

Los Movimientos Vertebrales Acoplados en la exploración clínica del paciente: certezas y dudas, más de cien años después

Christian Hamlin^{1*}, Fernando D'Andrea¹, Nicolás Vidal¹, Diamela Gómez^{2,3}, Esteban Buján¹, Hugo López¹, Lucas Abramo, Martín Fontenla¹, Fernando Lampe¹ & Luis Herrera¹

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Medicina. Escuela de Kinesiología y Fisiatría

²Universidad Nacional de la Matanza. Departamento de Ciencias de la Salud

³Universidad Favaloro. Facultad de Medicina

*Contacto: christianhamlin.osteopatia@gmail.com

Resumen: Los movimientos vertebrales acoplados (MVA) constituyen una propiedad inherente de la mecánica vertebral y han sido incorporados como parte integral de la evaluación y tratamiento en el ámbito de la terapia manual y la osteopatía. El acoplamiento vertebral ha adquirido relevancia clínica debido a que su alteración se ha asociado a diversas patologías de columna y, particularmente, a disfunciones a nivel del raquis. La literatura actual cuestiona ciertos supuestos propios a este modelo de movimiento sintetizados en las leyes de Fryette y, en consecuencia, al sistema de diagnóstico de lesiones segmentarias basado en estos principios. El propósito de este artículo es revisar la literatura concerniente a los MVA, incorporando los últimos trabajos en la materia que hacen uso de tecnología con alto nivel de precisión en la medición, describir con carácter exhaustivo las principales teorías de acople y analizar en forma comparativa los hallazgos más relevantes. A partir de una extensiva revisión no sistemática en distintas bases de datos académicas, con excepción del raquis cervical, no se encontró consenso respecto del comportamiento de acople que debería existir en los diferentes niveles vertebrales. La existencia de leyes que rigen el acoplamiento en extensos sectores del raquis no ha podido ser verificada empíricamente. Estos resultados sugieren que recurrir a los MVA para la elaboración de un diagnóstico sería una práctica inadecuada. Finalmente, en la presente revisión se discuten las implicancias que podrían tener el hallazgo de MVA consistentes entre los diversos

estudios en sectores localizados de la columna, y se delinean las posibles direcciones futuras que podría adoptar el uso de los MVA en la práctica clínica.

Palabras clave: Movimientos Vertebrales Acoplados, Leyes de Fryette, Biomecánica

Title: Coupled motion in the clinical examination of the patient: certainties and doubts, more than a hundred years later

Abstract: Coupling is an inherent property of vertebral mechanics incorporated as an integral part of the evaluation and treatment in the manual therapy and osteopathy field. Coupling motion has acquired clinical relevance, as its alteration was associated with various spinal pathologies, particularly spine dysfunctions. The current literature raises questions on several assumptions inherent to this model of movement synthesized in Fryette's laws and, consequently, on the diagnostic system of segmental lesions based on these principles. The purpose of this article is to review the literature concerning coupling motion, incorporating the latest works that use technology with high measurement accuracy. Secondly, to comprehensively describe the main coupling theories and analyze in a comparative way the most relevant findings. After an extensive non-systematic review of different academic databases, except for the cervical spine, consensus regarding the coupling behavior that should exist at the different vertebral levels was not found. The presence of laws governing coupling in large

sectors of the spine was not empirically verified. These results suggest that resorting to a vertebral coupling for a diagnosis would be an inadequate practice. Finally, the present review discusses the implications of consistent coupling findings across studies in localized areas of the

spine. Moreover, it outlines possible future directions for the application of coupling motion in clinical practice.

Keywords: Coupled motion, Fryette's laws, Biomechanics

Cuando en el año 1900 el médico del Harvard Medical School Robert Lovett comenzó una serie de investigaciones acerca de la mecánica de la columna y propuso que la inclinación lateral y la rotación del raquis forman parte de un movimiento conjunto indisociable, nunca imaginó que aquella afirmación sería catalizadora de los más variados estudios y foco de extensos debates a lo largo de todo el siguiente siglo. Si bien aquellas investigaciones pretendieron estudiar la columna normal para comprender la movilidad del raquis en la escoliosis, sus conceptos trascendieron ese campo específico y rápidamente pasaron a formar parte tanto del acervo de trabajos generales de biomecánica como de los más variados estudios de índole clínico. Pese a ello, aún hoy en día, a más de cien años de aquellos estudios clásicos de Lovett, la naturaleza y dirección de los movimientos acoplados de la columna se siguen discutiendo fervientemente en ámbitos científicos, académicos y en la práctica diaria del consultorio.

La biomecánica clínica ha sido definida como el cuerpo de conocimiento conformado por conceptos, principios y metodologías que se sustentan tanto en hechos o evidencias de tipo mecánica, así como en las ciencias matemáticas para interpretar y analizar la anatomía y fisiología

normal y anormal (White III & Panjabi, 1990). En ese sentido, la relevancia que se le ha atribuido a los movimientos de acople tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de disfunciones a nivel del raquis ha demandado que su estudio se desarrollara dentro del enfoque teórico y práctico que, al mismo tiempo, provee el campo de la biomecánica clínica.

El examen del raquis, estructura de naturaleza tridimensional y compleja, debe incluir el análisis biomecánico en múltiples planos de movimiento de los segmentos intervertebrales (Willems, Jull, & K-F Ng, 1996). Puesto que los movimientos vertebrales acoplados (a partir de aquí MVA) constituyen una propiedad inherente de la mecánica vertebral (Panjabi M., Yamamoto, Oxland, & Crisco, 1989), han sido incorporados por muchos autores como parte integral de la evaluación clínica. En especial, la terapia manual utiliza procedimientos palpatorios de los segmentos intervertebrales para formular un diagnóstico de movimiento en forma previa a cualquier acción terapéutica (Gibbons & Tehan, 1998).

Los movimientos acoplados han sido descritos por Panjabi y White como un fenómeno de asociación constante de un movimiento de traslación o rotación alrededor de

un eje con otro movimiento de traslación o rotación alrededor de un segundo eje (White III & Panjabi, 1990). Hacen referencia a la coexistencia de dos movimientos que ocurren simultáneamente: el movimiento primario es aquel producido intencionalmente que genera, a su vez, un movimiento conjunto en la articulación en otras direcciones (Stokes, Wilder, Frymoyer, & Pope, 1981). En otros términos, el movimiento producido por una carga externa es denominado movimiento principal, mientras que los movimientos acompañantes son llamados movimientos acoplados (White III & Panjabi, 1990). Ambos movimientos, el primario y los acoplados o accesorios, no pueden ocurrir separadamente.

Si bien los MVA han sido estudiados ampliamente desde principios del siglo pasado, y se ha llegado a un consenso acerca de su existencia –con la salvedad de los ejemplos que señalaremos–, las diferentes investigaciones no han podido arrojar resultados concluyentes respecto del comportamiento de acople que debería existir en los diferentes niveles vertebrales. Por un lado, se ha sugerido que las incongruencias encontradas entre los estudios podrían estar relacionadas con la multiplicidad de elementos de los que depende la cinemática de la columna. La naturaleza y dirección de los movimientos conjuntos parecería depender de múltiples factores tales como el movimiento primario (Panjabi M. , Yamamoto, Oxland, & Crisco, 1989), el nivel vertebral (Panjabi et al, 1989; Pearcy, Portek, & Sheppard, 1985), la

altura del disco (Stokes et al, 1981), las diferentes condiciones clínicas del sujeto (Stokes et al, 1980), la curvatura fisiológica de la columna en el plano sagital (Scholten & Veldhuizen, 1985), la geometría facetaria (Scholten & Veldhuizen, 1985), la actividad muscular (Pearcy, Portek, & Sheppard, 1985) y la postura (Lovett, 1905; Fryette, 1919; Panjabi et al, 1989; Vicenzino & Twomey, 1993). Por otro lado, las inconsistencias encontradas entre los diferentes estudios podrían a su vez estar vinculadas a las diversas condiciones experimentales, a los métodos de medición seleccionados y a los bajos niveles de precisión de algunos de esos métodos.

De los MVA existentes, el acoplamiento entre la rotación axial y la inclinación lateral es el que ha suscitado relativamente mayor interés. Esto se debe, principalmente, a su relevancia en la etiología, la evaluación y el tratamiento de la escoliosis (White III & Panjabi, 1990). La alteración de este tipo particular de acoplamiento ha sido asociada y analizada en el contexto de posible evidencia de inestabilidad de columna (White III & Panjabi, 1990). Modificaciones en este acoplamiento también han sido observadas en pacientes con dolor lumbar (Pearcy, Portek, & Sheppard, 1985) y en sujetos con diferentes grados de degeneración lumbar (Krismer, Hide, Behensky, & Kapfinger, 2000). Asimismo, el acoplamiento entre la inclinación y la rotación sería relevante en la biomecánica básica a todo nivel del raquis (White III & Panjabi, 1990). En ese sentido, el campo de la terapia manual sostiene que la alteración en el acoplamiento

normal entre la inclinación y el movimiento conjunto de rotación, asociados o no a los movimientos de flexoextensión, en determinado nivel vertebral y puesto en evidencia mediante tests palpatorios específicos, sería consecuencia de la disfunción del raquis en dicho nivel (Greenman, 2003).

Para arribar a un diagnóstico en determinado segmento vertebral a través de los MVA, la terapia manual se sustenta mayormente en las teorías de acoplamiento propuestas por el osteópata Harrison Fryette (Gibbons & Tehan, 1998). De entre los primeros modelos teóricos que pretendieron explicar los mecanismos de acople, la teoría propuesta por el Fryette (1918) fue particularmente crítica de Lovett y arribó a conclusiones parcialmente distintas. A pesar de que ninguno de los dos modelos es respaldado por evidencia empírica concluyente, aquellos lineamientos aún se utilizan como guía para analizar y clasificar las posibles lesiones o disfunciones del raquis.

Desde una perspectiva clínica resulta indispensable contrastar los diversos trabajos y teorías concernientes a los mecanismos de acople que han dado lugar a procedimientos de evaluación y tratamiento bien definidos, con la evidencia disponible en la actualidad respecto del posible comportamiento de acople en los diferentes niveles de la columna. En definitiva, si la condición patológica o disfuncional de determinado nivel del raquis puede ser evaluada a partir del análisis de acoplamiento vertebral, es condición previa y necesaria conocer con

precisión las características de este acoplamiento, tanto en condiciones funcionales como disfuncionales o patológicas. En otras palabras, para poder fundamentar determinado procedimiento diagnóstico y terapéutico, una buena teoría de acoplamiento vertebral debería tener la capacidad de predecir el comportamiento de acople existente en cierto nivel del raquis. De no ser así, es decir, en caso de que determinado modelo teórico de acoplamiento y los procedimientos palpatorios asociados no posean la capacidad predictiva aducida, su utilización podría conducir a conclusiones erróneas y, en definitiva, a la realización de diagnósticos incorrectos en la práctica clínica.

Dado que algunos modelos teóricos, como los descriptos por Lovett y por Fryette, han sugerido la existencia de patrones de acoplamiento comunes a amplias regiones del raquis, resulta crucial, en primer lugar, poder abordar el estudio de los MVA de manera generalizada, incluyendo en una revisión el análisis de los MVA de todos los sectores de la columna. Así, el mencionado análisis comparativo de los mecanismos de acople existentes en cada una de las zonas y niveles vertebrales podría permitir dilucidar si existen reglas generales e invariables que determinan los MVA. En segundo lugar, las inconsistencias encontradas en los resultados y los posibles errores de medición hacen necesario el desarrollo de una revisión que incorpore los trabajos más actuales, basados en métodos de evaluación con mayores niveles de precisión. En tercer lugar, la

incorporación de estos trabajos con bajos niveles de error y que, a su vez, han explorado de manera precisa los MVA en cada una de las unidades vertebrales, permitiría adoptar a su vez un enfoque relativamente segmentario de estudio, en contraposición al análisis clásico abordado en grupos o regiones vertebrales. Este hecho, a su vez, podría abrir las puertas al hallazgo de niveles del raquis en donde efectivamente se cumplan ciertas reglas de acoplamiento. De ser así, esto podría en el futuro conducir al desarrollo de tests palpatorios basados en los MVA, específicos para uno o más segmentos vertebrales. Si bien se han desarrollado diferentes revisiones sistemáticas y narrativas de la literatura concerniente a los movimientos de acople, no existe a la fecha un estudio que cumpla simultáneamente con los requisitos mencionados.

El presente documento se centrará específicamente en los MVA de inclinación y rotación, con especial atención en los movimientos iniciados con inclinación, documentando y analizando la información existente respecto de los mismos en el raquis cervical, dorsal y lumbar. Se describirá en detalle y en forma exhaustiva las diferentes teorías acerca del acoplamiento vertebral, los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos en los trabajos más relevantes sobre la materia.

Dada la importancia que aún en el ámbito de la terapia manual se le otorga a los MVA tanto en la evaluación como en el accionar terapéutico, mejorar la comprensión de la información científica que resulta clínicamente relevante

acerca de la mecánica del raquis y, en particular, de los patrones de acoplamiento vertebral, podría no solo colaborar a consolidar el cuerpo de conocimiento existente en la materia, sino también, en combinación con la experiencia clínica y la observación, mejorar el diagnóstico, el tratamiento y el cuidado del paciente.

