

La «ley del péndulo» o como explicar la forma 3D de la columna? Proposición de un esquema biomecánico de una columna ideal. (primera parte)

Norotte Gilles¹

¹ Centre Hospitalier InterCommunal des Alpes du Sud, 1, place A. Muret 05000 GAP (Francia).

Rev. Chil. Neurocirugía 41: 8-13, 2015

Resumen

En introducción, los autores recuerdan los parámetros clásicos que permiten estudiar la forma sagital de la columna siguiendo una semántica vertebral (lordosis, cifosis, parámetros espino pélvicos, balance sagital). Luego, proponen una perspectiva totalmente diferente que analiza la forma de la columna, no en plano sagital o coronal pero en plano vertical, es decir integrando la gravedad como eje de construcción 3D. Comenzando por un análisis del esquema corporal global (del cual forma parte la columna), se introducen las sinergias musculares utilizando puntos de referencia, definiendo líneas de tensión, arcos anatómicos y funcionales. Resaltan la importancia de la función respiratoria como estabilizador de la forma del raquis toraco-lumbar. Esto demuestra que cuales sean las anomalías pélvicas o vertebrales frecuentes, el esquema biomecánico depende de una ley única vinculada a la gravedad: "La ley del péndulo". Esto permite definir una columna "ideal" de referencia, comparándola a modelos opuestos. Evocan el interés semántico práctico y terapéutico de una tal perspectiva.

Palabras clave: Esquema Biomecánico de la Columna, Parámetros Sagitales, Balance Sagital.

Introducción

El hombre es el único primate que presenta una curvatura lumbar en lordosis. Esto asegura su estabilidad bipodal, estrictamente vertical y estable al caminar⁹. La organización de curvaturas sagitales, conocidas desde Hipócrates, es una sucesión de cifosis algo rígidas (sacro, tórax, cráneo) y de lordosis móvil (lumbar y cervical).

La mayoría de autores analizan la columna toraco lumbar muy aparte en un plan estrictamente sagital, utilizando una semántica vertebral angular con el fin de explicar la forma y la biomecánica de la columna. Algunas conclusiones generalmente admitidas en la literatura, surgen de estos trabajos:

- Existe una fuerte relación entre la pendiente sacra y la lordosis lumbar¹¹.
- Roussouly^{8,9,10} define diferentes

parámetros que permiten el estudio sagital de la forma.

* Parámetros espino pélvicos (Incidencia pélvica, pendiente del sacro, pelvis "tilt").

* Propone una segmentación de curvaturas sagitales en función del punto de inflexión, separando lordosis y cifosis afín de obtener cálculos angulares. Pero esos puntos de inflexión son variables.

* La lordosis lumbar es así dividida en dos partes en función del ápex lumbar: Una lordosis inferior, fuertemente relacionada con la pendiente sacra y una lordosis superior (20°) casi constante.

* Finalmente, propone una clasificación de las formas sagitales en cuatro grupos, según la inclinación de la pendiente sacra.

- La balanza sagital es definida en función del cuerpo vertebral de C7,

aparece relativamente estable³. La plomada se refiere ya sea al sacro o al centro de caderas.

- La interdependencia de curvaturas y de la posición de la pelvis son admitidas por la mayoría de autores.
- Estudios estadísticos analizan estos parámetros sobre una gran población Europea⁴.

Pero todos recalcan la gran variabilidad de esos cálculos angulares¹², lo que no permite definir cálculos estándares¹¹. Ninguno propone realmente un esquema relacionando las curvaturas entre sí mismas.

En esta primera parte, proponemos un esquema biomecánico global, que permite de definir una forma ideal de columna en relación a dos modelos opuestos. En segunda parte explicamos la variación del esquema biomecánico de la columna en función de las anoma-

líneas mas frecuentemente **observadas en pacientes lumbalgicos cronicos**. Esta visión diferente se fundamenta en un análisis funcional del esquema corporal (del cual forma parte la columna) en el plano vertical. Es decir, se refiere únicamente a la gravedad como eje de construcción 3D. Son estas reglas que expondremos aquí y que denominaremos “Ley del Péndulo”.

