

Uso de toxina botulínica paravertebral para detener la progresión de escoliosis en pollos pinealectomizados: la columna vertebral como sistema de tensegredad

Use of paravertebral injection of botulinum toxin to control scoliosis progression in pinealectomized chicken: the spine as a tensegrity system

Álvaro GONZÁLEZ-MIRANDA*, Oscar RIQUELME-GARCÍA**, Gabriel MOYANO-ORTEGA***, Agustín VIVEROS-MONTORO****, Carlota LARGO-ARAMBURU*****, Juan-Francisco DEL CAÑIZO-LÓPEZ*****, Pedro GARCÍA-BARRENO*****



González-Miranda, A.

Resumen

Antecedentes y Objetivos. La escoliosis idiopática infantil no tiene un tratamiento satisfactorio que permita reducir la importante morbilidad y mortalidad asociada a los casos más severos y progresivos de la enfermedad. El desarrollo de procedimientos que puedan ralentizar la progresión de la enfermedad durante el desarrollo del niño puede influir favorablemente en el crecimiento y retrasar el tratamiento definitivo de la deformidad al momento de la madurez músculoesquelética.

Presentamos un estudio sobre la influencia de la toxina botulínica en el desarrollo de deformidad en un modelo animal de escoliosis progresiva.

Material y Método. Utilizamos 52 pollos *Broiler* hembra, en los que se practicó pinealectomía para producir escoliosis. Comparamos la evolución de la deformidad entre un grupo control y un grupo intervención asignado a recibir toxina botulínica paravertebral en la concavidad de la curva, bajo control electromiográfico. Realizamos estudios radiográficos y anatomopatológicos de los animales para evaluar los resultados. El grado de escoliosis se midió utilizando el método del ángulo de Cobb.

Resultados. Cinco animales no sobrevivieron al estudio (1 en el grupo control y 4 en el de intervención). En el grupo control observamos una deformidad media de 32.9° (n= 25) y en el grupo intervención de 18.8° (n=22), encontrando diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Por tanto, la aplicación de toxina botulínica en la concavidad de la deformidad de pollos pinealectomizados frena la progresión de escoliosis.

Conclusiones. La consideración de la columna vertebral y sus tejidos blandos asociados como una estructura de tensegredad puede explicar el fenómeno mediante el desequilibrio generado entre los componentes de tensión (músculos y ligamentos) y compresión (vértebras) que conforman el sistema. Estos resultados justifican nuevos estudios en investigación clínica para explorar una nueva alternativa para el tratamiento de la escoliosis idiopática infantil.

Palabras clave	Escoliosis idiopática, Toxina botulínica, Musculatura paravertebral, Pinealectomía, Tensegrity.
Nivel de evidencia científica	4 Investigación básica
Recibido (esta versión)	27 marzo/2016
Aceptado	3 mayo/2016

Background and Objectives. Severe and progressive adolescent idiopathic scoliosis has no satisfactory treatment since high rates of morbidity and mortality are associated. Development of procedures that might slow down the progression of the deformity in the growing children may postpone definitive surgery to the end of musculoskeletal maturity period.

A study about the influence of botulinum toxin in the development of deformity in a progressive scoliosis animal model is reported.

Methods. Surgical pinealectomy was performed in 52 *Broiler* chickens to induce progressive scoliosis. Scoliosis progression among a control group and an intervention group assigned to paravertebral injection of botulinum toxin in curve's concavity electromyographically assisted is compared. Conventional x-ray and anatomopathologic studies were conducted to evaluate results. Cobb angle method was used to measure spine deformation.

Results. Five animals died (1 in the control group and 4 in the intervention group). Mean scoliosis values observed were 32.9 degrees (n= 25) and 18.8 degrees (n= 22) for control and intervention groups respectively (p<0.05). Therefore, the use of botulinum toxin in the deformity's concavity restrains scoliosis progression in pinealectomized chickens.

Conclusions. The assumption of the spine and its associated soft tissues as a tensegrity structure may explain these results, through the induced imbalance between the tension (muscles and ligaments) and compression (vertebrae) components that shape the system. Further studies are necessary to determine clinical applications of this therapy in adolescent idiopathic scoliosis.

Key words	Idiopathic scoliosis, Botulinum toxin, Paravertebral musculature, Pinealectomy, Tensegrity.
Level of evidence	4 Bench research
Received (this version)	27 march/2016
Accepted	3 may/2016

Conflicto de intereses: los autores declaran no tener ningún interés financiero relacionado con el contenido de este artículo.

* Médico Adjunto, Servicio de Cirugía Plástica y Quemados, Hospital Universitario La Paz, Madrid, España.

** Médico Adjunto, Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología Infantil, Hospital Universitario Gregorio Marañón, Madrid, España.

*** Veterinario, Personal de Apoyo a la Investigación, Departamento de Sanidad Animal, Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense, Madrid, España.

**** Veterinario, Profesor Titular, Departamento de Producción Animal, Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense, Madrid, España.

***** Veterinaria, Responsable del Animalario, Servicio de Cirugía Experimental, Hospital Universitario La Paz, Madrid, España.

***** Profesor Titular, Departamento de Cirugía, Universidad Complutense, Madrid, España.

***** Profesor Emérito, Departamento de Cirugía, Universidad Complutense, Madrid, España.

Trabajo galardonado con el Primer Premio del Concurso de Residentes de la Sociedad Española de Cirugía Plástica, Reparadora y Estética (SECPRE), celebrado durante el 49º Congreso Nacional, Granada, (España), junio de 2014.