Resultados

Medición de los MVA

- Sistema de medición

Se han sugerido diferentes métodos para describir y analizar el movimiento existente entre dos segmentos corporales. El sistema cartesiano o de coordenadas ortogonales ha sido el más aceptado para la descripción de los movimientos acoplados a nivel del raquis. Este modelo se basa en los tres planos anatómicos y en los tres ejes estandarizados del cuerpo. Ha sido arbitrariamente definido con su centro en la base posterior del sacro, mientras el sujeto se encuentra en posición anatómica (Panjabi, White III, & Brand Jr., 1974). Los tres planos y ejes atraviesan el centro descripto, orientándose entre sí a 90 grados cada uno del otro. Por convención, el eje *x* es el eje horizontal latero-lateral, el eje *y* representa el eje vertical y, finalmente, el eje *z* representa el eje antero posterior. En consecuencia, el plano sagital es representado en los ejes *yz*, el plano coronal por los ejes *xy* y, finalmente, el plano horizontal es representado por el plano *xz* (White III & Panjabi, 1990).

Al margen de este sistema central originado en el sacro, pueden establecerse en cualquier parte del cuerpo, localmente, el mismo sistema de coordenadas. A nivel de la columna, para analizar el movimiento entre dos unidades vertebrales, a este eje se lo ubica en la parte central del cuerpo de la vértebra superior. A partir de allí, se representan los mismos tres ejes (x, y y z) y los tres planos anatómicos. Así, en cada eje, una vértebra puede trasladarse o bien rotar. La rotación en el eje x se denomina flexo-extensión, la rotación en el eje z se denomina inclinación lateral, mientras que la rotación en el eje vertical y hace referencia a la rotación propiamente dicha. En definitiva, existen entonces seis movimientos posibles en un segmento dado: tres rotaciones posibles y tres traslaciones sobre los ejes. En este modelo, el movimiento en tres dimensiones determina seis componentes. Uno de ellos es el movimiento principal, mientras que los cinco restantes representan los posibles movimientos acoplados (White III & Panjabi, 1990).

- Modelos de estudio

El mecanismo de acoplamiento vertebral es un fenómeno complejo (Vicenzino & Twomey, 1993) y su estudio ha constituido un desafío para los investigadores. Desde los trabajos iniciales, una multiplicidad de enfoques metodológicos se ha adoptado para su investigación. Estos han dependido, en parte, de la estrategia del investigador, pero, a su vez, han sido limitados por la tecnología disponible. A cada uno de estos

enfoques metodológicos se le pueden atribuir ciertas ventajas y desventajas.

El abordaje de las investigaciones ha incluido estudios in vivo (sujetos vivos), in vitro (especímenes cadavéricos) y, por otro lado, se han creado modelos mecánicos y matemáticos para el análisis de los movimientos del raquis. Al ser la columna una estructura tridimensional, resulta clave poder estudiar y documentar sus propiedades físicas con métodos compatibles con dicho comportamiento. En ese sentido, algunos investigadores biomecánicos han argumentado que los modelos in vitro proveen un ambiente más controlado para el estudio (Panjabi, Oxland, Yamamoto, & Crisco, 1994). Según esta postura, si bien los estudios in vivo proporcionan importante información funcional, tendrían algunas desventajas como, por ejemplo, la imposibilidad de conocer las cargas aplicadas al raquis, el impedimento de discernir el rol de cada una de las estructuras de la columna en relación a los MVA y la inexactitud de las mediciones. A su vez, el enfoque de análisis in vitro permitiría separar, por un lado, el estudio de los efectos de la posición de un segmento del raquis en particular y las propiedades mecánicas de las estructuras osteoligamentosas de la columna, de los efectos del sistema de control neuromuscular, por otro lado (Cholewicki, Crisco, Oxland, Yamamoto, & Panjabi, 1996). En contrapartida, las evaluaciones in vitro no permitirían reflejar la incidencia de actividad muscular ni evaluar los efectos de las cargas producidas en las diferentes

posturas globales de la columna (Gibbons & Tehan, 1998).

La imprecisión de las mediciones y las inconsistencias en los resultados obtenidos, sobre todo a partir de los diferentes estudios in vivo e in vitro, es una cuestión que ha sido ampliamente abordada por la literatura y se relaciona, mayormente, con los métodos de análisis experimental utilizados y disponibles. Los primeros trabajos de investigación se basaron principalmente en observaciones y análisis a partir de modelos mecánicos (Lovett, 1903; Fryette, 1918), en observaciones y análisis experimentales en modelos animales (Lovett, 1903), en observaciones y análisis fotográficos de modelos cadavéricos humanos (Lovett, 1900; Lovett, 1905; Fryette, 1918) y en observaciones y análisis fotográficos de pacientes (Lovett, 1905; Ashmore, 1915, Fryette, 1918). En aquellos estudios iniciales de los MVA también se utilizaron exámenes palpatorios (Ashmore, 1915) e imágenes radiográficas realizadas sobre especímenes in vitro (Fryette, 1918). Más adelante, se incorporaron estudios de imágenes 2-D en humanos (Dittmar, 1931; Bakke, 1931). A partir de las últimas décadas del siglo XX la investigación de los MVA se realizó recurriendo a análisis biomecánicos in vitro (Panjabi M., Yamamoto, Oxland, & Crisco, 1989; Vincenzino & Twomey, 1993), haciendo uso de tecnologías de imágenes en 3-D (Frymoyer, Frymoyer, Wilder, & Pope, 1979; Pope, Wilder, Buturla, Matteri, & Frymoyer, 1977) o bien utilizando tecnología de sensores u otros dispositivos

externos de medición (Willems, Jull, & K-F Ng, 1996). El uso de imágenes 2-D para el estudio de movimientos que ocurren, de hecho, en tres dimensiones ha sido motivo de controversias debido a su inexactitud, a la posibilidad de que puedan dar lugar a la proyección de movimientos en planos erróneos y a las posibles distorsiones que pueden presentarse en esta técnica (para una revisión, ver Harrison & Troyanovich, 1998). Discernir los patrones de acoplamiento basándose en observaciones, en procedimientos palpatorios y/o en experimentos con mediciones posiblemente defectuosas con instrumentos 2-D podría ser una de las razones de las inconsistencias encontradas en las teorías iniciales de acoplamiento vertebral (Cook, 2003). En ese sentido, el advenimiento del uso de técnicas 3-D in vivo, tales como la radiografía biplanar, la TAC o la RMN para el estudio de los MVA, ha permitido limitar las críticas relacionadas a la imprecisión de los instrumentos de medición, al mismo tiempo que ha proporcionado un método más confiable para el análisis in vivo y funcional de la mecánica de acople vertebral.

Análisis de los Movimientos Vertebrales Acoplados

- Primeras investigaciones

Robert Lovett fue el primero en estudiar sistemáticamente la relación de acoplamiento existente entre los movimientos de inclinación lateral y rotación en individuos sanos (Lovett, 1903). Hasta ese entonces, las investigaciones

relacionadas al acoplamiento vertebral se habían centrado en la mecánica de la escoliosis. El estudio de los movimientos normales de acoplamiento había sido prácticamente inexplorado. Como principio mecánico, el investigador desarrolló, por un lado, la idea de que una barra o varilla que se encuentra incurvada en un plano, si posteriormente es incurvada en otro plano debe necesariamente generar un movimiento de torsión sobre su eje. Por otro lado, estableció que, si una varilla o barra se encuentra incurvada en un plano y luego es girada sobre su eje, debe necesariamente realizar una flexión en un segundo plano (Lovett, 1903). Lovett sostuvo la hipótesis de que en el raquis vertebral se cumplían esos principios mecánicos generales. Al ser el raquis una estructura curvada en el plano antero posterior, según el autor cualquier movimiento de inclinación habrá producido ya la flexión simultánea en dos planos que determine luego la torsión conjunta. Al mismo tiempo, cualquier rotación sobre agregada a la incurvación anteroposterior de la columna producirá en forma automática una inclinación lateral.

Así, en una serie de trabajos clásicos realizados a principios del siglo XX en modelos de laboratorio, en individuos sanos y en pacientes con escoliosis, Lovett describió los patrones de acoplamiento vertebral. Utilizando modelos in vitro e in vivo, recurrió a pines o alfileres insertados en las apófisis espinosas de sus modelos para realizar observaciones y registros cualitativos de los movimientos principales y

accesorios de la columna. En términos generales, postuló que la inclinación lateral y la rotación forman parte de un movimiento compuesto y, por ende, no pueden ser disociados (Lovett, 1900). Subrayó así la existencia de un movimiento conjunto de inclinación-rotación, que llamó sidebending-rotation, concepto que luego sería abordado por autores del campo de la osteopatía.

Para determinar que estructuras gobiernan los movimientos acoplados y, más específicamente, para conocer si las facetas articulares eran un factor causante de la rotación en la inclinación lateral, realizó un experimento recurriendo a la columna de un cadáver adulto, en donde diseccionó el arco posterior. Así, quedándose solo con la columna de cuerpos vertebrales, llegó a la conclusión de que la rotación generada en la columna de cuerpos vertebrales era similar a la rotación de su modelo in vitro con la columna intacta. Por ende, determinó que los procesos articulares no juegan un rol en el movimiento acoplado, sino que, más bien, el factor determinante es la columna de cuerpos vertebrales.

El análisis de Lovett sobre la columna en general lo llevó a la conclusión de que, tanto con el raquis en posición neutra como en hiperextensión, el movimiento primario de inclinación está siempre acompañado de un movimiento conjunto de rotación al mismo lado. Este fenómeno, por las características del raquis, se daría mayormente a nivel lumbar y dorsal bajo. Los niveles dorsales bajos se comportarían como vértebras lumbares a nivel biomecánico. En sus

observaciones, solamente con el raquis en flexión, la inclinación lateral es acompañada de una rotación al lado contralateral. Este movimiento se daría principalmente a nivel dorsal (Lovett, 1905). Asimismo, cuando el movimiento inicial es de rotación, el movimiento conjunto de inclinación sería homolateral al movimiento vertebral principal en todos los niveles del raquis.

En algunas de sus evaluaciones, Lovett colocó a su modelo en posición sentada. A pesar de que algunos autores han criticado la posible posición de la pelvis en relativa flexión en estas evaluaciones (Cook, 2003), una parte de los estudios fueron realizados, efectivamente, con sus modelos en posición de pie (Lovett, 1900). Si bien se ha pretendido explicar la disparidad de los resultados de sus investigaciones frente a trabajos de otros autores posteriores, aduciendo que el investigador no trabajó en sus modelos con un posicionamiento neutro de la columna (Cook, 2003), las inconsistencias en los resultados podrían responder, asimismo, a las diferencias metodológicas existentes entre los distintos trabajos o a posibles errores de observación o medición.

Lovett estableció aquellas conclusiones para el raquis de manera general. De igual modo, para cada una de las regiones de la columna el autor halló y describió ciertas características biomecánicas particulares. Para la columna cervical, si bien el investigador adujo que los estudios observacionales a ese nivel en modelos in vivo se presentaban insatisfactorios, concluyó que, en el raquis cervical, la inclinación lateral es

acompañada de rotación de los cuerpos vertebrales hacia el mismo lado de la rotación, tal como en la región lumbar y dorsal baja. También el movimiento primario de rotación, a nivel cervical, es acompañado por una inclinación homolateral. Para la región dorsal, si bien Lovett la describió como la zona de la columna con menor movimiento de inclinación lateral, estableció que la rotación se da al lado contrario del movimiento primario de inclinación, dada la flexión fisiológica relativa de esa región del raquis. Para el caso del movimiento inicial de rotación, según el autor, la inclinación lateral se da al mismo lado que la rotación. Por último, a nivel lumbar, la inclinación lateral es acompañada en forma conjunta por un movimiento de rotación homolateral, tal como fuera descrito en las consideraciones generales.

De los enunciados de Lovett pueden extraerse al menos dos conclusiones en relación a la inclinación lateral, ya apuntadas por el autor. En primer lugar, el hecho de que las características y distribución de ese movimiento es dependiente de la posición antero-posterior de la columna. En otras palabras, la inclinación lateral en extensión no producirá los mismos movimientos conjuntos que la inclinación con una columna en flexión o en posición neutra. En segundo lugar, para el investigador, el movimiento de inclinación es altamente dependiente de la región de la columna. Las características anatómicas de cada región determinan la biomecánica: si a nivel lumbar la inclinación es acompañada por una rotación al

mismo lado, a nivel dorsal la rotación se da al lado contrario.

- La influencia de Lovett en las investigaciones osteopáticas acerca de la movilidad del raquis

Estos primeros trabajos de Lovett influenciaron enormemente la investigación en los MVA en las siguientes décadas. El campo de la terapia manual y, muy especialmente, el ámbito de la osteopatía utilizó aquellos postulados, asimilándolos de forma exacta o bien reformulándolos, para sostener sus propias teorías y fundamentar algunos de sus conceptos centrales.