Material y Método

El análisis de la variación entre el espinograma pre y post operatorio de 300 pacientes operados por Alif (stand alone), así que varios pacientes recibidos diariamente en consultación por lumbalgias crónicas, permitieron establecer las reglas del esquema biomecánico corporal propuesto líneas abajo.

A. Construcción de la Columna en el plan vertical

Durante el crecimiento, la columna adquiere su forma contra la gravedad. Las sinergias musculo aponeuróticas tienen como función crear curvaturas sagitales y mantener la anatomía raquídea vertical en los tres planos del espacio. (Sagital, coronal, rotatorio). Estas integran las anomalías corrientes y organizan el esquema biomecánico corporal (del cual forma parte la columna) en función de esta regla gravitacional constante. (Esquema 1).

- Definiremos diferentes puntos resaltantes; sea porque son puntos de contacto de la vertical con las curvaturas (**ápex**), también porque tienen relación con la anatomía (punto de inflexión de curvaturas, pulmón) o simbolizan la inserción musculo aponeurótico (polea de reflexión, punto de inserción).
- La relación entre estos puntos, determinan las líneas de tensión de los arcos anatómicos y/o funcionales. Permitiendo establecer un esquema de organización corporal. Este esquema representa una filosofía funcional:
 - Asegurar la función respiratoria vital, garantizando el equilibrio de las presiones pulmonares a un costo energético menor.
 - Asegurar la independencia de la respiración en función de la locomoción así que la estabilidad y movimiento de la cabeza mediante

curvaturas **móviles** “amortiguantes” (Lordosis lumbar y cervical).
 · El esquema funcional de la columna toraco-lumbar (que es el eje vertical esencial del esquema corporal) es por consecuencia dependiente de la función respiratoria y de su envoltura muscular corporal.

Definición de la “ley del péndulo” (Esquema 1)

En el plano frontal:

- Constatamos que cual sea la estructura “común” de la columna en un adulto, el único punto de referencia entre ellas es que los ápex pulmonares son horizontales, tienen como fin equilibrar las presiones pulmonares en los movimientos respiratorios (estabilización neumática). Las sinergias musculares del esquema corporal son simétricas. El punto de unión (A) del péndulo se define como el punto equidistante entre los dos ápex pulmonares.
- La plomada vertical se mantiene por encima del ápex del sacro (Punto S). De frente este punto S es el punto de confluencia del sistema extensor musculo aponeurótico.
- Al andar el péndulo se mantiene verticalmente (tronco) a pesar de los movimientos oscilatorios de la pelvis, cuyo eje de rotación es el punto S. Cuando el tronco está en movimiento, el péndulo materializado por el punto E (equilibrio de sinergias musculares) regresa enseguida a su lugar de reposo. La altura del punto (E) depende de la forma sagital.
- En la mayoría de casos, las anomalías corrientes vertebrales (rotatorias y/o sagitales) o pélvicas (inclinación del sacro) y las alteraciones dege-

nerativas afectan poco esta “regla” cuestionada por las anomalías rotatorias mayores que salen del cuadro. Podemos entonces hablar de estabilización neumática como una lógica para la edificación vertical de la columna toraco-lumbar y del esquema corporal.

En el plano sagital:

Dos imperativos:

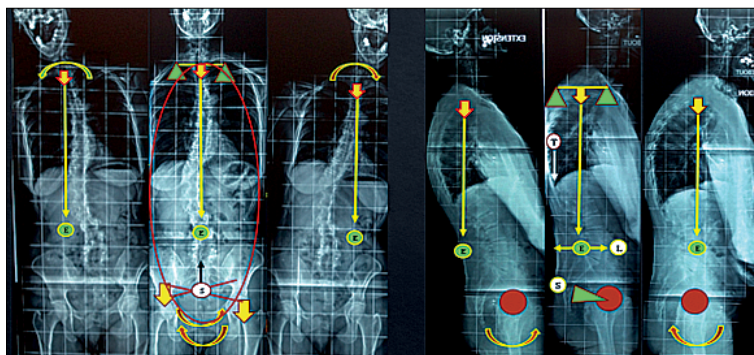
1.- Estabilizar el zócalo (la pelvis) sobre el cual se construye el edificio corporal

