ligamentos, a través de sus sensores nerviosos envían información aferente que produce respuesta motora a diversos niveles de control del sistema nervioso central.

Aunque tales reflejos son en cierta manera insuficientes para proteger en determinados momentos una lesión ligamentaria debido a la rapidez con que esta ocurre, pueden convertirse en opción estabilizadora en movimientos mucho más lentos y, más aún, pueden ser el punto de partida para la creación de estrategias de control paraespinal que deben ser usados en las acciones más rápidas y que se tratarán a continuación.

### **Reacciones preprogramadas:**

Son un grupo de reacciones musculares más largas que los reflejos, las cuales son un poco más lentas en comparación con el reflejo monosináptico y proveen corrección de movimiento en un contexto específico en caso de perturbaciones externas no esperadas.

Estas reacciones tienen tanto características de reflejos como características de actos voluntarios y son llamadas reacciones preprogramadas, reflejos de latencia largos, reflejos de estiramiento funcionales, M2- M3 o reflejos transcorticales.

Son fuertemente influenciadas y dependientes de la instrucción que se le da al sujeto

Por esta razón, las reacciones preprogramadas no pueden ser consideradas reflejos pues no son dependientes totalmente de los cambios de longitud del músculo y pueden ser modificadas voluntariamente por el sujeto

Tales reacciones se pueden dar tanto en músculos que se estiran como en músculos que se acortan, es decir, no pertenecen al tipo de reflejo monosináptico dependiente del huso neuromuscular.



Estas reacciones no son dependientes ni se correlacionan con la amplitud de la perturbación, es decir, la respuesta de estas reacciones es definida antes que el estímulo suceda tomando como base para su desarrollo otros factores

La estimulación para que este tipo de reacciones se den pueden provenir de cualquier grupo de receptores periféricos y del sistema visual, auditivo y vestibular.

Por esta razón, no es descabellado pensar que los músculos pueden ser en cierta manera preactivados en anticipación a cargas articulares esperadas.

Las actividades previas de entrenamiento podrían entonces influir en el resultado final de un patrón motor y de los movimientos articulares de manera anticipada.

### **Creación de programas motores anticipatorios.**

Existen circunstancias extremas en las que el sistema neuromuscular es incapaz de reaccionar oportunamente ya que ocurren con extremada rapidez y se dan particularmente durante aterrizajes y cambios de dirección repentinos o combinadamente.

Estos programas automáticos se producirían a través del entrenamiento y provocarían respuestas de corto tiempo de menos de 30 milésimas de segundo en respuesta a situaciones externas reconocidas de manera anticipada por el SNC por intermedio de respuestas de feed – forward.

## **TIPOS DE ENTRENAMIENTO NEUROMUSCULAR**

- Ejercicios Tradicionales de fuerza en OKC y CKC
- Entrenamiento propioceptivo sobre superficies inestables
- Entrenamiento neuromuscular reactivo
- Entrenamiento pliométrico
- Entrenamiento de habilidades

## **ENTRENAMIENTO PROPIOCEPTIVO SOBRE SUPERFICIES INESTABLES**

Es utilizado para estimular al sistema sensoriomotor, de tal manera que tenga que producir respuestas motoras para proporcionar estabilidad articular a partir de los tres

niveles de protección neural. Se utilizan superficies inestables como espumas, rollos, plataformas y discos inestables.

## ENTRENAMIENTO NEUROMUSCULAR REACTIVO

Este tipo de entrenamiento, pretende demandar al sistema sensoriomotor oponiendo fuerzas de acción externas, las cuales, deben ser vencidas por el sujeto, es decir, quien lo practica, debe estar en la capacidad de orientarse en el espacio y estabilizar sus segmentos corporales contrarrestando las fuerzas externas aplicadas.

## ENTRENAMIENTO PLIOMÉTRICO

Es la utilización de acciones enérgicas y rápidas que implican una activación del ciclo estiramiento acortamiento para producir contracciones subsiguientes más fuertes. Este tipo de entrenamiento disminuye la cantidad de tiempo requerida para producir picos de fuerza.