Así, generando un aporte a la comprensión de la biomecánica de la columna desde la visión osteopática, estas primeras teorías contribuyeron al desarrollo del concepto de lesión espinal o, en los términos precisos de algunos investigadores, el concepto de subluxación espinal (Ashmore, 1915). Si bien este hecho no parece haber sido documentado previamente, y la autora no ha sido debidamente incluida en el conjunto de investigadores de los MVA, en nuestro conocimiento Edythe Ashmore fue la primera en proseguir con las investigaciones iniciadas por Lovett a principios de siglo y realizar una publicación al respecto. A través de varios experimentos observacionales y palpatorios con modelos vivos, arribó a las mismas conclusiones que su predecesor. Para la autora, el movimiento conjunto de inclinación-rotación o side bending-rotation en la posición erecta de la columna es un fenómeno que ocurre a nivel lumbar, dorsal bajo y cervical. En ese sentido, la flexión del raquis

reduce la amplitud de la inclinación y confina el movimiento a la zona dorsal media y alta, haciendo que los cuerpos vertebrales roten al lado contrario a la inclinación. Asimismo, la hiperextensión de la columna reduce la amplitud de la inclinación y la confina, al mismo tiempo, a la zona lumbar, produciendo un MVA de rotación al mismo lado. Al mismo tiempo, para Ashmore, en posición neutra del raquis, la rotación se da en forma homolateral a la inclinación. Para el movimiento de iniciación con rotación, lo que en términos de la autora sería un movimiento de rotación-inclinación o rotation-side bending, determinó que la inclinación conjunta ocurre al mismo lado que el movimiento principal (Ashmore, 1915). Como puede apreciarse, Ashmore fue un poco más lejos que Lovett pues diferenció, al menos en términos conceptuales, dos MVA distintos: la inclinación-rotación y la rotación-inclinación.

Asimismo, a diferencia de Lovett, Ashmore incluyó procedimientos palpatorios para poner a prueba su hipótesis a nivel cervical inferior. Así, determinó que la rotación de la cabeza a un lado disminuye la distancia vertical entre los procesos espinosos cervicales de ese mismo lado, valorados sensitivamente con los pulpejos de los dedos, producto de una inclinación conjunta homolateral. De igual manera, evaluando la modificación en la distancia anteroposterior que se producía entre las apófisis espinosas luego de un movimiento de inclinación a un lado, determinó que la rotación conjunta se da al mismo

lado que el movimiento principal de inclinación (Ashmore, 1915).

Dentro del campo osteopático, Downing (1923) replicaría en sus obras los postulados de Lovett, así como la nomenclatura osteopática de Ashmore.

- De Halladay a Fryette: la teoría más aceptada y menos comprendida

Dentro de los primeros trabajos de investigación de los MVA a principios del siglo pasado es necesario considerar asimismo las contribuciones de los osteópatas Fryette y Halladay. Este último autor, profesor de Anatomía Aplicada en la Escuela Americana de Osteopatía, hizo su aporte a través del estudio de preparados anatómicos y el desarrollo de un modelo in vitro de la columna completa, con las articulaciones posteriores y los ligamentos intactos. Este tipo de espécimen, presentado en el año 1919, fue denominado “Columna de Halladay” y sería utilizado para demostrar los movimientos normales de la columna, así como la conducta del raquis en condiciones anormales. Este modelo ha contribuido mucho a mejorar la comprensión de la movilidad de la columna (Stoddard, 1969).

Las teorías de Fryette sobre la mecánica espinal evolucionaron a partir de los trabajos de Lovett y Halladay (Capobianco, Protopapas, & Rivera-Martinez, 2002). Si bien Fryette había estudiado la biomecánica vertebral desde sus propios inicios en 1903, el autor no comprendería la esencia de los MVA hasta no hacerse de la

lectura del texto de Lovett “Spinal curvatures and rounded shoulders” del año 1907 (Fryette H., 1954). Así, Fryette basó sus estudios en la obra del investigador de Harvard (Fryette, 1918) y, de esa manera, asimiló el principio mecánico que comparaba el raquis a una varilla flexible. Sin embargo, Fryette estableció ciertas críticas al trabajo de Lovett, argumentando que las conclusiones a las que se había arribado utilizando el modelo de barra flexible y rotación conjunta homolateral eran correctas, pero que solo se cumplían en el caso de que el raquis se encontrara en hiperextensión o, en menor medida, en flexión extrema. De esta manera, incorporó un nuevo aspecto en su modelo de análisis y equiparó la columna a una pila rígida de bloques en caso de que el peso de la misma se encuentre distribuido sobre los cuerpos y los discos intervertebrales. Para Fryette el comportamiento mecánico de la columna es controlado por dos elementos: las facetas articulares y los cuerpos vertebrales. Dependiendo del grado de incurvación anteroposterior del raquis, unas u otras estructuras gobiernan los movimientos del raquis y, por ende, determinan la rotación conjunta. Según el autor, con la columna en posición de hiperextensión o de hiperflexión, las carillas articulares se encuentran bloqueadas y controlan los movimientos de la columna. En este caso, el comportamiento de rotación conjunta es homolateral a la inclinación. Asimismo, para Fryette, cuando el raquis se encuentra en posición neutra o bien en posición de leve flexión o easy flexion, los cuerpos y los discos intersomáticos

son los que controlan el movimiento vertebral. Bajo estas circunstancias, la columna no puede ya ser comparada a un modelo mecánico de barra flexible previamente incurvada en un plano, sino más bien a una pila de bloques. En una columna en posición relajada, o bien levemente incurvada, el peso de la misma es cargado por los cuerpos; cuando se produce una inclinación lateral, estos tienen la tendencia a arrastrarse hacia afuera de la carga rotando hacia la convexidad. En otras palabras, una inclinación lateral, bajo estas condiciones, produce una rotación conjunta heterolateral.

Aquí Fryette introdujo un nuevo concepto, el de easy flexion: el comportamiento biomecánico en leve inflexión de la columna es similar al de posición neutra. Empero, al mismo tiempo cuestionó y modificó la noción de flexión y extensión de la columna sostenida por la anatomía, acuñando la categoría de movimientos fisiológicos del raquis, en oposición a los movimientos anatómicos. Fryette sostuvo que la flexión debería ser definida como el incremento de la curva normal existente en cualquier región del raquis, mientras que la extensión se correspondería a la disminución de la curva normal existente en cualquier área del raquis. Por otro lado, la posición neutra sería aquella en la cual las carillas articulares se encuentran libres: una posición entre el comienzo de la extensión y el comienzo de la flexión (Fryette, 1918; Fryette, 1954).

Bajo esa nueva definición, el aumento de la lordosis lumbar, o lo que se conoce como

extensión lumbar, para el autor correspondería a una flexión fisiológica. Y la disminución de la lordosis lumbar correspondería, en su terminología, a una extensión fisiológica. En la zona cervical inferior el análisis sería similar al de la región lumbar. Solo en el caso de la columna dorsal, los movimientos fisiológicos tendrían la misma nomenclatura que los movimientos anatómicos: el aumento de la curvatura dorsal, es decir, la flexión fisiológica, sería equivalente a la flexión anatómica.

Al mismo tiempo, Fryette graduó los movimientos de flexión y extensión en el raquis. Definió los grados de extensión, comenzando desde la posición neutral, como extensión, extensión marcada y extensión extrema, o bien, primer, segundo y tercer grado, respectivamente. Del mismo modo, para el caso de la flexión, los definió como flexión, flexión marcada y flexión extrema, o bien primer, segundo y tercer grado, respectivamente (Fryette, 1954).

Resumiendo sus planteos, en la medida en que las carillas se encuentran en control de la columna, las mismas gobiernan y dirigen la rotación. Así, el raquis adquiere el comportamiento de una barra flexible, debiendo rotar hacia la concavidad o en forma homolateral al producirse una inclinación lateral. Por el contrario, cuando la columna se encuentra en una posición en donde las carillas no se encuentran en control del movimiento o, en otras palabras, cuando se hallan en posición neutral o de easy flexion, el raquis toma el comportamiento de una pila de bloques sometidos a una carga axial. De

esta manera, cuando el raquis es inclinado, los cuerpos rotan hacia la convexidad o, lo que es lo mismo, en forma heterolateral.

Fryette estableció estos conceptos como principio general. Luego, para cada región del raquis, marcó, a su vez, algunas diferencias. Para la zona lumbar, originalmente determinó que una inclinación lateral tanto en posición neutra como en flexión de primer y segundo grado (flexión posterior o extensión anatómica) generan una rotación heterolateral. Sólo una inclinación en flexión fisiológica extrema o de tercer grado (flexión posterior extrema) o bien una extensión fisiológica (flexión anterior) conducen a que las carillas articulares tomen total dominio del movimiento y, por ende, se produzca una rotación homolateral. Sin embargo, en el análisis de la flexión posterior extrema realizó una aclaración con una gran relevancia clínica: para Fryette, a pesar de que se puede forzar a la columna a la flexión posterior extrema, esta postura no puede ser alcanzada ni soportada en condiciones cotidianas. Una posible interpretación de esta idea indicaría que, como en la práctica solo es posible realizar flexiones posteriores leves o moderadas, desde un punto de vista clínico, una inclinación lateral en flexión posterior siempre es acompañada de un MVA en rotación contralateral, tal como ocurre con el raquis en posición neutra (Fryette H. H.). Esta sería la posición adoptada por Fryette en un principio.

Posteriormente, Fryette adoptó una postura levemente distinta respecto del raquis lumbar. En su libro de texto consideró que solo en posición

neutra o en primer grado de flexión posterior la rotación conjunta se da en forma contralateral (Fryette H., 1954). De esta manera, el autor dejó lugar ahora si a que en su teoría una flexión posterior de segundo grado produjera una rotación homolateral, ya que la flexión posterior extrema no es posible en la práctica.

Asimismo, para el raquis dorsal, para el osteópata, cuando el mismo se encuentra en posición neutra o en primer grado de flexión (flexión anterior), una inclinación conduce, según Fryette, a una rotación contralateral. Una flexión anterior de segundo o tercer grado, así como una flexión posterior de cualquier amplitud generan un MVA en rotación homolateral en la zona torácica. De esta manera, según la última concepción de Fryette, tanto en la zona dorsal como lumbar, en posiciones vertebrales alejadas de la zona de easy flexion, la rotación conjunta se produce en forma homolateral.

Estos supuestos explicaban algunos de los hallazgos de Lovett, quien había reportado a nivel lumbar una rotación conjunta homolateral, pero realizando sus experimentos mayormente, según la crítica de Fryette, en posiciones extremas, no en posición neutra o en easy flexion. Según Fryette, de esta manera los cuerpos no se hallaban bajo carga y, por ende, las estructuras que gobernaban el MVA eran las facetas articulares, conduciendo a una rotación al mismo lado que la inclinación. Asimismo, su hipótesis permitía dar cuenta de los resultados informados por Lovett de rotación conjunta heterolateral a nivel dorsal donde, efectivamente, se habían realizado los

experimentos en posición neutral o en easy flexion.

Si bien en sus trabajos Fryette fundamentó con su teoría los llamados movimientos fisiológicos de la columna, desde nuestra perspectiva fue la propia comunidad y literatura osteopática la que interpretó y denominó como leyes aquellos principios establecidos por Fryette (Fryette, 1919; McManis, 1936; Fryette, 1954). Ya en 1936 McManis hacía referencia a las dos leyes fisiológicas (McManis, 1936). En lo que denominó primera ley fisiológica, describió que cuando una columna se encuentra en posición neutra o, en términos del posicionamiento facetario, con las carillas articulares de las vértebras a estudiar enfrentadas en forma paralela o cuasi-paralela, una inclinación a un lado produce una rotación conjunta al lado contrario. Asimismo, en lo que sería para McManis la segunda ley fisiológica, señaló que cuando ese conjunto de unidades vertebrales es llevado a la flexión o a la extensión, la misma inclinación produce un movimiento conjunto de rotación al mismo lado (McManis, 1936). Puede observarse como McManis simplificó los principios, omitiendo la consideración de Fryette en caso de flexión posterior de primer y/o segundo grado en el caso lumbar y de flexión anterior de primer grado en el caso dorsal, que según Fryette se comportaban como en el caso de easy flexion. En definitiva, la interpretación y nomenclatura de McManis sería la que posteriormente prevaleció en el tiempo y dio origen al consenso osteopático

en relación a los movimientos acoplados de la columna, denominado leyes de Fryette.

- *Otras contribuciones de diversos autores al análisis de los MVA en la segunda parte del siglo XX*

Autores tales como Stoddard, Kaltelborn, Kapandji y Maitland colaboraron asimismo al análisis de la biomecánica vertebral y, en particular, al análisis del mecanismo de acople vertebral, aunque con resultados dispares. Siendo verdaderos fundadores de escuelas en el campo de la biomecánica y la terapia manual, sus postulados han contribuido enormemente al desarrollo de estas especialidades. Aunque en muchos casos no han presentado en forma rigurosa los resultados de sus estudios, o bien, no han realizado investigaciones propias acerca de los MVA, conocer sus aproximaciones sobre el tema puede resultar significativo.

Stoddard al igual que Fryette, sostuvo que a nivel cervical inferior la inclinación lateral y la rotación acoplada se dan en forma homolateral. A pesar de no presentar evidencia concluyente en sus textos, refiere haber confirmado esos resultados a través del análisis de radiografías dinámicas realizadas al final del movimiento (Stoddard, 1969). Por otro lado, en contraposición a Lovett pero siguiendo los principios originales de Fryette sostuvo que, tanto en la columna dorsal como lumbar, si la misma se encuentra en posición neutra o en extensión anatómica, ante el movimiento de inclinación, la rotación automática de rotación se da al lado

contrario. Mientras que solo con la columna en flexión la rotación conjunta se da al mismo lado que la inclinación primaria.