La línea que une el ápex del sacro (S), el centro de las cabezas femorales (F) y la sínfisis púbica (Y) constituye el zócalo pélvico. En movimiento alrededor de (F) pero muscularmente estabilizado por las sinergias musculares antagónicas (glúteos, psoas, aductores) de los miembros inferiores.

Cuales sean las formas sagitales “comunes” de la columna subyacente, el ángulo dado del segmento S/F con la horizontal es de una fijeza considerable. Definiendo “el ángulo de estabilización del zócalo” su valor es de 15° (± 4°). La distancia S/F es el “brazo de palanca del sacro”. Se alarga si el “péndulo” va hacia adelante y se acorta si él va hacia atrás.

2.- Suspender el péndulo cuya unión superior es el ápex pulmonar (A), de manera precisa

El equilibrio de las presiones pulmonares, se aplican necesariamente en el plano sagital durante los movimientos respiratorios. El péndulo siempre tiene como unión el punto (A). Los movimien-



Shéma 1. La ley del péndulo.

tos respiratorios normales no afectan al péndulo ni la posición sagital de la columna. La inspiración y expiración profunda y los movimientos en flexión extensión hacen mover el péndulo. El punto de reposo del péndulo (E) se ubica de manera equidistante entre el ápex anatómico lumbar (L) y la vertical del ápex torácico anatómico (T). Situándose en el cruce de la línea vertical del punto (A) y de la horizontal pasando por el ápex lumbar anatómico (L). Siendo el punto de equilibrio de sinergias musculares definiendo el ápex lumbar funcional.

Por definición, el péndulo depende únicamente de la gravedad. El define una "línea vertical de tensión" del esquema corporal: distancia A/E. Su posición en el espacio de acuerdo al zócalo depende de las variaciones y las anomalías anatómicas corrientes, pero se mantiene como generador del esquema biomecánico corporal, por consecuencia de la columna.

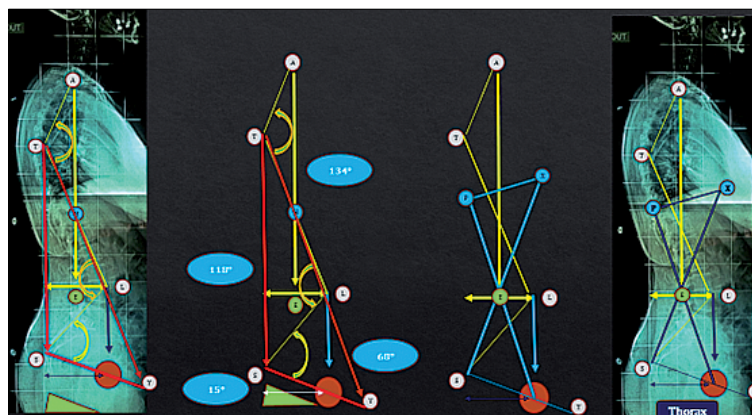
B. Definición de una columna "ideal" (Esquema 2 y 2').

El esquema corporal (el de la columna) estará definido por sus ápex anatómicos y funcionales, que son al mismo tiempo poleas de reflexión de tensiones aponeuróticas y musculares; y/o puntos de inflexión de las curvaturas. Por lo tanto, su desarrollo sigue de las sinergias musculares y depende de la función respiratoria.