Introducción

La escoliosis idiopática infantil, juvenil y del adolescente se define como una deformidad estructural tridimensional consistente en una curvatura lateral o desviación de la columna vertebral de más de 10 grados, asociada a una rotación vertebral y de etiología desconocida en un niño por lo demás sano. Se trata de un diagnóstico de exclusión al que se llega sólo cuando se han descartado otras causas de escoliosis, como malformaciones vertebrales, trastornos neuromusculares u otros procesos.

Su historia natural conduce, en muchos casos, a la necesidad de tratamientos quirúrgicos agresivos (Fig. 1) con importantes secuelas funcionales y una tasa de complicaciones, neurológicas y no neurológicas, que varía entre el 5.7-13.4% según los estudios, llegando a ser letales en el 0.03% (1,2). El tratamiento conservador mediante corsés tiene utilidad limitada y supone un impacto importante en el desarrollo normal de la vida diaria del niño (3). Por tanto, es pertinente el estudio de nuevas terapias capaces de solventar las carencias existentes en este campo de la Medicina. El conocimiento derivado de la Cirugía Plástica como especialidad interdisciplinaria, puede ser un buen punto de partida para el desarrollo de nuevos tratamientos y perspectivas de distintos padecimientos del aparato neuromusculo-esquelético en su conjunto.

Trabajos previos demuestran la capacidad de la pinealectomía en pollos para producir escoliosis progresiva como modelo de estudio de la enfermedad (4,5). Por otra parte, el uso de toxina botulínica para distintos trastornos del sistema musculoesquelético en niños ha sido establecido en estudios previos, mostrando criterios de

seguridad y eficacia adecuados (6,7). En este trabajo postulamos que las curvas de escoliosis progresiva presentan una debilidad estructural de partes blandas en el lado de la convexidad de la curva, que podría compensarse mediante la aplicación de toxina botulínica paravertebral a dosis adecuadas en el lado de la concavidad.

Material y método

Animales, puesta a punto y grupos experimentales

Utilizamos pollos *Broiler* hembra de la estirpe *Cobb* de 1 día de edad. Debido a la ausencia de datos previos en la literatura sobre los efectos considerados en el estudio propuesto (administración de toxina botulínica en musculatura paravertebral en pollos), diseñamos el proyecto en dos fases con el fin de optimizar el uso de los animales. La primera fase de obtención de datos del efecto a medir y puesta a punto de la técnica quirúrgica, permitió alcanzar una curva de aprendizaje razonable en relación a dos procedimientos poco frecuentes: pinealectomía e inyección de toxina botulínica paravertebral con control electromiográfico en pollos. En ella utilizamos un total de 23 animales y determinamos la dosis de 10 U/kg como la más eficaz entre las testadas (0 U/kg, 5 U/kg y 10 U/kg) a la hora de producir un desequilibrio en la columna vertebral del pollo sano.

En la fase de desarrollo del estudio utilizamos 52 animales a los que practicamos una pinealectomía para producir escoliosis progresiva. Asignamos de forma aleatoria 26 animales a cada grupo experimental; a saber, un grupo control y un grupo intervención que recibió toxina botulínica paravertebral a dosis de 10 U/kg en la concavidad de la curva incipiente, bajo control electromiográfico. Estableci-

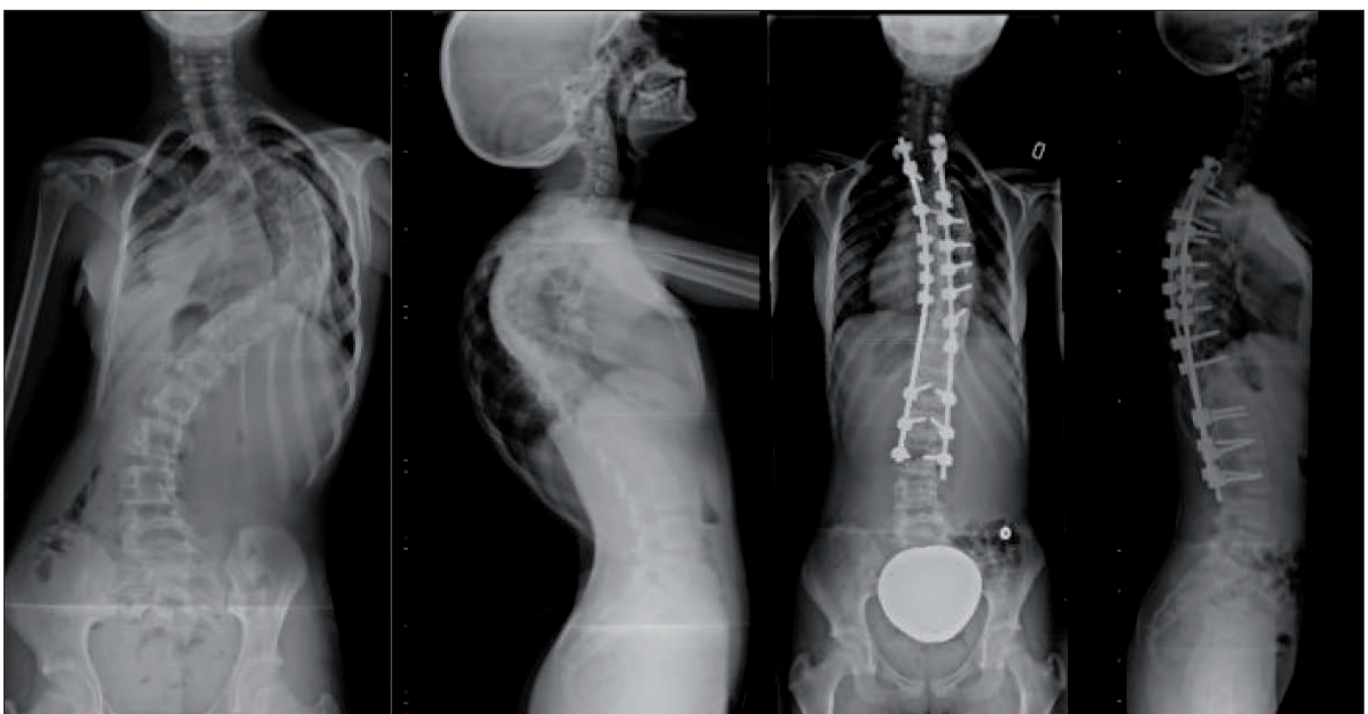


Fig. 1. Corrección quirúrgica de escoliosis idiopática en niña de 12 años mediante artodosis instrumentada y costoplastia. Proyecciones radiológicas posteroanteriores y laterales.