Kaltelborn no coincidió con Stoddard en forma exacta en los patrones resultantes de los movimientos primarios y acoplados. Al igual que la gran mayoría de los autores, describió como en el raquis cervical, por abajo del nivel C2, el acoplamiento entre inclinación lateral y rotación ocurre en forma homolateral. Para el raquis lumbar también estableció patrones similares a los de Stoddard. En sus registros, si la columna lumbar se encuentra en posición neutra o en extensión, la rotación automática se da al lado contrario, mientras que si la columna lumbar se encuentra en flexión el acoplamiento de rotación se da al mismo lado. Sin embargo, para la columna dorsal determinó que cuando el raquis se encuentra en posición neutra o en flexión, el acoplamiento entre la inclinación y la rotación asociada ocurre en forma homolateral. Para él, solo cuando la columna dorsal se encuentra en extensión el MVA de rotación se da al lado contrario que la inclinación (Kaltelborn & Evjenth, 2003).

Por su parte, Kapandji estableció que, con la columna en posición neutra, la inflexión lateral es acompañada de un movimiento automático en la vértebra que hace girar su cuerpo de tal forma que la línea media anterior se orienta hacia la convexidad de la curva o, en otras palabras, al lado contrario (Kapandji, 1998). El autor, aunque tampoco presentó evidencia clara en sus textos ni realizó análisis cuantitativos de los MVA, basó

sus trabajos tanto en el análisis de radiografías 2D como en la explicación a partir del comportamiento de un modelo mecánico. El autor atribuyó el MVA a nivel dorsolumbar a dos factores: la compresión de los discos intervertebrales y la tensión de los ligamentos. En ese sentido, el modelo mecánico del raquis creado por Kapandji intentó explicar el efecto de la compresión de los discos producto de la inclinación lateral. Ese efecto es, para Kapandji, la consecuente rotación acoplada de la columna.

Estos movimientos serían exclusivos del raquis dorsolumbar, ya que para la región cervical inferior Kapandji estableció iguales patrones de rotación conjunta que el resto de los autores estudiados hasta ahora. Para el autor, en este sector del raquis la orientación de las carillas articulares juegan un rol clave, estableciendo en cada nivel un eje mixto de rotación-inclinación. A través de ese eje, la columna cervical no puede hacer movimientos de rotación ni de inclinación pura, sino que siempre quedan determinados movimientos conjuntos de inclinación-rotación al mismo lado.

Finalmente, Maitland (2005), apoyándose en estudios de Edwards, sostuvo que para el raquis dorsolumbar el movimiento conjunto de rotación ocurre al lado contrario que la inclinación inicial, independientemente de la posición de flexión, extensión o neutralidad de la columna (Maitland, 2005). Para el segmento cervical, coincidió en el acoplamiento de inclinación-rotación al mismo lado.

- Nomenclatura e interpretación osteopática de los MVA

La biomecánica de columna se enseña en las escuelas de osteopatía con énfasis en las leyes de Fryette (Miller, 2010), quien introdujo el concepto de posicionamiento neutral y no neutral de las facetas articulares.

Una variante de la convención de Fryette es aun ampliamente referida en la literatura osteopática (Ward, 2003). Así, la profesión osteopática denomina a los movimientos acoplados de inclinación y rotación como movimientos Tipo I y Tipo II (Gibbons & Tehan, 1998). Según Greenman (2003), en la mecánica neutral o de tipo I se produce un movimiento acoplado de rotación al lado opuesto a la inclinación. Este comportamiento, según el autor, ocurre mayormente cuando el sujeto se encuentra con la columna en posición erecta con curvas anteroposteriores normales. Sin embargo, para el caso de la región lumbar, para Greenman, como antes para Fryette en su razonamiento original y Stoddard, una inclinación en extensión opera asimismo bajo la mecánica neutral (Tipo I).

Asimismo, según Greenman el raquis cervical inferior presenta una mecánica de tipo II (no neutral, con inclinación y rotación homolateral), mientras que el raquis dorsal y lumbar tendrían, en definitiva, la posibilidad de realizar ambos tipos de movimiento. En particular, describe que en la zona torácico el tipo de mecánica adoptada depende del nivel en cuestión y del movimiento inicial de inclinación o rotación, presentando variaciones entre las

vértebras por arriba y por abajo del ápex. Sin embargo, en general, señala que, si el movimiento de inclinación es el inicial, la rotación se realiza al lado opuesto, mientras que, si la rotación es el movimiento principal, la inclinación ocurre al mismo lado.

En la literatura osteopática, estos postulados de Greenman respecto de la región torácica se oponen en parte a la descripción de Ward (2003), quien señala, siguiendo a White & Panjabi (1990), que a nivel dorsal la inclinación es acompañada por un movimiento acoplado de rotación al mismo lado, siendo mayor esta asociación a nivel torácico alto. Sin embargo, sorprendentemente, en la misma obra, al referirse al examen y diagnóstico osteopático, Ward describe a nivel dorsal y en posición neutra un movimiento acoplado contralateral tal como enuncian las leyes de Fryette (Ward, 2003).

Para el raquis lumbar, según Ward, con el raquis en posición neutra, la inclinación lateral es seguida de un movimiento acoplado de rotación al lado opuesto. Ahora bien, para analizar los movimientos acoplados en flexión o extensión, este autor parecería retomar en parte la idea de Fryette, que asociaba la mecánica no neutra con las posiciones extremas del raquis, sobre todo en el caso de la flexión posterior. Aunque sin especificarlo, Ward establece un rango muy amplio de flexión y de extensión de columna dentro del cual aún se manifiesta la mecánica neutral de tipo I.

En definitiva, dentro del campo de la osteopatía, más allá del consenso en la

nomenclatura, incluso autores modernos como Greenman y Ward han arribado a conclusiones muy dispares respecto del mecanismo de acople de cada región del raquis con excepción de la columna cervical. Apoyándose y tomando de referencia a distintos estudios o autores, establecieron así diferencias en su descripción de los MVA o incluso han arribado a conclusiones contradictorias.

Más allá de los diversos enfoques que adoptaron tanto los trabajos clásicos de investigación como las teorías y conclusiones expuestas por los principales exponentes de la terapia manual y la osteopatía, al menos dos características en común los podrían sintetizar.

En primer lugar, como fuera apuntado, muchos de estos autores no realizaron estudios propios y, aquellos que lo hicieron, no cuantificaron los resultados de sus estudios o bien esos resultados no fueron expuestos de forma rigurosa. En segundo lugar, arribaron a conclusiones generalizadas para todos los niveles vertebrales de cada una de las zonas principales de estudio: cervical superior, cervical inferior, dorsal y lumbar. En otras palabras, los investigadores concluyeron que todas las vértebras de una región del raquis en particular se comportan de la misma manera. Un resumen de estos hallazgos se presenta en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Movimientos acoplados de ROTACIÓN ante la inclinación lateral (posición neutra del raquis)

Autor	Cervicales inferiores	Dorsales	Lumbares
Lovett (1905)	Homolateral	Contralateral	Homolateral
Ashmore (1915)	Homolateral	Contralateral	Homolateral
Fryette (1918)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Downing (1923)	Homolateral	Contralateral	Homolateral
Stoddard (1959)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Maitland (1964)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Kaltelborn (1964)	Homolateral	Homolateral	Contralateral
Kapandji (1975)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Greenman (2003)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Ward (2003)	Homolateral	C y H	Contralateral

Tabla 2. Movimientos acoplados de ROTACIÓN ante la inclinación lateral (posición de flexión anatómica del raquis)

Autor	Cervicales inferiores	Dorsales	Lumbares
Lovett (1905)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Ashmore (1915)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Fryette (1918)	Homolateral	Contra (1°) y homo (2° y 3°)	Homolateral
Downing (1923)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Stoddard (1959)	Homolateral	Homolateral	Homolateral
Maitland (1964)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Kaltelborn (1964)	Homolateral	Homolateral	Homolateral
Kapandji (1975)	N/R	N/R	N/R
Greenman (2003)	Homolateral	N/R	Homolateral
Ward (2003)		Contra (1°y2°) y Homo (3°)	Contra (1°y2°) y Homo (3°)

Tabla 3. Movimientos acoplados de ROTACIÓN ante la inclinación lateral (posición de extensión anatómica del raquis)

Autor	Cervicales inferiores	Dorsales	Lumbares
Lovett (1905)	Homolateral	Contralateral	Homolateral
Ashmore (1915)	Homolateral	Contralateral	Homolateral
Fryette (1918)	Homolateral	Homolateral	Contra (1°) y Homo (3°)
Downing (1923)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Stoddard (1959)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Maitland (1964)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Kaltelborn (1964)	Homolateral	Contralateral	Contralateral
Kapandji (1975)	N/R	N/R	N/R
Greenman (2003)	Homolateral	N/R	Contralateral
Ward (2003)	Homolateral	Contra (1°y2°) y Homo (3°)	Contra (1°y2°) y Homo (3°)

- *Primeros estudios que cuantificaron los rangos de movimiento y los patrones de acoplamiento vertebral*

Independientemente de las estrategias y de las herramientas de medición utilizadas a lo largo de las diversas investigaciones, ha habido grandes variaciones en los reportes concernientes tanto a los rangos de movimiento simples como a la presencia o no y la magnitud del mecanismo de acoplamiento vertebral.

Si bien la movilidad de la columna ha sido estudiada desde los comienzos de la medicina misma, la primera medición real fue realizada por Weber (1827), utilizando pines de Steinman insertados en modelos in vitro. Volkman (1872), Meyer (1873) y Lovett (1905) continuaron con esos estudios siguiendo la misma metodología (Lysell, 1969). Sin embargo, fue Lovett (1905) quien primero realizó mediciones de rangos y grados de movimiento en cada uno de los planos ortogonales en forma independiente, utilizando y comparando modelos in vitro e in vivo. En contrapartida, por las limitaciones de precisión que ofrecía este método de medición, desistió de evaluar cuantitativamente los patrones de acoplamiento (Lovett, 1905). Como fuera

señalado, para los MVA se limitó a describir sus observaciones.

Uno de los estudios más completos que utilizó pines insertados en los procesos espinosos fue realizado por Gregerson & Lucas (1967) en siete voluntarios vivos, en los que pudieron medir a nivel torácico y lumbar tanto los rangos de movimiento intersegmentario en cada uno de los tres planos del espacio, así como los MVA de rotación ante la inclinación lateral. Estos investigadores conectaron los pines de Steinman a un transductor mecánico que permitía registrar los movimientos de la columna. Así, exploraron segmento por segmento el raquis y concluyeron que, en posición neutra, con excepción del duodécimo segmento dorsal, el acoplamiento existente se realiza hacia el mismo lado que la inclinación. Para el segmento D12 hallaron un mecanismo de acople contralateral ante la inclinación lateral a un lado.

La utilización de demarcaciones superficiales en modelos in vivo e in vitro arrojó resultados dispares incluso para la evaluación de los movimientos simples y, en consecuencia, fue motivo de críticas (Pearcy & Tibrewal, 1984). Por ejemplo, mientras que Lovett (1905) registró a

nivel dorsal una rotación total de 51° a cada lado en uno de sus modelos, Gregersen & Lucas (1967) midieron en promedio en su investigación un total de 74° de rotación total de lado a lado. Steindler, en 1955, según una revisión de White (1969), reportó 40° de rotación media a cada lado en el raquis dorsal.

El uso de imágenes radiográficas para el estudio de los movimientos de la columna in vivo data de los estudios de Virchow (1928) y Dittmar (1930). Mientras que el primero tan solo estudió los movimientos de flexo extensión en la columna cervical, el segundo investigó particularmente el movimiento de inclinación lateral. En un estudio subsiguiente, según una revisión de Lysell (1969), Dittmar determinó que, en el raquis cervical inferior, la inclinación es acompañada por un movimiento de rotación al mismo lado. El estudio radiográfico más completo en el raquis cervical ha sido quizá el realizado por Lysell (1969). El autor investigó la cinemática de la columna en especímenes frescos y determinó cuantitativamente no solo los rangos de movimiento sino también las características de acoplamiento. Así, por ejemplo, especificó la magnitud de rotación conjunta existente por cada grado de inclinación lateral. Para el segundo segmento cervical encontró una relación de 2° de rotación acoplada por cada 3° de inclinación realizada (razón de 2 a 3; o bien de 0,67), mientras que para el séptimo segmento encontró 1° de rotación por cada 7,5° de inclinación (razón de 1 a 7,5; o bien de 0,13). Para los segmentos intermedios, entre C2 y C7, según Lysell, los

valores de acople van disminuyendo entre los dos valores mencionados. En otro estudio contemporáneo al trabajo de Lysell, utilizando imágenes radiográficas, Milles & Sullivan (1961) concluyeron que, en general, a nivel del raquis lumbar, en una inclinación a un lado ocurre una rotación al lado contrario y viceversa. Sin embargo, en una minoría de sujetos, según los investigadores, el comportamiento de rotación se da al mismo lado que la inclinación. A nivel del raquis dorsal, el acoplamiento ha sido pobremente estudiado mediante análisis radiográficos. Una revisión de White (1969) describe que Keller, en uno de los pocos estudios con rayos x a ese nivel, en 1924 halló un acoplamiento homolateral en un estudio de un paciente. Según White (1969), asimismo, en un estudio con modelos in vitro e in vivo, con dos cadáveres y dos niños, Roaf en 1958 no encontró mecanismo de acople vertebral a nivel dorsal.