Idealmente se organiza siguiendo dos esquemas:

- Una construcción anatómica vertical
Que alinea el ápex torácico (T) por encima del ápex del sacro (S) (búsqueda de verticalidad). Creando una lordosis ideal alineando el ápex torácico (T)/lumbar (L) y la sínfisis (Y) dentro del eje de tracción del psoas. Esta línea L/T cruza armoniosamente y oblicuamente los cuerpos vertebrales. Ella define un triángulo anatómico uniendo los ángulos (S, Y, T). Estabilizado muscularmente sobre el centro de rotación (F). La plomada de (F) viene por encima de F. El ápex lumbar (L) se sitúa frente a la plataforma superior de L4.

- Una construcción funcional. (Esquema 2')
La columna está constituida de una secuencia de arcos anatómicos rígidos/



Shéma 2. Esquema biomecánico ideal "de referencia".

flexibles; sacro (arco rígido), lumbar (flexible), tórax (rígido), cervical (flexible), cráneo (rígido). **Constituyendo un triple sistema d'arcos "Mongol" intrincados aseguran la estabilidad vertical (contra la gravedad) y la independencia de la función respiratoria:**

- Con aparato locomotor (arco del sacro /lumbar/tórax)
 - Con los movimientos de la cabeza por otro lado. (arco del tórax/ cervical/ Cráneo).
- Y también la hiper extensión (arco sacro/ toraco/cráneo).

La línea mayor de la "tensión de los arcos funcionales" en esta forma "ideal" se unen el ápex del sacro (S), el ápex pulmonar postero-inferior (P), el ápex pulmonar superior (A), la articulación occipito-cervical (O), y el ápex del cráneo (H).

Las flechas de los arcos son perpendiculares a esta línea, repartiéndose de cada lado de la misma. Uniendo los puntos más alejados de las curvaturas. Siendo paralelas y prácticamente equidistantes de su punto de inflexión.

La forma y la posición del tórax se definen en función de sus **ápex (A, X, P)**. El ápex pulmonar antero - inferior (X) define la fecha anterior del tórax. El punto (P) es el **ápex** pulmonar postero-inferior.

El representa el ápex torácico funcional. El tórax depende íntimamente del "péndulo" y por consecuencia del ápex lumbar. Cuales sean las anomalías corrientes, las líneas de tensión pélvico torácica X/S et P/S se cruzarán siempre en (E).

La articulación occipito-cervical se sitúa en posición "esténica" al repo-

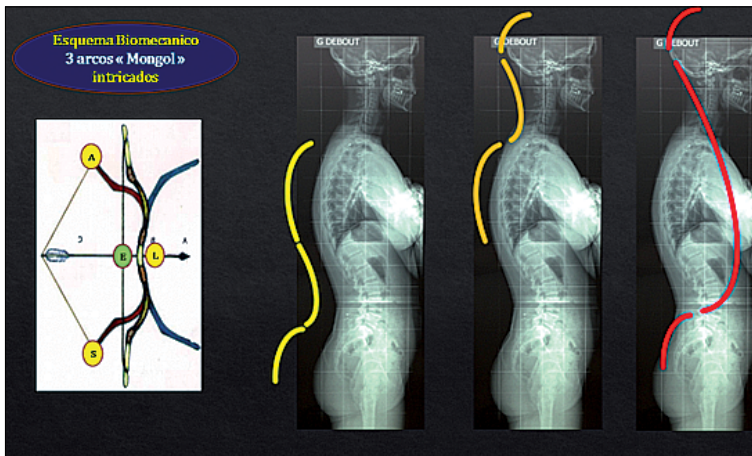
so, dentro de la prolongación del arco torácico (P/A) rígido que la estabiliza. Este segmento P/A/O tiene como punto de rotación A. El determina un "línea de tensión del arco toraco cervical" llamado "arco largo".

Este sistema llamado "ideal", puesto que alinea las dos líneas de tensión de los arcos funcionales pélvico torácico (S/P/A) y toraco-cervical (P/A/O). Existe entonces una repartición de los ápex anatómicos/funcionales en el espacio, lo que define una forma y un esquema biomecánico "ideal" y preciso que servirá de referencia.