mos el tamaño muestral mediante la calculadora GRANMO (Versión 7.12, Abril 2012, disponible en línea en www.imim.cat/ofertadeserveis/software-public/granmo/).

Procedimientos quirúrgicos

Realizamos la pinealectomía a las 48-72 horas de vida del animal, bajo anestesia general inhalatoria con Sevoflurano® (Abbvie Farmacéutica España S.L.U.) mediante inducción en cámara al 8% y mantenimiento al 3.5%, vaporizado en O₂ a 1 L/min, analgesia con Meloxicam® (Boehringer Ingelheim España S.A) 0.2mg/kg vía oral y con magnificación microscópica (OPMI pico Zeiss® Europe). Colocamos al animal en decúbito prono, con la cabeza y el tubo de ventilación situados hacia el cirujano (Fig. 2). Practicamos una incisión longitudinal de unos 2 cm con bisturí sobre la piel del cráneo centrada en la confluencia de los senos duros. Retracción lateral de colgajos cutáneos y nueva incisión en "U" sobre la calota expuesta (Fig. 3). Realizamos dicha incisión mediante

pinza bipolar para evitar el sangrado profuso que puede producirse, sobre todo en la línea media, por la presencia del seno venoso longitudinal. Despegamiento de colgajo de calota de base posterior y duramadre adherida para exposición de la glándula pineal a nivel de la confluencia de los senos venosos. Resección de la glándula pineal y de su tallo. En este punto, se debe evitar la manipulación del tejido encefálico, que se muestra como una masa friable con alta tendencia al sangrado. Reposicionamiento del colgajo de calota sin fijación y sutura absorbible de piel con Vicryl® 4/0 (Ethicon Endo-Surgery Europe GmbH) (Fig. 4).

Procedimientos no quirúrgicos invasivos

A las 2 semanas de vida administramos la toxina botulínica (Botox® Allergan España S.A) en la concavidad de la curva de escoliosis incipiente (valorada mediante estudio radiográfico simple) a los animales del grupo intervención en dosis de 10 U/kg, mediante inyección directa



Fig. 2. Colocación de los animales para los procedimientos quirúrgicos. (Izquierda: una vez dormido fijamos al animal junto con el tubo de ventilación en posición mediante gasas, para protegerlo del contacto directo con el pegamento del esparadrapo. Derecha: la cabeza del animal y el tubo de ventilación quedan del lado del cirujano.

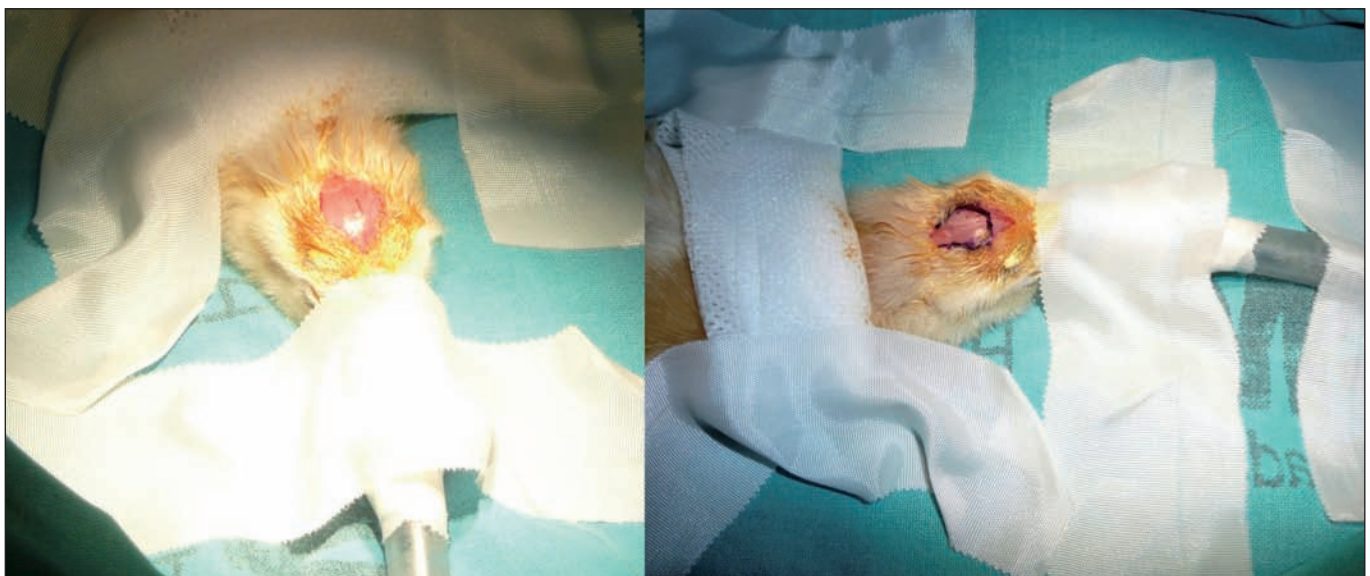


Fig. 3. Abordaje quirúrgico para pinealectomía. (Izquierda: incisión longitudinal sobre piel del cráneo y retracción lateral de colgajos cutáneos. Derecha: marcaje de colgajo en "U" de base posterior sobre la calota.