- Investigaciones biomecánicas

Otras investigaciones han utilizado un enfoque de análisis biomecánico. Estos estudios in vitro han permitido estudiar aspectos tales como la precarga, la postura, la influencia de elementos como el disco, los ligamentos y el rol de las facetas articulares en la mecánica del raquis y han provisto información precisa acerca de los rangos de movimiento principales de la columna (Panjabi et al, 1989). Sin embargo, los resultados concernientes a los MVA no han sido concluyentes.

En un estudio biomecánico clásico del raquis dorsal, White (1969) utilizó especímenes frescos para analizar los movimientos de esa región y sus MVA. En términos generales, sus resultados indicaron que, para un movimiento inicial de inclinación, el raquis dorsal mantiene el mismo patrón de acoplamiento en rotación homolateral que la columna cervical inferior. En particular, determinó que, en el raquis dorsal superior, tomando como vértebra testigo a D2, existe un patrón de acoplamiento en rotación bien definido hacia la concavidad de la curva, es decir, hacia el mismo lado. Para el raquis dorsal medio, evaluando D6, aunque con menos fuerza, esa relación se mantiene. En sus estudios, si bien en esta región en la mayoría de los casos ese comportamiento se conservó, algunos especímenes mostraron un patrón de rotación inverso. Para el segmento dorsal inferior, evaluando D11, White asimismo encontró un acoplamiento en rotación al mismo lado, aunque, de la misma manera, con una tendencia menos fuerte que en el raquis dorsal superior.

Resultados divergentes a los de White fueron encontrados por Panjabi, Brand y White (1976) en otro trabajo en donde asimismo se estudiaron las propiedades mecánicas de la columna dorsal utilizando preparados de laboratorio. Los autores concluyeron que, en todos los niveles dorsales, el movimiento inicial de inclinación es acompañado por un movimiento asociado de rotación al lado contrario.

Panjabi, y otros (1989), en un estudio del raquis lumbar in vitro con especímenes frescos,

llevado a cabo entre los niveles L1-L2 y L5-S1, encontraron acoplamiento entre la inclinación y rotación, y viceversa, tanto en flexión como en posición neutra y extensión. Determinaron que, a nivel lumbar, el acoplamiento no solo depende del nivel evaluado, sino también que es significativamente afectado, en magnitud y dirección, por la posición previa de la columna (White III & Panjabi, 1990). Particularmente, al investigar segmentariamente los MVA, describieron que para el acoplamiento vertebral con iniciación con rotación existe una inclinación al lado contrario para los dos niveles superiores y una inclinación al mismo lado para los dos niveles inferiores, siendo el nivel L3 un sector de transición. Para la iniciación del movimiento con inclinación, los autores también describieron como los patrones dependen del nivel lumbar en cuestión: mientras que a nivel de L1-L2 el acoplamiento es nulo, en el resto del raquis lumbar el comportamiento de acople se manifiesta heterolateralmente.

A su vez, para la evaluación de las posibles modificaciones en el acoplamiento inducidas por la postura, sometieron a su modelo a cinco posiciones en donde evaluaron los MVA: posición neutra, flexión media, flexión total, extensión media y extensión total. Tanto en los movimientos iniciados con rotación como en los movimientos iniciados con inclinación y, a su vez, para todas las posiciones de la columna y para todos los segmentos estudiados, hallaron una relación de acoplamiento heterolateral. Si bien no encontraron modificaciones en la dirección del

acoplamiento en función de los cambios posturales, reportaron en ciertos casos variaciones en la magnitud de dicho acoplamiento dependiendo del nivel evaluado y la posición de la columna. Por ejemplo, a nivel del segmento L2-L3 la posición de extensión produjo una mayor rotación conjunta heterolateral respecto de la posición neutra o de flexión. Por el contrario, en el segmento L5-S1, ante el movimiento inicial de inclinación no se encontraron modificaciones en la magnitud del acoplamiento de rotación contralateral en relación a las distintas posiciones evaluadas.

Vicenzino & Twomey (1993), en un estudio biomecánico in vitro en la columna lumbar, con objetivos similares a los de Panjabi et al (1989), investigaron en cuatro especímenes la rotación conjunta inducida por la inclinación, tanto en flexión como en extensión. En términos generales, determinaron que una inclinación lateral con el raquis en extensión produce, observando y ponderando los valores promedio de todos los segmentos a la vez, una rotación al lado contrario, mientras que una inclinación en flexión produce una rotación al mismo lado. Ahora bien, al analizar individualmente las diferentes unidades vertebrales, reportaron que la dirección del acoplamiento varía de nivel a nivel entre los segmentos L1-L2 y L4-L5, tanto en flexión como en extensión. Solo para el nivel L5-S1 los investigadores no encontraron relación de acoplamiento en rotación estadísticamente significativa. Al igual que Panjabi et al (1989) los autores concluyeron que el MVA a nivel lumbar

es afectado tanto por la postura como por el nivel evaluado. En el mismo estudio, no encontraron asociación entre el acople vertebral y la geometría facetaria ni tampoco asociación con el grado de degeneración de las articulaciones.

En otro estudio, Panjabi y colaboradores (1994) estudiaron las propiedades mecánicas de la columna lumbar y lumbosacra en 9 preparados in vitro. En uno de sus experimentos, ante la aplicación de un momento de flexión lateral de 10Nm, encontraron que el movimiento principal de inclinación lateral fue máximo en el nivel L2-L3, promediando los 5° a cada lado, mientras que en los restantes niveles los valores encontrados fueron levemente inferiores. Al mismo tiempo, hallaron una rotación axial acoplada al lado contrario para todo el raquis lumbosacro, con una amplitud promedio menor a un grado para los niveles L1-L2, L2-L3 y L3-L4 y de entre 1 y 2 grados para los segmentos L4-L5 y L5-S1, siendo la diferencia entre ambos grupos estadísticamente significativa. Interesantemente, reportaron la existencia de un momento de flexión de una media de 2 grados, simultaneo a la rotación automática.

En una investigación biomecánica in vitro donde se estudiaron las propiedades de la columna cervical en relación a cargas aplicadas, Moroney, Schultz, Miller, & Andersson (1988), encontraron que en respuesta a la generación de un momento de inclinación lateral se produce una rotación al mismo lado respecto del movimiento principal. Registraron que, ante la aplicación de 1,8 NM en flexión lateral, se producen en

promedio $4,71^\circ$ de inclinación y en forma conjunta $1,5^\circ$ de rotación axial, representando una relación de 0,32. Es decir, por cada 1° de inclinación, se producen $0,32^\circ$ de rotación asociada.

Si bien algunos estudios describieron la presencia de acoplamiento a nivel lumbar, en cambio, en otros estudios biomecánicos in vitro similares, autores tales como Rolander (1966) o Schultz (1979) no reportaron la existencia de dichos patrones, o bien sus resultados fueron inconsistentes. Estas discrepancias podrían deberse tanto a las grandes variaciones existentes entre los tipos de carga aplicada como a la forma en que esas cargas fueron suministradas (Cholewicki et al, 1996).

Los estudios biomecánicos in vitro han resultado poseer mayor nivel de precisión que otros estudios in vivo, tales como la radiografía uni o biplanar. Sin embargo, han sido criticados por alejarse de situaciones clínicas o funcionales. En ese sentido, los investigadores biomecánicos han recurrido en sus trabajos a la estrategia de establecer recurrentes comparaciones con estudios in vivo para cotejar y respaldar sus propios resultados (Panjabi, Oxland, Yamamoto, & Crisco, 1994).

- Surgimiento de estudios de imágenes tridimensionales para la cuantificación del mecanismo de acople

Las inconsistencias de los resultados de las evaluaciones de los patrones de acoplamiento con métodos por imágenes in vivo e in vitro demostró

la insuficiencia de la valoración uniplanar de mecanismos de acople que ocurren en los tres planos del espacio. Así, se desarrolló un nuevo método basado en la utilización de radiografía biplanar y en la demarcación de referencias óseas superficiales (landmarks en inglés) para permitir la integración computacional de las imágenes de ambos planos (para una revisión del método, ver Matteri, R., Pope, M., & Frymoyer, J., 1976).

La idea de reconstruir una imagen tridimensional a partir de las radiografías en los perfiles A-P y lateral fue utilizada por Stokes y colaboradores (Stokes, Wilder, Frymoyer, & Pope, 1981) para analizar los MVA en pacientes sanos y con dolor lumbar. Los autores registraron la existencia de acoplamiento en todos los niveles, independientemente de la presencia o ausencia de patología. El acoplamiento de inclinación-rotación descrito a nivel lumbar fue el mismo que el hallado en algunos otros trabajos, es decir, de sentido heterolateral. Sin embargo, encontraron que tanto los rangos de movimiento simples, así como la naturaleza de algunos de los MVA, eran modificados en condiciones patológicas. Por ejemplo, en el caso de niveles lumbares con discos herniados posteriormente, describieron dos tipos posibles de comportamiento asimétrico en las articulaciones intervertebrales correspondientes al nivel afectado, en comparación con niveles sanos. Por un lado, describieron la aparición de un movimiento acoplado de flexión en la inclinación a un lado, con el posible objeto de prevenir el estrechamiento del foramen de ese lado. Por otro

lado, hallaron una verdadera “inmovilización” de la vértebra al realizar el movimiento de inclinación. Así, los investigadores sugirieron utilizar la evaluación de estos movimientos como técnica o herramienta diagnóstica para el hallazgo de rupturas discales.

En otro trabajo con técnica biplanar, Percy y Tibrewal (1984), reportaron resultados similares a los trabajos de Gregerson (1967) para los movimientos simples de rotación lumbar, con excepción del nivel lumbosacro. Para los movimientos acoplados de inclinación-rotación, sugirieron que la relación entre ambos movimientos, independientemente del movimiento inicial, no es consistente en los diferentes niveles. Específicamente, para la iniciación con inclinación, analizando el promedio de los resultados, encontraron que en los tres niveles lumbares superiores la rotación conjunta se dio en forma contralateral; para el segmento L4-L5 existió variabilidad en el sentido de la rotación; mientras que, para el nivel L5-S1, la rotación ocurrió generalmente al mismo lado. Similares relaciones de acoplamiento hallaron para la iniciación con rotación. En los tres primeros niveles la rotación fue acompañada de inclinación heterolateral. En el segmento L4-L5 algunos individuos exhibieron una inclinación conjunta al mismo lado y otros al lado opuesto, mientras que en el nivel L5-S1, cuando existía un comportamiento de acoplamiento, este se daba con una inclinación al mismo lado.

En otro estudio de radiografía biplanar realizado por asimismo por Percy (1985), el

autor reportó resultados muy similares al trabajo anterior. Para los movimientos iniciados con inclinación lateral, halló una rotación al lado contrario en los segmentos L1-L2, L2-L2, L3-L4 y L4-L5, mientras que encontró una rotación homolateral en el segmento L5-S1. A su vez, interesantemente, en los niveles superiores, entre L1 y L3 esos MVA estuvieron asociados asimismo con un componente de extensión. El nivel L4-L5 mostró mayormente un componente de extensión, mientras que L5-S1 se comportó con un patrón de flexión asociado a la inclinación-rotación.

A nivel del raquis cervical, Mimura y otros (1989) utilizaron la misma técnica de radiografía biplanar en 20 sujetos sanos para investigar los movimientos simples y acoplados durante la rotación de la columna. Así, determinaron que a nivel de C0-C1, C1-C2 y C2-C3 la inclinación lateral se da en forma contralateral a la rotación inicial, mientras que desde el nivel C3-C4 hasta el segmento C6-C7 la inclinación se produce hacia el mismo lado.

Si bien el uso de técnicas biplanares in vivo ha aportado información clínicamente valiosa (Lim, y otros, 1997), ha habido asimismo preocupación por su precisión, en parte, en relación a la necesidad de uso de demarcaciones superficiales (Ochia, y otros, 2006; Ishii y otros, 2006). A su vez, la precisión del método biplanar había sido determinada en aproximadamente 1,5° para la rotación axial, siendo al mismo tiempo los valores encontrados de rotación conjunta en esos estudios inferiores a 2° (Percy & Tibrewal,

1984). A pesar de ello, durante cierta etapa fue la única herramienta capaz de representar movimientos acoplados intervertebrales en sujetos vivos (Ishii, y otros, 2006).

- Evaluación de los MVA mediante sensores 3D

La metodología de medición 3D mediante la colocación de demarcaciones superficiales en la piel fue asimismo utilizada por Williems & Jull (1996). En contraposición a los estudios previos que recurrían a esta técnica, utilizaron sensores adosados a la piel y un sistema de medición electromagnética que permitía capturar su posición y orientación en el espacio. Así, los investigadores lograron un alto nivel de precisión (error menor a $0,1^\circ$) y una alta repetibilidad (error menor a $0,2^\circ$) en las medidas (Percy & Hindle, 1989). De esta manera, evaluaron en 60 pacientes jóvenes los movimientos simples y conjuntos en la columna dorsal. Los autores colocaron sensores en los niveles T1, T4, T8 y T12, y lograron así, para el análisis, dividir la columna torácica en las regiones alta (T1-T4), media (T4-T8) y baja (T8-T12). En resumen, reportaron que en las zonas media y baja la rotación conjunta se da mayormente de forma homolateral al movimiento inicial de inclinación. Sin embargo, en la región dorsal alta encontraron una incidencia similar de patrones de acoplamiento en rotación homolateral y contralateral en los sujetos evaluados.