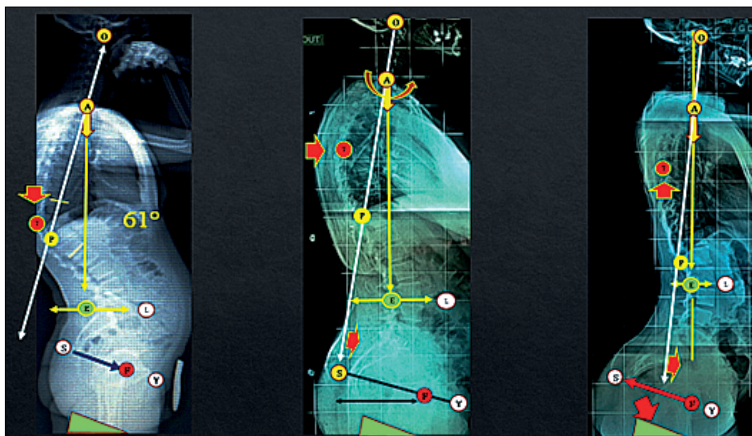
C. Las "variaciones" de formas sagi-tales (Esquema 3 y 4).

Dependen únicamente de la integración por la gravedad de las anomalías constitucionales aisladas o asociadas (serán estudiadas en la segunda parte). Aquí presentaremos dos modelos opuestos comparándolos al esquema ideal.

- Las anomalías modifican la repartición de los **ápex**, El triángulo anatómico modificado se reposiciona en el centro F para compensar el desplazamiento horizontal y vertical del péndulo para mantener el **ángulo** de estabilización S/F con la hirozontal.
- La ley sigue siendo suspender (atar) el péndulo de tal manera que sea equidistante del **ápex** lumbar y torácico. Entonces el péndulo sigue organizando el cuadro del esquema biomecánico.
- El alineamiento de T con S desliza hacia adelante o hacia atrás según las anomalías. Existe una disocia-



Shema 2'. Triple sistema d'arcos "Mongol" intricados estabilizador, arcos anatómicos y funcionales.



Shéma 3'. Variaciones del arco toraco-occipital largo P/A/O según las anomalías: variaciones de nivel del ápex torácico y del alineamiento del ápex torácico con el ápex del sacro

ción de las líneas de tensión de los arcos funcionales P/A/O cuyo eje es A (enganche del péndulo). La rotación depende de la altura del **ápex** torácico.

- La posición de la cabeza (O) depen-

de de la línea toraco-occipital P/A/O y también de la línea anterior X/V. V simboliza la inserción muscular.

- La flecha horizontal pasando por V esta alineada con el conducto vestibular lo que permite la estabilidad

de la cabeza al respirar.

- La línea X/V pasa por el péndulo cervical P cruzada de la plomada de O.
- Por definición, el esquema corporal depende de la relación dentro del péndulo (línea A/E) con las caderas F sean cuales sean las anomalías comunes. Este esquema de proporcionalidad (**shéma 5**) vinculado con la gravedad demuestra la interdependencia de las curvaturas.

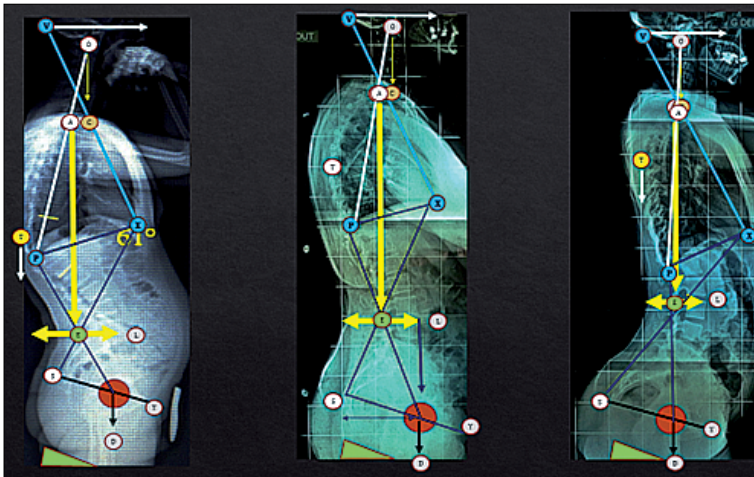
Discusión

Las clasificaciones morfogénicas de la columna en el plano sagital o coronal se fundan en mediciones angulares.