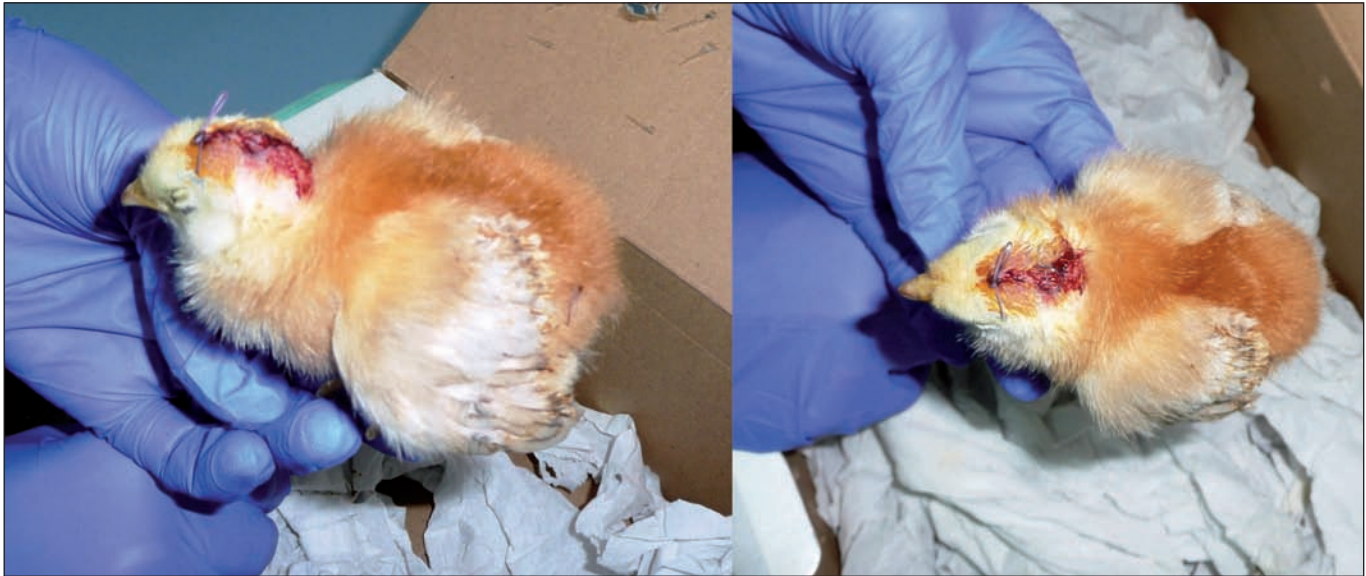


Fig. 4. Cierre del abordaje de la pinealectomía: reposición de colgajo de calota sin suturar y cierre directo de colgajos cutáneos con sutura continua reabsorbible. Izquierda y derecha: detalle de los animales en el postoperatorio inmediato.



Fig. 5. Procedimientos no quirúrgicos invasivos: inyección de toxina botulínica paravertebral mediante control electromiográfico a las 2 semanas. Izquierda y derecha: detalle de la técnica de inyección mediante aguja monopolar con luz, que permite la inyección de toxina botulínica y el registro de actividad muscular basal de forma simultánea.

sobre la musculatura paravertebral unilateral, bajo control electromiográfico (Cadwell Sierra® EMG/EP) con aguja monopolar con luz para administración directa sobre músculo (Ambu Neuroline Inoject® 27G/35mm). Utilizamos la misma anestesia que la descrita para los procedimientos quirúrgicos (Fig. 5). Cinco casos precisaron estudio radiográfico adicional a la semana por falta de evidencia de deformidad en el momento del estudio inicial.

Procedimientos no quirúrgicos no invasivos

Realizamos estudio radiológico simple de la columna vertebral a las 2, 4, 6 y 8 semanas de vida. Llevamos a cabo este procedimiento bajo anestesia general inhalatoria, de la misma forma descrita para los procedimientos quirúrgicos y no quirúrgicos invasivos. Utilizamos el método del ángulo de Cobb para medir la deformidad de la columna, lo que se determinó mediante software informático (Measure 2.0® C Thing Software).

Análisis anatomopatológico

Realizamos estudio microscópico con Hematoxilina-Eosina tras fijación en formalina del tejido extraído tras la pinealectomía para confirmar el procedimiento.

Estabulación, cuidados postoperatorios y sacrificio de animales

Las aves fueron estabuladas en condiciones de temperatura, humedad, renovación de aire e iluminación controladas automáticamente (24°C, humedad relativa 45%, ciclos luz-oscuridad de 12 horas). Tras la pinealectomía recibieron analgesia postoperatoria con Meloxicam® (Boehringer Ingelheim España S.A), en dosis de 0.1mg/kg vía oral durante los 3 días siguientes y revisamos la herida quirúrgica de forma periódica para descartar signos de infección u otras alteraciones (hematomas, dehiscencias, etc). Los animales fueron vigilados cada 8 horas durante los 3 días siguientes a cada procedimiento quirúrgico y/o invasivo en busca de signos de dolor o alteraciones del comportamiento. Valoramos aspectos como apariencia del animal, alteración en hábitos alimenticios y signos de postración o sufrimiento (aislamiento, ausencia de movilidad habitual, etc). Al finalizar el estudio, los animales fueron sacrificados en campana de CO² y retirados a través de un Gestor de Planta de Transformación autorizado.