En conjunto con la tecnología de dispositivos electromagnéticos, se desarrollaron otros métodos 3D capaces de registrar el movimiento continuo a través de sensores externos tales como

los sistemas optoelectrónicos, los electrogoniómetros triaxiales (Dvorak, Vajda, & Grob, 1995) y los sistemas giroscópicos (Lee, Laprade, & Fung, 2003). Este último método, basado en el uso de un giroscopio como sensor principal, con el objeto de medir la velocidad angular, la orientación y la posición de la columna fue ganando aceptación gracias a la posibilidad de su relativamente sencilla aplicación clínica en el consultorio y debido a la facultad del sistema de registrar el movimiento en tiempo real (Ha, Saber-Sheikh, & Moore, 2013).

Lee, Laprade & Fung (2003) realizaron un estudio con el propósito de examinar la confiabilidad del método giroscópico en la medición del movimiento global de la columna lumbar. En su experimento, colocaron dos sensores sobre los procesos espinosos de L1 y S1, en 19 sujetos jóvenes de ambos sexos. Los investigadores evaluaron los movimientos simples y conjuntos del raquis lumbar y concluyeron que durante la inclinación lateral voluntaria se observa un componente de rotación axial en ese sector de la columna. Si bien encontraron variación en la dirección de la rotación entre los sujetos, la media registrada de rotación axial fue de signo contrario a la inclinación, indicando que en la mayoría de los sujetos se produjo una rotación contralateral. De la misma, ante el movimiento iniciado con rotación, en la mayoría de los sujetos se registró una inclinación al lado contrario. Se hallaron asimismo patrones de acoplamiento en el plano sagital acompañando la inclinación-rotación y la

rotación-inclinación. Sin embargo, la dirección y magnitud de este tipo de acoplamiento fue inconsistente entre los diferentes sujetos.

En línea con la investigación de Lee, asimismo, Ha y colaboradores (2013), validaron el método de sensores inerciales giroscópicos midiendo en la columna lumbar de 26 pacientes jóvenes los rangos de movimientos simples y acoplados, utilizando como referencia el sistema de sensores electromagnéticos. Tal como en ese estudio, hallaron un componente de rotación contralateral al movimiento inicial de inclinación para la columna lumbar en general. Sin embargo, al contrario que Lee, para el movimiento primario de inclinación registraron un marcado acoplamiento asociado en flexión.

Narimari & Arjman (2018) realizaron experimentos similares utilizando sensores inerciales. Los investigadores fueron los primeros que lograron medir los movimientos simples y conjuntos de la columna en forma simultánea en las regiones dorsal, lumbar y sacra. Más aún, este trabajo fue probablemente el primer estudio moderno que logro evaluar los movimientos conjuntos del raquis dorsal en posición de pie. Los autores utilizaron sensores en los segmentos T1, T5, T12 y S1 para arribar a conclusiones más bien generales en los segmentos torácicos y lumbar. Para el raquis dorsal, concluyeron que los datos fueron inconsistentes, pero encontraron ciertas tendencias. Ante la inclinación lateral, en la mayoría de los sujetos la rotación conjunta se dio al mismo lado que la inclinación (en el 75% y el 85% de los sujetos para sus lados izquierdo y

derecho, respectivamente). Sin embargo, al analizar la columna dorsal discriminando la zona alta (T1-T5) y baja (T5-T12), se reportó un mayor acoplamiento homolateral en la región superior que a nivel inferior. A su vez, se registraron muchas inconsistencias en los resultados entre las mediciones a izquierda y derecha. A nivel lumbar, también existió una leve tendencia en rotación, ahora contralateral, ante a la inclinación (en el 55% y 65% de los sujetos para sus lados izquierdo y derecho, respectivamente).

- Evaluación de los MVA mediante metodologías 3D con alto nivel de precisión: RMN y TAC

A partir del uso de RMN y TAC, se comenzaron a desarrollar metodologías de análisis 3D de los MVA con mayor nivel de precisión. Por ejemplo, adaptando una metodología que utilizaba cortes paralelos de imágenes de tomografía axial computada (Lim, et al., 1997), Ochia y otros (2006) determinaron in vivo los valores de rotación de la columna lumbar y los MVA de inclinación, logrando una precisión de 0,2° para la rotación, en medidas repetidas. En una muestra de 15 sujetos asintomáticos evaluados en posición neutral supina, registraron que, ante una rotación axial, la inclinación lateral conjunta ocurre en forma contralateral en los niveles L1-L2 a L4-L5, mientras que se da en forma homolateral en el segmento L5-S1. Los valores medios reportados de inclinación lateral fueron de -1,6° en L1, de -3° en L2-L3, de -3,4° en L3-L4 y de -1,6° en L4-L5, todos en sentido contralateral a la rotación axial. En el segmento

L5-S1 se reportó un valor de 0,6 en el mismo sentido de la inclinación lateral.

Resultados similares a los de Ochia (2006) fueron reportados por Fujii y otros (2007), en un estudio a nivel lumbar con RMN 3D realizado en 10 sujetos asintomáticos en posición supina. La precisión de este método había sido reportada previamente por Ishii y otros (2006) y consistía en 0,43° para la rotación axial y 0,31° para la inclinación lateral. Frente al movimiento principal de rotación, los investigadores encontraron un componente de acoplamiento de inclinación contralateral en los niveles L1-L2 a L4-L5, y de inclinación al mismo lado en el nivel L5-S1 (y en D12-L1).

En un estudio funcional de la columna lumbar en posición de pie, Shin (2013) coincidió solo parcialmente con los resultados de los dos estudios previos. Los autores utilizaron una técnica novedosa en donde integraron computacionalmente la información de dos métodos de diagnóstico por imágenes con el objeto de analizar las características in vivo de la rotación activa y funcional de la columna, así como los MVA de inclinación. Así, en una primera instancia escanearon mediante RMN a ocho pacientes asintomáticos para, en una segunda instancia, someterlos a una prueba funcional con carga en rotación axial mientras se registraban los movimientos mediante un sistema de fluoroscopia dual. Los autores, que por las limitaciones del método utilizado registraron los movimientos de la columna entre los segmentos L2 y S1, hallaron una relación de acoplamiento en

inclinación contralateral a la rotación, en los segmentos L2-L3 y L3-L4. Asimismo, encontraron un patrón de acoplamiento en inclinación homolateral en los niveles L4-L5 y L5-S1 para el movimiento inicial de rotación.

A nivel dorsal, Fujimori y otros (2014) llevaron a cabo un estudio biomecánico 3D in vivo mediante el uso de TAC. La precisión de este método había sido validada previamente: el error medio había sido calculado en 0,21° para la inclinación y 0,13° para la rotación (Fujimori T., et al., 2012). Los autores investigaron en 15 sujetos sanos los movimientos simples y acoplados de la región torácica en relación a la inclinación lateral de la columna. Así, encontraron que el acoplamiento en rotación axial se presenta mayormente en el mismo sentido que la inclinación inicial. Se reportaron valores medios de rotación conjunta para cada vértebra en un rango de entre -0,3° y 0,7°. Es ese estudio, la inclinación-rotación homolateral ocurrió con una frecuencia de entre el 40% y el 90% en los sujetos investigados. La mayor variabilidad entre los sujetos se dio entre los segmentos D2-D3 y D5-D6, siendo el nivel D3-D4 el único que en promedio mostró un patrón de acoplamiento contralateral. Los autores atribuyeron estos hallazgos a la posición en la que fueron evaluados los participantes. La posición supina podría haber provocado una compresión del plano de apoyo contra la escápula y, a su vez, de esta contra el raquis dorsal, justamente en esos niveles, impidiendo la libre rotación de las vértebras. Interesantemente, para los niveles dorsales

superior y medio, los investigadores hallaron que los movimientos de inclinación-rotación estuvieron también acompañados de un movimiento leve de flexión. Para el raquis dorsal inferior, se produjo al mismo tiempo un MVA de leve extensión.

En otro estudio, ahora a nivel cervical, Ishii y otros (2006) evaluaron in vivo los movimientos acoplados durante la inclinación lateral utilizando RMN 3D. Reportaron valores promedio de inclinación máxima de 1,9° en C0-C1; 1,6° en C1-C2; 3,7° en C2-C3; 3,5° en C3-C4; 4,3° en C5-C6; 5,7° en C6-C7; y 4,1° en C7-D1. Al analizar la rotación conjunta, registraron en el raquis cervical superior un comportamiento heterolateral, con valores de 0,2° y 17,1° para C0-

C1 y C1-C2 respectivamente. Para el raquis cervical inferior, observaron un patrón de rotación homolateral, con excepción del nivel C7-D1. Así, señalaron valores promedio de 0,9° para C2-C3; 1,8° para C3-C4; 1,1° para C4-C5; 1,2° para C5-C6; 0,8 para C6-C7; y 0,4° (heterolateral) para C7-D1.

Resumen de hallazgos

Se presenta un resumen de los principales hallazgos en las diversas investigaciones. Se exponen en este apartado los resultados de trabajos con movimientos acoplados iniciados con inclinación lateral. Se incluyen solamente autores que realizaron investigaciones cuantitativas.

Tabla 4. Movimientos acoplados de ROTACIÓN CERVICAL ante la inclinación lateral (posición neutra del raquis)

Autor	Nivel							
	C0-C1	C1-C2	C2-C3	C3-C4	C4-C5	C5-C6	C6-C7	C7-D1
Lysell (1969)	N/R	N/R	H	H	H	H	H	
Moroney y otros (1988)	N/R	N/R	H	H	H	H	H	
Mimura (1989)	C	C	C	H	H	H	H	
Ishii (2006)	C	C	H	H	H	H	H	C

N=neutro; H=homolateral; C=contralateral; H/C = resultados inconsistentes, comportamiento tanto homolateral como contralateral; N/R= no reportado

Tabla 5. Movimientos acoplados de ROTACIÓN DORSAL ante la inclinación lateral (posición neutra del raquis)

Autor	Nivel										
	D1-D2	D2-D3	D3-D4	D4-D5	D5-D6	D6-D7	D7-D8	D8-D9	D9-D10	D10-D11	D11-D12
Gregerson & Lucas (1967)	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	C
White (1969)		H+++				H++					H+
Panjabi (1976)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Willems & Jull (1996)	H/C			H/C				H			H
Fujimori & otros (2014)	H	H/C	H/C	H/C	H/C	H	H	H	H	H	H
Narimari & Arjman (2018)*	DE D1	←←←←	H+++	→→→→	A D5		DE D5	←←←←	H+	→→→→	A D12

N=neutro; H=homolateral; C=contralateral; H/C = resultados inconsistentes, comportamiento tanto homolateral como contralateral; N/R= no reportado *En las investigaciones con sensores se han reportado resultados globales de la columna lumbar

Tabla 6. Movimientos acoplados de ROTACIÓN LUMBAR ante la inclinación lateral (posición neutra del raquis)

Autor	Nivel				
	L1-L2	L2-L3	L3-L4	L4-L5	L5-S1
Miles (1961) ⁱ	C+/H-	C+/H-	C+/H-	C+/H-	C+/H-
Rolander (1966)	N	N	N	N	N
Gregerson & Lucas (1967)	H	H	H	H	H
Schultz y otros (1979)	H/C	H/C	H/C	H/C	H/C
Stokes (1981)	C	C	C	C	C
Pearcy y Tibrewal (1984)	C	C	C	H/C	H
Pearcy (1985)	C	C	C	C	H
Panjabi y otros (1989)	N	C	C	C	C
Panjabi y otros (1994)	C	C	C	C	C
Lee (2003)*	←←←←←		C	→→→→→	
Ha (2013)*	←←←←←		C	→→→→→	
Narimari & Arjman (2018)*	←←←←←		C	→→→→→	

N=neutro; H=homolateral; C=contralateral; H/C = resultados inconsistentes, con comportamiento tanto homolateral como contralateral; N/R= no reportado; *En las investigaciones con sensores se han reportado resultados globales de la columna lumbar

A continuación, se presenta asimismo un movimiento inicial de rotación a nivel lumbar. Se incluye un breve resumen de los hallazgos correspondientes que incluyen solamente autores que realizaron a las investigaciones que evaluaron el acoplamiento en inclinación lateral ante el

Tabla 7. Movimientos acoplados de INCLINACIÓN LUMBAR ante la rotación (posición neutra del raquis)

Autor	Nivel				
	L1-L2	L2-L3	L3-L4	L4-L5	L5-S1
Pearcy y Tibrewal (1984)	C	C	C	C	H
Panjabi y otros (1989)	C	C	C	H	H
Ochia y otros (2006)	C	C	C	C	H
Fujii y otros (2007)	C	C	C	C	H
Shin (2013)	N/R	C	C	H	H

N=neutro; H=homolateral; C=contralateral; H/C = resultados inconsistentes, con comportamiento tanto homolateral como contralateral; N/R= no reportado

Discusión

La cinemática de la columna, tanto en condiciones normales como anormales, ha sido ampliamente estudiada recurriendo a una miríada de métodos de medición y en muy diversas condiciones experimentales.

Si bien existe cierto consenso acerca de los mecanismos de acople que se originan a nivel cervical, en donde la mayoría de las investigaciones han podido reproducir entre sí prácticamente los mismos resultados, para los niveles dorsal y lumbar no parecería existir un patrón definido. En ese sentido, no se ha observado un comportamiento unívoco que se

desarrolle en todos los segmentos de esas dos zonas en una posición determinada de la columna. Tampoco parecería existir un mecanismo de acople consistente para la totalidad de los segmentos que constituyen cada sector del raquis, en una posición dada. Más bien, parecerían manifestarse ciertas tendencias de acople, que pueden o no estar presentes en la mayoría de los niveles de un sector y en la mayoría de los casos.