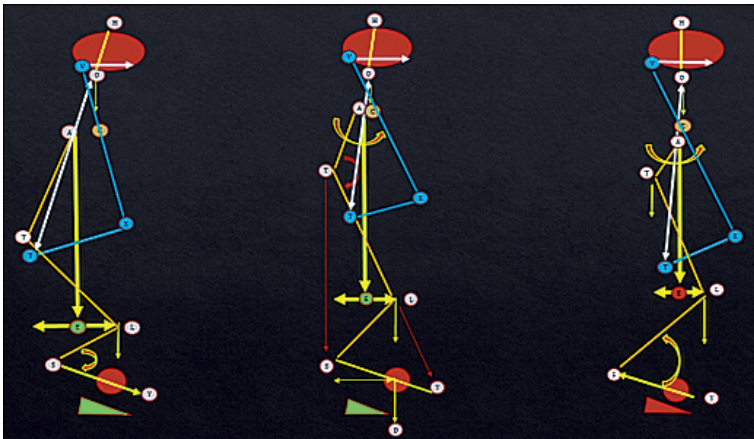
Este tipo de análisis estático, mono-planar, es poco satisfactorio.

- Las mediciones angulares varían según la respiración y la posición asténica o esténica del paciente.
- Por un mismo **ángulo (de lordosis, cifosis o de parámetros spinopélvicos)** según su orientación existen varias formas, incluso opuestas.
- La incidencia pélvica no integra el **ápex** del sacro, este es la polea del sistema extensor cuyo eje es la cadera. Esta construcción matemática (perpendicular en la parte mediana del sacro) no da cuenta del enrollamiento del sacro alrededor de las caderas ni tampoco de sus anomalías verticales o sagitales. Además las anomalías lumbo-sacras son muy frecuentes lo que relativiza el interés de la pendiente sacra como referencia.
- Aislando el raquis toraco-lumbar del esquema corporal se desconoce las sinergias musculares, el efecto estabilizador de la respiración incluso la noción de desalineamiento de los **ápex** T/S que permite definir la biomecánica muy específica en al plano sagital.

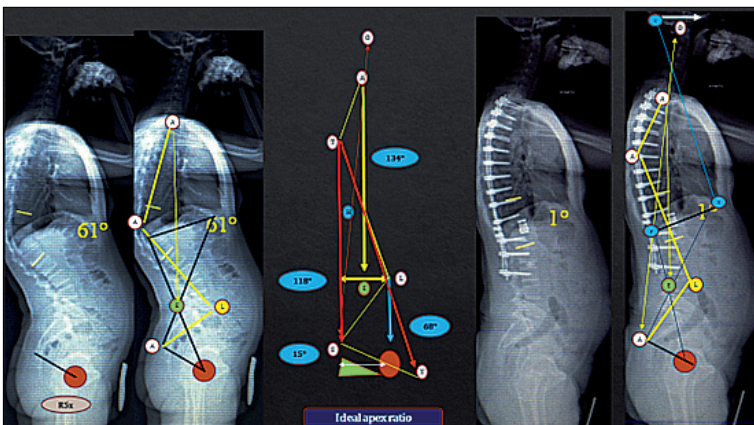
A final la gravedad es el **único** eje de construcción 3D, explicando la forma en su globalidad a través de un esquema de proporcionalidad. Las líneas de tensión implican que las anomalías ya sean del zócalo (pelvis) y/o subyacentes (vertebrales) son siempre interdependientes. Esas modificaciones se organizan alrededor de la "ley del péndulo". Una corrección quirúrgica perfecta y precoz (**Esquema 6**) de una anomalía mayor llega a una adaptación años después