Métodos alternativos y garantías

Hasta la fecha, no se han encontrado métodos alternativos para valorar los efectos del estudio propuesto debido a la ausencia de modelos no animales válidos para reproducir el desarrollo progresivo de escoliosis y a la necesidad de valorar la respuesta dinámica del organismo vivo al efecto que produce la toxina botulínica intramuscular sobre el conjunto del aparato neuromusculoesquelético en desarrollo. Además, la pinealectomía en el pollo es el único método descrito para crear un modelo animal

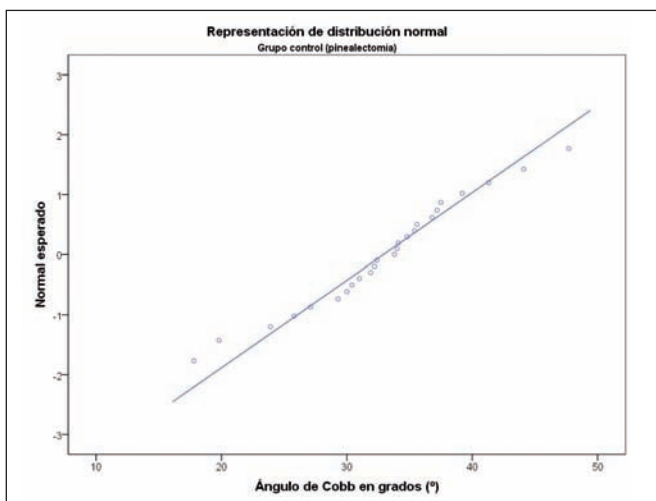
de escoliosis sin intervenir directamente sobre el área de la columna vertebral.

Los protocolos descritos se llevaron a cabo de acuerdo a la normativa existente en relación a la experimentación animal reflejada en la Directiva Europea 2010/63/UE, la Ley 32/2007 y el Real Decreto 1201/2005. Se obtuvo la aprobación previa del Comité de Experimentación Animal de la Universidad Complutense de Madrid.

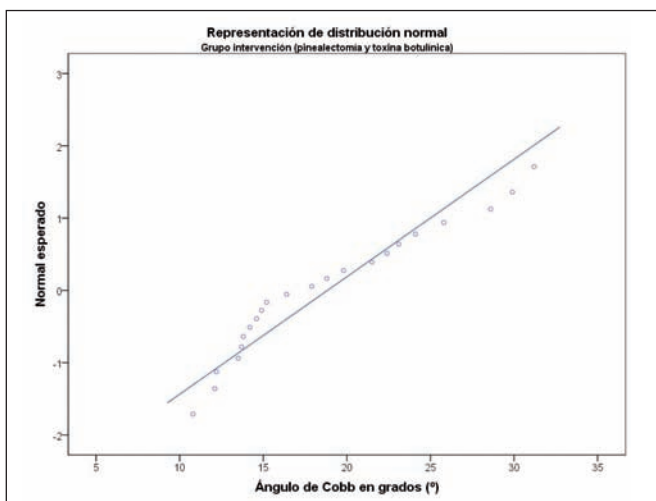
Análisis estadístico

Almacenamos los datos informáticamente mediante una base de datos en formato .xlsx (Microsoft Excel® Office 2010). Realizamos su procesamiento y posterior tratamiento estadístico con el software SPSS versión 20.0 (IBM SPSS Statistics®). Consideramos diferencias estadísticamente significativas aquellas que presentaron una probabilidad de error menor del 5% ($p < 0.05$). La variable principal del estudio es de tipo cuantitativo (los grados de deformidad de la columna medidos mediante el método del ángulo de Cobb) y fue descrita como media

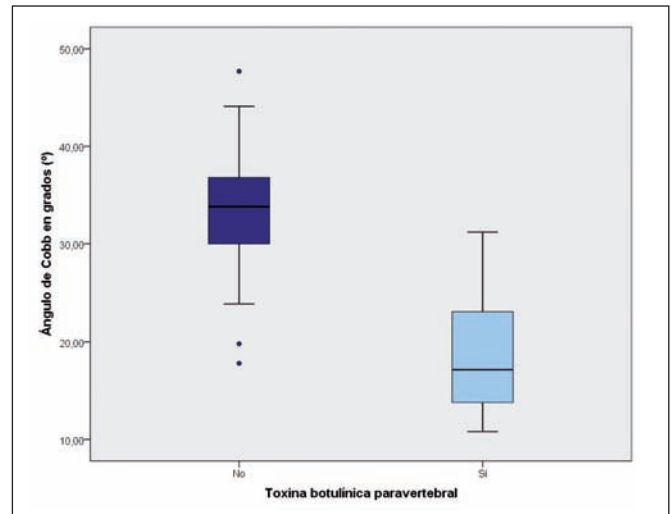
Gráfica 1. Representación gráfica de la distribución normal de los valores obtenidos para el ángulo de Cobb. Grupo control, sometido a pinealectomía.



Gráfica 2. Representación gráfica de la distribución normal de los valores obtenidos para el ángulo de Cobb. Grupo intervención, sometido a pinealectomía e inyección paravertebral de toxina botulínica.



Gráfica 3. Comparación de los valores del ángulo de Cobb. A la izquierda se observan los valores del grupo control (sometido a pinealectomía), a la derecha los del grupo intervención (sometido a pinealectomía e inyección paravertebral de toxina botulínica).



y desviación estándar. Realizamos análisis de la distribución normal de los valores obtenidos para cada grupo con el test de Shapiro-Wilk y llevamos a cabo la comparación de datos mediante pruebas paramétricas, utilizando la prueba de la t de Student.