## ENTRENAMIENTO DE HABILIDADES

Este tipo de entrenamiento incorpora elementos como conos y vallas con el fin de reproducir acciones específicas a las situaciones cotidianas o de juego en las que están implicadas maniobras como cambios de dirección, saltos repentinos, aceleraciones y desaceleraciones en patrones diferentes de carrera con el fin de programar comandos motores de preparación específica para situaciones potencialmente peligrosas que puedan afectar la integridad de las articulaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

ASHTON – MILLER, James A. et al. Can proprioception really be improved by exercises?. En: Knee Surgery, Sports traumatologie, arthroscopie. Vol. 9 (2001); p. 128-136

BERGENHEIM, M et al. Ensemble coding of muscle stretches in afferent populations containing different types of muscle afferents. Brain Res. Vol. 734 (1996); p. 157-166.

BLACKBURN, Turner y VOIGHT, Michael L. A matter of balance. Rehabilitation therapy. [www.orthopedictechreview.com/issues/mayjun01/pg30.htm](http://www.orthopedictechreview.com/issues/mayjun01/pg30.htm)

CALDERON MONTERO, F. J. Control nervioso del movimiento muscular. En: CHICHARRO LOPEZ, José y VAQUERO FERNÁNDEZ, Almudena. Fisiología del Ejercicio. Madrid: Panamericana, 1995. p. 46.

CLARK, F. J.; LANDGREN, S. y SILFVENIUS, H.. Projections to the cat's cerebral cortex from low threshold joint afferents. En: Acta Physiol Scand. Vol. 89 (1973); p. 504-521.

FITZPATRICK, R y MCCLOSKEY, DI. Stable human standing with lower – limb muscle afferents providing the only sensory input. En: Journal Physiol (Lond) Vol. 480 (1994); p. 173-186

GRIGG, P. Peripheral neural mechanisms in proprioception. J Sport Rehab Vol 3. (1994); p. 1-17

GRUBB, BD et al. The role of PGE2 in the sensitization of mechanorreceptors in normal and inflamed ankle joints of the rat. Exp Brain Res. Vol 84. (1991); p. 383-392.

HOGERVORST, Tom y BRAND, Richard A. Current concepts review – mechanoreceptors in joint function. Journal of bone and joint surgery. Vol 80. (1998); p. 1365-1378.

JHOHANSSON, Hakan et al. Peripheral afferents of the knee: their effects on central mechanisms regulating muscle stiffness, joint stability, and proprioception and coordination. En: LEPHART, Scott M y FU, Freddie H. Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign: Human Kinetics, 2000. p. 6.

JOHANSSON, H; SJOLANDER, P y SOJKA, P. Activity in receptor afferents from the anterior cruciate ligament evoke reflex on fusimotor neurons. Neurosci Res Vol 8. (1990); p. 54-59

KAKUDA, N.; WESSBERG, J. VALLBO, A.B. Is human muscle spindle afference dependent on perceived size of error in visual tracking?. En: Exp Brain Res. Vol. 114 (1997); p. 246-254

LATASH, Mark L. Neurophysiological basis of movement. Champaign: Human Kinetics, 1998. p. 36-37.

LEPHART, Scott M.; RIEMANN, Bryan L. y FU, Freddie H. Introduction to the sensorimotor system. En: LEPHART, Scott M. y FU, Freddie H. Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign: Human Kinetics, 2000. p. XVIII

MASSION, Jean. Cerebro y motricidad. Funciones sensoriomotrices. Barcelona: INDE, 2000. p. 27.

PERRIN, David H.; SHULTZ, Sandra J. Models for clinical research involving proprioception and neuromuscular control. En: LEPHART, Scott M. y FU, Freddie H. Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign: Human Kinetics, 2000. p. 350.

RIEMANN, Bryan L. y GUSKIEWICZ, Kevin M. Contribution of the peripheral somatosensory system to balance and postural equilibrium. En: LEPHART, Scott M; y FU, Freddie H. Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign: Human Kinetics, 2000. p. 46.

SCHUTTE, M. J. Et al. Neural anatomy of the human anterior cruciate ligament. J. Bone Joint Surg Am. Vol 69, No 2. (1987); p. 243-247.

SHULTZ, Sandra y PERRIN, David H. Using surface electromyography to assess sex differences in neuromuscular response characteristics. En: Journal of athletic training. Vol. 34, No. 2 (1999); p. 165-176

TSUDA, Eiichi. Direct evidence of the anterior cruciate ligament-hamstring reflex arc in humans. En: American journal of sports medicine. Vol. 29 (2001); p. 83-87

WOJTYS, Edward M. y HUSTON, Laura J. Neuromuscular performance in normal and anterior cruciate ligament – deficient lower extremities. En: The American journal of sports medicine. Vol. 22, No. 1 (1994); p. 89-104