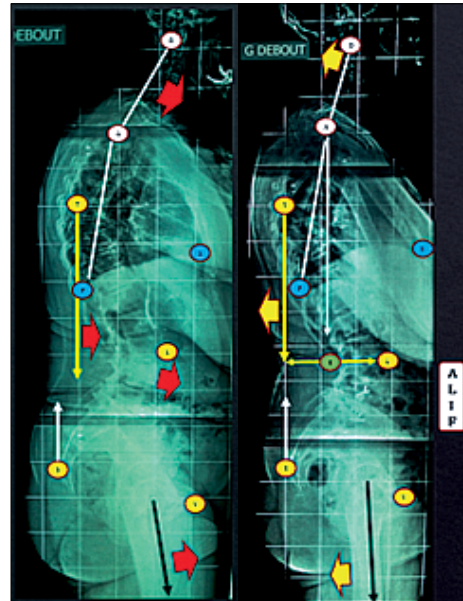
Shéma 4. Variaciones del esquema global según el péndulo A/E y péndulo cervical.



Shéma 5. Esquema biomecánico de "proporcionalidad" dentro el péndulo y las caderas.



Shéma 6. Corrección quirúrgica precoz de las anomalías mayores: Auto-adaptación según el esquema "ideal".



Shéma 7. Mejoramiento del esquema biomecánico con Alif stand alone en espondilolistesis L4/L5: cascada degenerativa A1S2°.

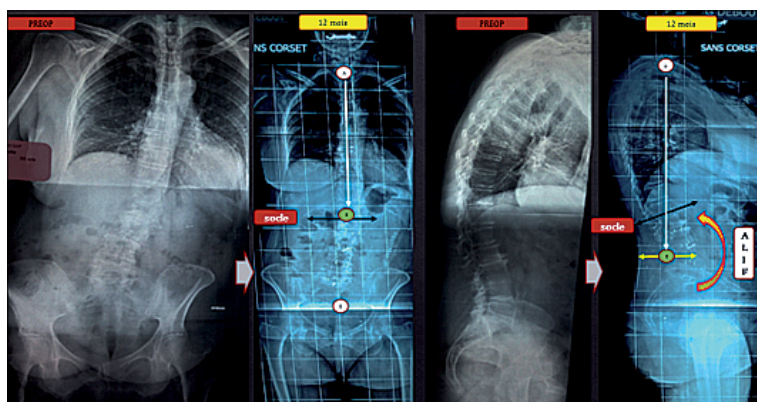
según el esquema estándar.

- El interés de esa ley es múltiple:
 - Explicar y clasificar los patrones de colapsos discógenicos degenerativos en el plano rotatorio (escoliosis de novo del adulto) o en el plano sagital^{5,6}.
 - Analizar las modificaciones del esquema biomecánico pre y post operatorio de los pacientes operados por ALIF (stand alone). La **técnica** ALIF devuelve la altura discal y re- extiende el arco lumbar anterior. Los músculos preservados facilitan una auto adaptación. El paciente recobra y mejora su propio esquema biomecánico. Este análisis nos da una visión más dinámica que angular del esquema corporal en su globalidad.
- La consecuencia terapéutica es bajar el costo iatrogénico vinculado al uso de instrumentación posterior en pacientes mayores de edad.

Conclusión

Siempre habrán dos maneras complementarias de pensar en la columna según la patología. Cada una tiene sus herramientas:

- Una semántica **ósea**, centrada en la deformidad, usando mediciones angulares, clasificación morfogénica, imponiendo una forma definitiva



Shéma 8. Devenir la altura del arco lumbar anterior con Alif stand alone ejora el esquema biomecánico global: cascada degenerativa tipo C3⁵.