RESULTADOS

La supervivencia observada fue del 90.3% (5 animales no sobrevivieron al estudio: 1 en el grupo control y 4 en el grupo intervención; 4 de ellos no superaron el postoperatorio inmediato de la pinealectomía, y el quinto falleció a las 6 semanas durante un traslado). El tiempo medio del procedimiento de pinealectomía fue de 37 minutos (26-94 minutos) y el de inyección de toxina botulínica bajo control electromiográfico de 5 minutos aproximadamente. La exploración de los datos demostró una distribución normal para ambos grupos de estudio (Gráficas 1 y 2). El valor medio del ángulo de Cobb para los animales del grupo control fue de 32.9° (17.8°-47.7°) y para los del grupo intervención tratados con toxina botulínica fue de 18.8° (10.8°-31.2°), encontrándose diferencias estadísticamente significativas con valor de $P < 0.05$ (Gráfico 3) (Fig. 6 y 7). Todas las curvas se localizaron en el segmento torácico-lumbar. Algunos animales presentaron tendencia al sueño durante las tres primeras semanas del estudio, que desapareció posteriormente. Ningún animal presentó reacciones adversas registrables tras la administración de toxina botulínica.

Discusión

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que la toxina botulínica se demuestra efectiva en el modelo estudiado para frenar el desarrollo de deformidad, o al menos ralentizarlo. Es por tanto razonable plantear el diseño de nuevos estudios, sobre todo de carácter

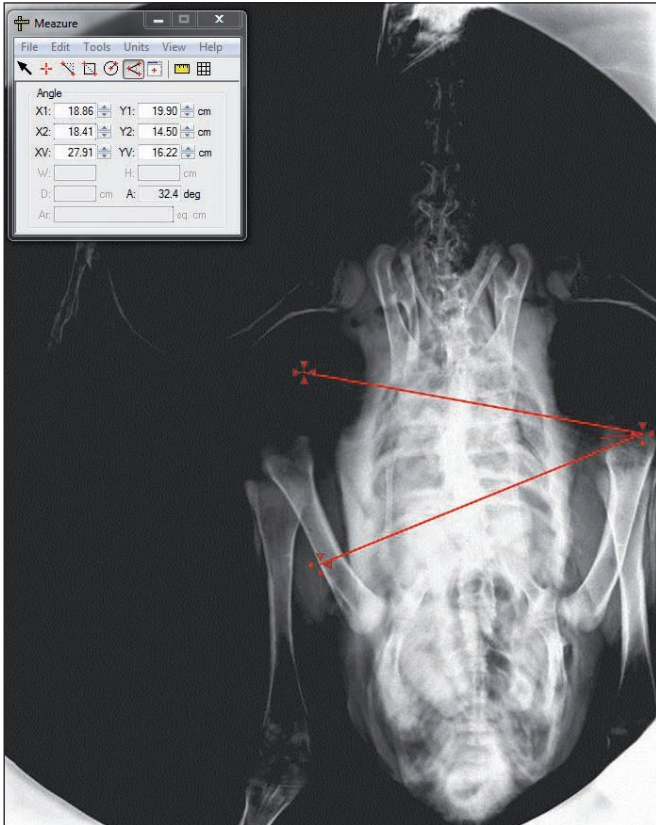


Fig. 6. Comparación de los valores del ángulo de Cobb. Radiografía simple a las 8 semanas de un animal del grupo control, sometido a pinealectomía. Medición del ángulo de Cobb mediante software informático sobre imagen digitalizada. Escoliosis izquierda de 32.4°.



Fig. 7. Comparación de los valores del ángulo de Cobb. Radiografía simple a las 8 semanas de un animal del grupo intervención, sometido a pinealectomía e inyección paravertebral de toxina botulínica. Medición del ángulo de Cobb mediante software informático sobre imagen digitalizada. Escoliosis derecha de 12.1°.

traslacional, para evaluar las posibilidades de esta terapia en los niños afectados por escoliosis idiopática. De hecho, la toxina botulínica se ha usado ampliamente con resultados satisfactorios y un perfil de bioseguridad demostrado en la población pediátrica (6,7). El desarrollo de un tratamiento efectivo con dicha toxina para detener, incluso de forma parcial, la progresión de la deformidad, ampliaría el arsenal terapéutico existente para tratar este padecimiento. Podrían llegar a evitarse los inconvenientes derivados del uso de corsés o cirugías practicadas durante el desarrollo del niño, postponiendo la cirugía definitiva, cuando fuera necesaria, al momento de madurez musculoesquelética. Son necesarias nuevas investigaciones para determinar la aplicabilidad clínica de esta terapia.

En cuanto a la dosis de toxina botulínica administrada, se ha establecido como 10 U/kg la más adecuada para alcanzar los objetivos del estudio. Esta dosis se ha demostrado en la fase preliminar como la más efectiva de las comparadas (0 U/kg, 5 U/kg y 10 U/kg) a la hora de iniciar una deformidad en el plano coronal de la columna vertebral del pollo sano. Sin embargo, de los datos derivados de esta fase no se puede establecer una asociación causa-efecto con significación estadística. Si bien en ningún caso se ha logrado detener por completo el desarrollo de escoliosis en ningún animal, también es cierto que la dosis óptima real para este propósito es desconocida, es decir, no se puede descartar que sea una dosis insufi-

ciente para observar resultados de mayor alcance. La limitada disponibilidad de recursos y la obligación ética de disminuir al mínimo el número de animales implicados en estudios de experimentación, han impedido profundizar en este sentido. Es controvertido el diseño de nuevos estudios en animales con tal fin, puesto que el objetivo final es el tratamiento de la escoliosis progresiva en humanos, y por lo tanto, la dosis óptima debería explorarse en ese ámbito.