En el raquis cervical, los estudios de Ishii (2006), realizados mediante RMN 3D, parecerían confirmar las observaciones realizadas por casi la totalidad de los estudios previos. El mecanismo de acople en rotación ante la flexión lateral a nivel del C0-C1 y C1-C2 se produce

contralateralmente, mientras que entre C2-C3 y C6-C7 el movimiento conjunto de rotación se da al mismo lado que la inclinación lateral.

A nivel dorsal, contemplando los resultados de las investigaciones 3D con mayor nivel de precisión, en posición neutra del raquis, el MVA de rotación asociados a una inclinación parecería darse mayormente en forma homolateral. En ese sentido, el estudio biomecánico in vivo con TAC realizado por Fujimori y otros (2014) reportó resultados similares al estudio in vivo con sensores y medición electromagnética llevado a cabo por Williems & Jull (1996). En ambos casos, en el raquis dorsal superior los resultados fueron inconsistentes, con una leve tendencia a la rotación al mismo lado en el caso del estudio de Fujimori. Al mismo tiempo, para las zonas torácicas media e inferior ambos trabajos concluyeron que la inclinación-rotación de realiza en una mayoría de los casos en forma homolateral. El estudio 3D con sensores inerciales en posición de pie llevado a cabo por Narimani y Anjmand (2018) mostró tendencias generales similares, aunque asimismo se reportó gran variabilidad en los resultados. En estudios anteriores, tanto Gregerson & Lucas (1967) como White (1969) habían determinado que a nivel de toda la columna dorsal la rotación se realiza al mismo lado que la inclinación inicial. White & Panjabi (1990) concordaron con dicho patrón de acoplamiento uniforme a lo largo de toda la columna dorsal. En la literatura osteopática, Ward (2003) establece esos mismos patrones en uno de sus textos. Sin embargo, el consenso osteopático

basado en las investigaciones de Fryette ha mantenido una posición contraria, describiendo un movimiento conjunto de rotación contralateral ante la inclinación en una postura neutra del raquis dorsal.

Sizer, Brismée, & Cook (2007) realizaron una revisión sistemática del comportamiento de acoplamiento de la columna dorsal considerando estudios in vivo e in vitro 3D y concluyeron que los hallazgos sugerían que los patrones de acoplamiento en ese nivel del raquis son inconsistentes. No obstante, debido a las diferencias metodológicas encontradas en los diferentes estudios incluidos, los autores atribuyeron potencialmente a esa causa las diferencias encontradas.

El mecanismo de acoplamiento en el raquis lumbar parecería ser, asimismo, complejo. En posición neutra, ante el movimiento principal de inclinación lateral habría una tendencia leve al acoplamiento en rotación al lado opuesto en la mayoría de los segmentos. A esa conclusión general arribaron con sus investigaciones con sensores tanto Lee (2003), Ha y colaboradores (2013), así como Narimani & Anjmand (2018). En ese sentido, Percy y Tibrewal (1984), a través del método in vivo de radiografía biplanar, también encontraron una relación de acoplamiento heterolateral en los niveles L1-L2, L2-L3 y L3-L4, aunque, a su vez, describieron un MVA al mismo lado en el nivel L5-S1. Panjabi y colaboradores (1989), en una de sus investigaciones biomecánicas in vitro, reportaron resultados similares, estableciendo, ante un

movimiento de inclinación lateral, un MVA en rotación contralateral para los niveles L2-L3, L3-L4, L4-L5 y L5-S1, aunque hallaron un acoplamiento nulo a nivel L1-L2. En un estudio radiográfico clásico en la zona lumbar Milles y Sullivan (1961) habían reportado una rotación al lado contrario ante la inclinación lateral. Sin embargo, también describieron un MVA de rotación homolateral en algunos sujetos. En el caso de del MVA con movimiento inicial de inclinación, para el raquis lumbar no se han desarrollado a la fecha estudios 3D con RMN o TAC que permitan corroborar la evidencia actual.

Para el movimiento inicial de rotación, los estudios 3D de Ochia y otros (2006) y de Fujii y otros (2007) determinaron que la inclinación lateral conjunta ocurre en forma contralateral en los niveles L1-L2 a L4-L5, mientras que se da en forma homolateral en el segmento L5-S1. Estos hallazgos habían sido reportados mediante un estudio de radiografía 2D por Pearcy y Tibrewal (1984), quienes encontraron un MVA de inclinación heterolateral en los niveles L1-L2, L2-L3 y L3-L4 y homolateral a nivel L5-S1. Panjabi y otros (1989) mediante un estudio biomecánico, habían arribado a conclusiones parcialmente similares, al señalar para este tipo de acoplamiento una inclinación al lado opuesto en L1-L2 y L2-L3 y al mismo lado en los segmentos L4-L5 y L5-S1. Los resultados de todos estos estudios con un movimiento inicial de rotación parecerían sugerir una tendencia al acoplamiento en inclinación contralateral en el raquis lumbar superior y medio, hasta el nivel L3-L4,

inconsistencias en el nivel L4-L5 y un acoplamiento homolateral bien definido en el segmento lumbosacro.

A nivel lumbar, solo dos estudios han explorado y cuantificado las relaciones de acoplamiento entre la inclinación y la rotación conjunta, con componentes de flexión o extensión previos. Panjabi y otros (1989) encontraron que tanto en flexión como en extensión se mantenía el mismo mecanismo de rotación contralateral que se presentaba en posición neutra. Vincenzino & Twomey (1993), en cambio, reportaron un MVA contralateral con la columna en extensión y una rotación conjunta homolateral con el raquis lumbar en flexión. Sin embargo, los investigadores encontraron gran variabilidad en la dirección de la rotación presentada por cada uno de los niveles tanto en flexión como en extensión.

Si se establece una rigurosa comparación, la mayoría de los estudios expuestos en esta revisión han presentado resultados conflictivos o parcialmente contradictorios entre sí, evidenciando así la imposibilidad de establecer patrones definidos de MVA para amplias regiones de la columna. Este hecho contrasta con la pretendida descripción de teorías generales de acoplamiento o, más aún, con la definición de leyes que regirían la mecánica de acople para el raquis en su conjunto. Por ejemplo, tomando en consideración al raquis dorsal y lumbar, existe amplia evidencia en contra de la hipótesis que sostiene que, en posición neutra, ante una inclinación lateral, el acoplamiento automático se

de en forma contralateral en ambos sectores de la columna. Este comportamiento vertebral, que ha sido denominado por la convención osteopática como mecánica neutral o de tipo I y que ha sido resumido en la primera ley de Fryette, no puede ser sostenida por la evidencia actual en forma general para el conjunto del raquis dorsolumbar. La evidencia disponible actualmente tampoco permite corroborar y más bien refutaría las definiciones establecidas por el consenso osteopático en la llamada segunda ley de Fryette, la cual dicta que en la mecánica no neutra o de tipo II, es decir, tanto con el raquis en flexión como en extensión, la asociación entre la inclinación y la rotación se da en forma homolateral.

El estudio de los mecanismos de acople vertebral en condiciones fisiológicas ha suscitado especial interés debido a que los mismos podrían verse modificados en ciertas condiciones patológicas o disfuncionales de la columna. Si bien este hecho ha sido ampliamente documentado, la complejidad que subyace a los propios MVA investigados en sujetos sanos dificulta la descripción de reglas generales que puedan establecer, incluso para una región del raquis en particular, la dirección y magnitud esperable de asociación entre la inclinación y la rotación, tanto en condiciones normales como anormales. A pesar de ello, las diversas teorías de acoplamiento vertebral han pretendido describir de manera determinista las supuestas reglas que invariablemente gobiernan la mecánica del raquis.

La exploración clínica y, muy particularmente, el análisis de los movimientos de la columna forma parte de la evaluación del paciente, que puede colaborar a la elaboración de un diagnóstico correcto. Algunas especialidades han recurrido al examen de la movilidad en uno o múltiples planos del raquis en combinación con procedimientos palpatorios para analizar el posible carácter funcional o disfuncional de ciertas regiones de la columna o de segmentos vertebrales en particular. En ese sentido, las leyes de Fryette se han utilizado como un modelo predictivo para formular un diagnóstico mecánico y, al mismo tiempo, para seleccionar la técnica terapéutica correcta (Gibbons, 1998).

En relación al examen del raquis en condiciones posiblemente disfuncionales, las dos investigaciones de Panjabi (1989) y Vincenzino y Twomey (1993), si bien son estudios *in vitro*, revisten particular interés para la terapia manual y la osteopatía. Al asociar a los movimientos conjuntos de inclinación y rotación un componente previo de rotación en el plano sagital, han logrado reproducir un acoplamiento de tipo complejo, de gran importancia clínica según estas escuelas. Los resultados encontrados en promedio por Vincenzino & Twomey (1993) parecerían sostener la idea original de Fryette, más tarde también descrita por Stoddard, de rotación contralateral en extensión y de rotación homolateral en flexión, ante la inclinación lateral. Sin embargo, la variabilidad en los resultados obtenidos en ese estudio y las diferencias respecto de un trabajo similar de Panjabi (1989), de

resultados dispares a los de Vincenzino, no permiten arribar a una conclusión definitiva respecto de la mecánica de acople existente entre la inclinación-rotación en diversas posiciones de flexoextensión del raquis lumbar. Para este caso particular de movimientos complejos, se precisaría incorporar nueva evidencia, proveniente de estudios funcionales con alto nivel de precisión en las medidas.

Tomando en consideración la evidencia presente en su conjunto, recurrir en la clínica al análisis de los MVA y, en particular, a la utilización de ciertas normas o leyes de tipo general para establecer un diagnóstico certero en el raquis sería una práctica improcedente, al menos en las regiones dorsal, lumbar y sacra. El examen de estas zonas de la columna a través de la utilización de tests de movilidad, asociados con procedimientos palpatorios que indaguen en la mecánica de acople vertebral, podría derivar en diagnósticos incorrectos y, en definitiva, en la selección de técnicas o tratamientos inapropiados para el paciente.

Si bien en forma general existen amplias inconsistencias en los reportes de los MVA a nivel dorsal y lumbosacro, algunos de los trabajos han llegado a resultados sorprendentemente similares en sectores localizados del raquis, en forma independiente del método de medición utilizado. Por ejemplo, en la columna lumbar, ante el movimiento inicial de rotación, el segmento L5-S1 parecería moverse con un patrón de inclinación homolateral. De la misma manera, los segmentos altos de la columna lumbar, aunque

con mayor disparidad entre los estudios, parecerían seguir un patrón de inclinación heterolateral ante la rotación. Asimismo, ante el movimiento inicial de inclinación en posición neutra, el raquis lumbar parece comportarse con un movimiento automático de rotación al lado contrario. Si bien ha habido relativo consenso entre los diferentes investigadores, algunos estudios muestran resultados inconsistentes. En ese sentido, resulta interesante observar cómo los niveles de transición L1-L2 y L5-S1 parecerían no siempre acompañar el mecanismo de acople mayormente manifestado en el conjunto de la columna lumbar. En la columna dorsal, en el mismo sentido, ante el movimiento inicial de inclinación, en posición neutra en el plano sagital, la rotación conjunta parecería darse en forma homolateral, sobre todo a nivel medio y bajo. Sin embargo, ha habido discrepancias entre los resultados hallados en la zona torácica superior y, en general, algunas inconsistencias.

Estos patrones encontrados abren la posibilidad, por un lado, de proseguir con investigaciones que confirmen estos hallazgos. Por otro lado, futuros estudios deberían indagar acerca de las características más bien particulares y específicas de cada nivel vertebral en relación a los MVA, en conjunto con los múltiples factores de los que depende ese acoplamiento. Así, la confirmación de la evidencia empírica actual podría dar lugar al desarrollo de pruebas diagnósticas de diversa índole basadas en el acoplamiento vertebral, en aquellas unidades vertebrales en donde no queden lugar a dudas

acerca de la mecánica de acople que se manifiesta tanto en condiciones funcionales como disfuncionales. En oposición al enfoque actual, estos tests podrían aplicarse en forma altamente específica por sector vertebral. En relación a los factores determinantes del acoplamiento, como requisito previo al desarrollo de nuevos test diagnósticos, se precisa disponer de investigaciones que exploren in vivo y funcionalmente las relaciones entre determinadas condiciones del paciente, ciertas patologías o disfunciones del raquis y los MVA en forma localizada.

Si bien la metodología de análisis segmentario de la mecánica de acople es posible, a la hora del desarrollo de tests estrictamente manuales y palpatorios vinculados a los MVA, se hace imprescindible considerar la magnitud del acoplamiento esperable en cada sector del raquis. Los resultados obtenidos a través de los métodos más precisos de medición han reportado, para cada zona de la columna, en el segmento donde se encontró el mayor acoplamiento en cada estudio, valores medios en rotación conjunta de 1,8° a nivel cervical (Ishii y otros, 2006), de 0,7° en rotación a nivel dorsal (Fujimori y otros, 2014) y de 3,4° a nivel lumbar (Ochia & otros, 2006). Mientras que los métodos de diagnóstico por imágenes poseen un error del orden de las décimas de grado, cabría preguntarse si la sensibilidad palpatoria desarrollada por los practicantes, incluso en aquellos más expertos, puede alcanzar esa capacidad de discriminación extrema. En ese sentido, asegurar en particular la

confiabilidad intraobservador e interobservador del procedimiento de evaluación es un requisito clave para garantizar el éxito de la potencial prueba diagnóstica.