- con instrumentación posterior.
- Una semántica discogénica, centrada en el biomecanismo degenerativo (colapso discogénico), con clasificaciones de los colapsos degenerativos y usando la técnica ALIF (stand alone) preservando los músculos, con el propósito de mejorar el esquema biomecánico del paciente. Pero existe una regla única 3D de la

columna: la gravedad. "Para adquirir la verticalidad la columna tiene que recorrer de abajo hacia arriba a pesar de los obstáculos (anomalías) un camino para atar el ápex pulmonar para que el esfuerzo respiratorio sea mínimo". Eso se exprime a través de la ley del péndulo.

Esta ley tiene varios intereses:

- Identificar y clasificar esquemas

- biomecánicos según las anomalías
- Estudiar sus biomecánicas degenerativas específicas.
- Precisar las indicaciones y analizar los resultados de la técnica ALIF (stand alone) en la patología degenerativa.

Presentación al 57° congreso Chileno de Neurocirugía en Puerto Varas el 6,7,8 noviembre de 2014 por el Doctor Norotte Gilles.

Agradecimientos

Quisiera agradecer el Dr Marcos Babar y el Dr Jorge Cerda por su invitación en el congreso y por darme la oportunidad de presentar ese tema : "la ley del péndulo" .

Se certifica que el material remitido no ha sido publicado previamente , ni esta en consideración para ser publicado , incluyendo revistas o libros.

Recibido: 26 de enero de 2015

Aceptado: 23 de febrero de 2015

Bibliografía

- Berthonnaud E, Dimmet J, Roussouly P, Labelle H. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech* 2005; 18(1): 40-47.
- Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, Benaim C, Mouilleseaux B, Marty C, Prat-Pradal D, Legaye J, Duval-Beaupère G, Pelissier J. Sagittal alignment of the spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J* 2006; 15(4): 415-422.
- Kuntz C 4th, Levin LS, Ondra SL, Shaffry CI, Morgan CJ. Neutral upright sagittal spinal alignment from the occiput to the pelvis in asymptomatic adults: a review and resynthesis of the literature. *J Neurosurg Spine* 2007; 6(2): 104-112.
- Mac - Thiong JM, Roussouly P, Berthonnaud E, Guigui P. Sagittal parameters of global spinal balance: normative values from a prospective cohort of seven hundred nine caucasian asymptomatic adults. *Spine (phila pa 1976)* 2010; 35(22): E1 193-1198.
- Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Dehoux E. Classification "discogénic" "des scolioses Lombaires dégénératives <50°: Effondrement Disco-génique Rotatoire (EFDR) Rachis, n°6, Déc 2012.
- Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Dehoux E. Classification des effondrements disco-géniques dans le plan sagittal (EFDS): intérêt sémantique, pratique et thérapeutique dans les indications d'Alif stand alone. *Rachis*, n°6, 2012.
- Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Precup S. Loi du pendule: comment se modifie le shéma biomécanique sagittal de la colonne en fonction des anomalies courantes? *Rachis*, n°6, 2014.
- Roussouly P, Berthonnaud E, Dimmet J. Geometrical and mechanical analysis of lumbar lordosis in asymptomatic population: proposed classification. *Rev Chir Orthop reparatrice Appar Mot* 2003; 89(7): 632-639 (in french).
- Roussouly Pierre, Pinheiro-Franco Luis. Sagittal parameters of the spine: biomechanical approach. *Eur Spine J* (2011) 20(suppl 5): S578-S585.
- Roussouly P, Gologly S, Berthonnaud E, Dimmet J. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in standing position. *Spine* 2005; 30(3): 346-353.
- Stagnara P, DeMauroy JC, Dran G, Costanzo G. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for evaluation of kyphosis and lordosis. *SPINE (phila pa 1976)* 7(4): 335-342.
- Vedantam R, Lenke LG, Bridwell KH, et al. The effect of variation in arm position on sagittal spinal alignment. *Spine (phila Pa)* 2000; 25: 2204-2209.

Correspondencia a:

Dr. Norotte Gilles
Centre Hospitalier des Alpes du Sud, 1, place A. Muret 05000 GAP (Francia).
Cel: 0033681459032
Fax:0033492406133
E-mail: Gilles-norotte@wanadoo.fr