El modelo seleccionado para la realización de esta investigación presenta ventajas e inconvenientes. Dentro de las primeras, cabe destacar el hecho de que es el único modelo en el que, para generar una escoliosis, no se interviene de forma quirúrgica directamente sobre la columna vertebral ni sus tejidos circundantes (8,9). A juicio del autor, ésta es una característica fundamental, ya que lo contrario puede generar factores de confusión e interferencias en la evaluación de cualquier terapia encaminada a corregir la escoliosis, como inflamación, efecto volumen, tensión de tejidos cicatriciales, pseudocápsulas alrededor de implantes, entre otros. Es decir, si bien cualquier intervención sobre esa zona puede generar estos efectos, no parece conveniente duplicarlos, una vez para generar el modelo y otra vez para corregirlo. Por otro lado, el potencial de crecimiento de los animales (multiplican su peso por 50 aproximadamente en tan sólo 8 semanas) permite desarrollar los estudios en corto plazo de

tiempo, facilitando una estrecha monitorización de los cambios acontecidos durante su crecimiento. Adicionalmente, los bajos costes de obtención, estabulación, alimentación, manipulación y traslado asociados a este animal, son sin duda un elemento clave para poder desarrollar investigaciones de estas características en un contexto de escasez de recursos.

Sin embargo, el modelo no está exento de inconvenientes. Parece que la escoliosis mediada por pinealectomía en el pollo se alcanza mediante una degeneración acelerada de las articulaciones intervertebrales, una osteoporosis incrementada de hueso esponjoso y una alteración de la osificación endocondral, hechos que no se han demostrado en la escoliosis idiopática de los niños (10,11). Fagan y col. (5) subrayaron también otras diferencias, como la ausencia de discos intervertebrales en la columna del pollo, observando en su lugar una articulación diartroïdal sinovial o, en algunos casos, una articulación cartilaginosa sin espacio articular físico. Estos hechos obligan a tomar precauciones a la hora de extrapolar los resultados obtenidos en experimentos realizados sobre este modelo de escoliosis al ámbito de la investigación clínica. Por otro lado, el pollo no es un mamífero, aunque sí un vertebrado. Y, aunque es un animal bipedestante, no se podría afirmar que su posición estática o dinámica sea erguida, como la del ser humano. Sin duda, se trata de factores que podrían limitar de manera importante la interpretación de cualquier estudio con intención traslacional pero, desde el punto de vista del autor, podrían presentar menos relevancia de la esperada tal y como se discutirá más adelante.

Langenskiöld y Michelsson (12), así como Werneck y col. (13) han apuntado al desequilibrio músculo-ligamentoso como posible causa responsable de escoliosis progresiva. En este sentido surgen múltiples preguntas en torno al desarrollo de esta enfermedad, la relación entre distintas especies, el papel de la columna vertebral y la influencia que las partes blandas puedan tener en el aparato musculoesquelético, no sólo como meros apéndices motores, sino también como piezas claves en la estática y el desarrollo correcto del mismo. Por ejemplo ¿por qué todos los vertebrados, independientemente de si bipedestan o se desplazan a cuatro patas, e incluso aquellos que flotan en el agua, tienen una columna vertebral que conserva prácticamente intactos sus componentes esenciales filogenéticamente? ¿O cómo sería posible el movimiento de los astronautas en órbita, sin la influencia de la gravedad, en un sistema dependiente de compresiones de origen externo al mismo? ¿Es válido un modelo exclusivo tradicional de cargas axiales compresivas sobre la columna vertebral (y otros huesos del organismo) o existen otras fuerzas implicadas en el equilibrio estáticodinámico musculoesquelético?

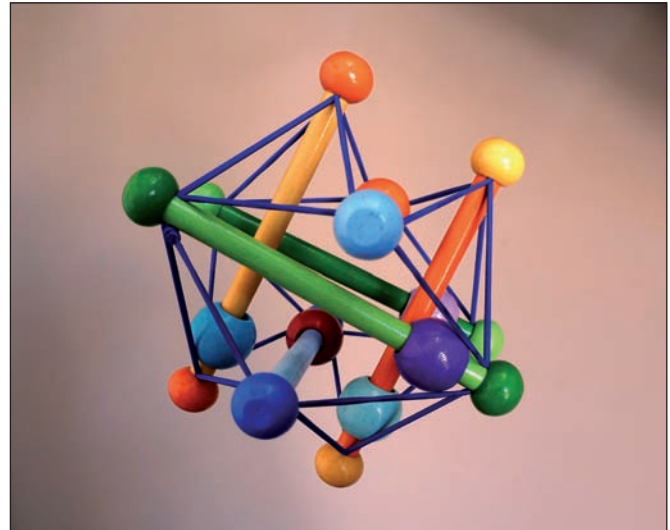


Fig. 8. Estructura de tensegridad icosaédrica. Los elementos de compresión (barras de madera) están aislados entre sí y no se tocan, unidos por una red continua de elementos de tracción (gomas) que está pretensada.