A pesar de que la evaluación de la cinemática de la columna in vivo a través de la utilización de sensores inerciales no posee la alta resolución espacial que proveen los métodos de diagnóstico por imágenes como la RMA o la TAC, estos instrumentos han demostrado ser fiables en la medición de los MVA. A su vez, su relativa facilidad de uso, la posibilidad que proveen para realizar mediciones en carga y funcionales, en conjunto con la propiedad de alta resolución temporal y, por ende, la capacidad de obtener datos a lo largo de todo el rango de movimiento y en tiempo real, pueden convertir a estos instrumentos en elementos valiosos en la práctica clínica. Estos dispositivos, a nivel del raquis, se han utilizado mayormente para el análisis del acoplamiento vertebral en zonas relativamente extensas. Nuevas investigaciones utilizando estas tecnologías podrían validar su uso en la evaluación de niveles específicos de la columna y así colaborar al desarrollo de test diagnósticos basados en los MVA.

La investigación del acoplamiento vertebral ha recorrido un camino ciertamente sinuoso. Aunque las explicaciones que proporcionaron los primeros modelos de acoplamiento no pudieron ser confirmadas con evidencia empírica, aquellas teorías inspiraron las más variadas investigaciones. Aún hoy en día, los movimientos vertebrales acoplados siguen siendo blanco de

debates, de análisis y de estudios experimentales. A más de cien años de los primeros trabajos de Lovett, se precisan renovados esfuerzos y aproximaciones que colaboren a establecer el real alcance que puede tener el examen de los MVA en la práctica clínica.

Si bien se han encontrado ciertas tendencias de acoplamiento en algunas regiones del raquis, los MVA parecerían depender de múltiples factores y condiciones de los pacientes como para establecer criterios muy generales. La existencia de reglas o leyes que rijan la mecánica de acople no ha podido ser verificada empíricamente.

El estudio de los MVA podría adoptar, entonces, un enfoque analítico y así lograr el desarrollo de tests diagnósticos específicos por unidades vertebrales o regiones bien localizadas de la columna, basados en la palpación o bien haciendo uso de dispositivos externos de medición.

La tecnología actualmente disponible permite realizar mediciones con mayor nivel de precisión y, al mismo tiempo, facilita la evaluación de sujetos en condiciones funcionales. Así, el comportamiento de acople vertebral sigue siendo un campo prolífero de estudio, pasible de potenciales investigaciones que colaboren al diagnóstico y tratamiento de las disfunciones y patologías de la columna.

Referencias

- Ashmore, E. F. (1915). *Osteopathic Mechanics: A Text Book*. Kirksville, Missouri: Journal Printing Co.
- Bakke, S. (1931). *Rontgenologische Beobachtungen über die Bewegungen der Wirbelsäule. Acta radiol. (Stockh.) Suppl.13*.
- Capobianco, J. D., Protopapas, M. G., & Rivera-Martinez, S. (2002). Understanding the Combined Motions of the C3/C4 Vertebral Unit: A Further Look at Fryette's Model of Cervical Biomechanics. *J Am Acad Osteopath*, 17-32.
- Cholewicki, J., Crisco, J., Oxland, T., Yamamoto, I., & Panjabi, M. (1996). Effects of posture and Structure on Three-Dimensional Coupled Rotations in the Lumbar Spine. *Spine*, 21(21), 2421-2428.
- Cook, C. (2003). Coupling Behavior of the Lumbar Spine: A literature review. *11*(3), 137-145.
- Dittmar, O. (1931). *Rontgenstudien zur Mechanologie der Wirbelsäule. Z Orthop Chir*, 55(321).
- Downing, C. H. (1923). *Principles and Practice of Osteopathy*. Kansas City, Missouri: William Publishing Co.

- Dvorak, J., Vajda, E., & Grob, D. a. (1995). Normal motion of the lumbar spine as related to age and gender. *European Spine Journal*, 4,18-23.
- Fryette, H. (1918). Physiologic Movements of the Spine. *The Journal of the American Osteopathic Association*.
- Fryette, H. (1954). *Principles of osteopathic technic*. Kirksville, Missouri: Journal Printing Company.
- Fryette, H. H. (s.f.). A Discussion of the Physiological Movements of the Spine.
- Frymoyer, J., Frymoyer, W., Wilder, D., & Pope, M. (1979). The mechanical and kinematic analysis of the lumbar spine in normal living human subjects in vivo. *J Biomech*, 12, 165-172.
- Fujii, R., Sakaura, H., Mukai, Y., Hosono, N., Ishii, T., Iwasaki, M., ... Sugamoto, K. (2007). Kinematics of the lumbar spine in trunk rotation: in vivo three-dimensional analysis using magnetic resonance imaging. *European spine journal*, 16(11), 1867-1874.
- Fujimori, T., Iwasaki, M., Nagamoto, Y., Ishii, T., Sakaura, H., Kashii, M., ... Sugamoto, K. (2012). Three-dimensional measurement of growth of ossification of the posterior longitudinal ligament. *J. Neurosurg Spine*, 289-95.
- Fujimori, T., Iwasaki, M., Nagamoto, Y., Matsuo, Y., Ishii, T., Sugiura, T., ... Yoshikawa, H. (2014). Kinematics of the thoracic spine in trunk lateral bending: in vivo three-dimensional analysis. *The Spine Journal*, 14(9), 1991-1999.
- Gibbons, P., & Tehan, P. (1998). Muscle energy concepts and coupled motion of the spine. *Manual Therapy*, 95-101.
- Greenman, P. M. (2003). *Principles of Manual Medicine*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Gregersen, G., & Lucas, D. (1967). An in vivo study of the axial rotation of the human thoracolumbar spine. *JBJS*, 49(2), 247-262.
- Ha, T., Saber-Sheikh, K., & Moore, A. a. (2013). Measurement of lumbar spine range of movement and coupled motion using inertial sensors - a protocol validity study. *Manual Therapy*, 18(1): 87-91.
- Harrison, D., & Troyanovich, S. J. (1998). Three-dimensional spinal coupling mechanics: Part I. A review of the literature. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 21(2), 101-113.
- Ishii, T., Mukai, Y., Hosono, N., Sakaura, H., Fujii, R., Nakajima, Y., ... Sugamoto, K. (2006). Kinematics of the Cervical Spine in Lateral Bending. *Spine*, 31(2), 155-160.

- Ishii, T., Mukai, Y., Hosono, N., Sakaura, H., Nakajima, Y., Sato, Y., ... Yoshikawa, H. (2004). Kinematics of the upper cervical spine in rotation: in vivo three-dimensional analysis. *Spine*, 29(7), E139-E144.
- Kaltenborn, F. M., & Evjenth, O. (2003). Manual Mobilization of the Joints; The Kaltenborn Method of Joint Examination and Treatment. Volume II The Spine. Oslo, Norway.
- Kapandji, A. (1998). Fisiología Articular, Volumen III. Médica Panamericana.
- Krismer, M., Hide, C., Behensky, H., & Kapfinger, P. a. (2000). Motion in Lumbar Functional Spine Units During Side Bending and Axial Rotation Moments Depending on the Degree of Degeneration. *Spine*, 2020-2027.
- Lee, R., Laprade, J., & Fung, E. (2003). A real-time gyroscopic system for three-dimensional measurement of lumbar spine motion. *Medical Engineering & Physics*, 827-824.
- Legaspi, O., & Edmond, S. L. (2007). Does the evidence support the existence of lumbar spine coupled motion? A critical review of the literature. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 169-178.
- Lim, T., Eck, J., An, H., McGrady, L., Harris, G., & Haughton, V. (1997). A noninvasive, three-dimensional spinal motion analysis method. *Spine*, 22(17), 1996-2000.
- Lovett, R. W. (1900). The mechanics of lateral curvature of the spine. *Boston Medical and Surgical Journal*, CXLII(24), 622-627.
- Lovett, R. W. (1903). A contribution to the study of the mechanics of the spine. *American Journal of Anatomy*, 457-462.
- Lovett, R. W. (1905). The mechanism of the normal spine and its relation to scoliosis. *Boston Medical and Surgical Journal*, 349-358.
- Lysell, E. (1969). Motion in the Cervical Spine: An Experimental Study on Autopsy Specimens. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1-61.
- Maitland, G. (2005). Vertebral Manipulation. Butterworth-Heinemann.
- Matteri, R., Pope, M., & Frymoyer, J. (1976). A biplane radiographic method of determining vertebral rotation in postmortem specimens. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 95-98.
- McConnell, C. P. (1920). *The Practice of Osteopathy*. Kirksville, Mo.: Journal Printing Co.

- McManis, J. (1936). Notes on Physiological movements of the spine. *American Osteopathic Association*.
- Miles, M., & Sullivan, W. E. (1961). Lateral Bending at the Lumbar and, Lumbosacral Joints. *The Anatomical Record*, 139(3), 387-398.
- Miller, D. S. (2010). Atypical Pathologic Somatic Dysfunctions: Techniques Revisited. *The AAO Journal*, 20(4), 17-20.
- Mimura, M., Moriya, H., Watanabe, T., Takahashi, K., Yamagata, M., & Tamaki, M. (1989). Three-dimensional motion analysis of the cervical spine with special reference to the axial rotation. *Spine*, 1135-1139.
- Moroney, S., Schultz, A., Miller, J., & Andersson, G. (1988). Load-displacement properties of lower cervical spine motion segments. *Journal of Biomechanics*, 21(9), 769-779.
- Ochia, R. S., Inoue, N., Renner, S. M., Lorenz, E. P., Lim, T.-H., Andersson, G. B., & An, H. S. (2006). Three-Dimensional In Vivo Measurement of Lumbar Spine Segmental Motion. *Spine*, 31(18), 2073-2078.
- Panjabi, M. M., White III, A. A., & Brand Jr., R. (1974). A note on defining body parts configurations. *Journal of Biomechanics*.
- Panjabi, M., Brand Jr., R., & White, A. (1976). Mechanical properties of the human thoracic spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 642-52.
- Panjabi, M., Oxland, T., Yamamoto, I., & Crisco, J. (1994). Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American volume*, 76(3), 413-424.
- Panjabi, M., Yamamoto, I., Oxland, T., & Crisco, J. (1989). How does posture affect coupling in the lumbar spine? *Spine*, 14(9), 1002-1011.
- Panjabi, M., Yamamoto, I., Oxland, T., & Crisco, J. (1989). How does posture affect coupling in the lumbar spine? *Spine*, 1002-1011.
- Pearcy, M. (1985). Stereo Radiography of Lumbar Spine Motion. *Acta Orthopaedica Scandinavica Supplementum*, 1-45.
- Pearcy, M., & Hindle, R. (1989). New method for the non-invasive three-dimensional measurement of human back movement. *Clinical Biomechanics*, 73-79.
- Pearcy, M., & Tibrewal, S. (1984). Axial rotation and lateral bending in the normal lumbar spine measured by three-dimensional radiography. *Spine*, 9(6), 582-587.

- Pearcy, M., Portek, I., & Sheppard, J. (1985). The effect of low-back pain on lumbar spinal movements measured by three-dimensional X-ray analysis. *Spine*, 10(2), 150-153.
- Pope, M. H., Wilder, D. G., Buturla, E., Matteri, R., & Frymoyer, W. W. (1977). *Radiographic and Biomechanical Studies of the Human Spine*. Vermont Univ Burlington Dept Of Orthopaedic Surgery.
- Rolander, S. (1966). Motion of the lumbar spine with special reference to the stabilizing effect of posterior fusion. An experimental study on autopsy specimens. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 37(sup90), 1-144.
- Scholten, P., & Veldhuizen, A. (1985). The influence of spine geometry on the coupling between lateral bending and axial rotation. *Engineering in Medicine*, 14(4), 167-171.
- Schultz, A. B., Warwick, D. N., Berkson, M. H., & Nachemson, A. (1979). Mechanical Properties of Human Lumbar Spine Motion Segments—Part I: Responses in Flexion, Extension, Lateral Bending, and Torsion. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1, 46-52.
- Sizer, P., Brismée, J., & Cook, C. (2007). Coupling Behavior of the Thoracic Spine: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 390-399.
- Stoddard, A. (1969). *Manual of Osteopathic Technique*, 6th. edition. Hutchinson Medical Publications.
- Stokes, I., Wilder, D., Frymoyer, J., & Pope, M. (1981). Assessment of patients with low back pain by biplanar radiographic measurement of intervertebral motion. *Spine*, 6(3), 233-240.
- Vicenzino, G., & Twomey, L. (1993). Sideflexion induced lumbar spine conjunct rotation and its influencing factors. *Australian Journal of Physiotherapy*, 39(4), 299-306.
- Ward, R. C. (2003). *Foundations for Osteopathic Medicine*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- White III, A. A. (1969). Analysis of the Mechanics of the Thoracic Spine in Man: An Experimental Study of Autopsy Specimens. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 40(sup127), 1-105.
- White III, A. A., & Panjabi, M. M. (1990). *Clinical Biomechanics of the Spine (2nd Edition)*.
- Willems, J., Jull, G., & K-F Ng, J. (1996). An in vivo study of the primary and coupled rotations of the thoracic spine. *Clinical Biomechanics*, 11(6), 311-316.

Recibido: Mayo, 2022 • Aceptado: Junio, 2022