Tensegridad, concepto y principios. La columna vertebral como una estructura de biotensegridad

“- *What's Tensegrity?*
- *Food for thought.*”
Jörg Schlaich (1934)

La tensegridad es un principio estructural descrito por primera vez por el arquitecto R. Buckminster Fuller (U.S Patent Office, nº 3.063.521, “*Tensile-Integrity Structures*”, patentado el 13 de noviembre de 1961) y desarrollado por el escultor Kenneth D. Snelson (U.S Patent Office, nº 3.169.611, “*Continuous Tension, Discontinuous Compression Structures*”, patentado el 16 de febrero de 1965). Se trata por tanto de un principio estructural relativamente novedoso (con apenas 50 años de historia), basado en el empleo de elementos comprimidos aislados entre sí e inmersos en una red continua traccionada. Esto significa que las piezas sometidas a compresión (normalmente barras) no se tocan entre sí y están unidas únicamente por medio de los componentes tensados (habitualmente cables), que son los que delimitan espacialmente al sistema así conformado (Fig. 8) (14). Lo más llamativo para la persona que ve una estructura tensegrítica por primera vez es el impacto que produce una incomprensible estabilidad que mantiene a las barras unidas entre sí únicamente por cables, sin contacto directo entre ellas y sin que el sistema tienda a colapsar en el centro del mismo (Fig. 9).

Las características más relevantes de estas estructuras de compresión flotante se pueden resumir de la siguiente forma:

1. Se componen de elementos de compresión (más bien rígidos e inelásticos) y elementos de tensión (más bien flexibles y elásticos), representados fundamentalmente por barras y cables respectivamente.
2. Los elementos de compresión se encuentran aislados entre sí, discontinuamente comprimidos e in-



Fig. 9. *Needle Tower*, escultura de Kenneth D. Snelson exhibida en el Hirshhorn Museum and Sculpture Garden (Washington DC, Estados Unidos).

mersos en una red continua de elementos de tensión, que están permanentemente tensados en alguna medida (son estructuras pretensadas).

3. Su equilibrio depende solamente de las fuerzas de tensión y compresión que se producen a lo largo del eje de cada componente.
4. No existen fuerzas de torsión (o dichas fuerzas se descomponen en vectores axiales a los elementos que conforman la estructura).
5. Los componentes se encuentran conectados dinámicamente, de forma que cualquier fuerza aplicada a uno de ellos se transmite de forma instantánea a la estructura entera.
6. La discontinuidad de los elementos de compresión permite que realicen su trabajo sobre todo de forma local. Debido a que no tienen que transmitir cargas a lo largo de largas distancias, son menos susceptibles de colapsar, permitiendo un diseño más esbelto de dichos elementos sin sacrificar la integridad de la estructura.
7. La respuesta conjunta de todos los elementos a la acción de cargas externas se sigue de la recuperación en bloque de la forma inicial una vez cesan las cargas.
8. No existen (o se reducen al mínimo) los elementos redundantes, lo que proporciona ligereza a la estructura.
9. No dependen de la gravedad, ni necesitan un punto

de anclaje o fijación para funcionar. Son sistemas estables en cualquier posición.

10. Figuras tensegríticas más elementales se pueden ensamblar entre sí para dar lugar a configuraciones mayores y más complejas, sin perder las propiedades del sistema.

En 1998, Ingber utilizó con éxito la tensegridad para explicar ciertas propiedades del citoesqueleto y la transducción de señales celulares (15). Unos años antes, Levin (16) aplicó los mismos conceptos a la biomecánica para entender mejor el funcionamiento de las articulaciones y mostró su desacuerdo con el modelo tradicional en el que la columna vertebral se consideraba un pilar: el peso ejercido por la cabeza en los movimientos de flexión y lateroflexión debería romper una estructura de este tipo debido al excesivo momento de fuerza que se produciría en la columna cervical. Es más, las fuerzas necesarias para equilibrar una columna vertebral cuyo centro de gravedad está constantemente cambiando serían incalculables. El propósito de un pilar es la estabilidad, mientras que el objetivo de la columna vertebral es la flexibilidad y el movimiento. Las estructuras biológicas son móviles, flexibles, altamente eficientes en el consumo de energía y funcionalmente independientes de la fuerza de la gravedad (los astronautas son capaces de flexionar un codo cuando orbitan alrededor de la Tierra). Un pilar, en cambio, necesita una base fija y una conformación rígida para mantenerse estable, por lo que no puede ser considerado un modelo válido para explicar las propiedades biomecánicas de la columna vertebral. Por lo tanto, ésta se podría considerar como una estructura de tensegridad (Fig. 10), en la que un conjunto de elementos de compresión dispuestos de forma discontinua (vértebras) interacciona con un conjunto de elementos de tensión dispuestos de forma continua (músculos y ligamentos). Los discos intervertebrales jugarían

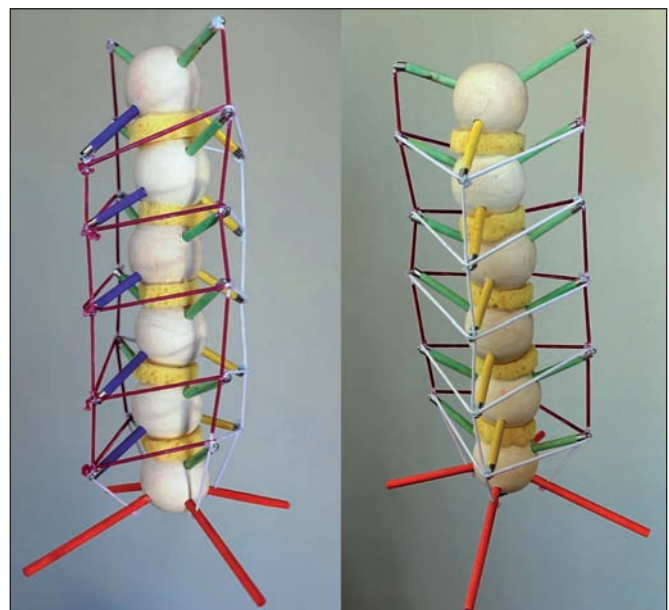


Fig. 10. Prototipo de columna vertebral como modelo de biotensegridad. Maqueta realizada por el autor sobre la idea original de Tom Flemons (*Intension Designs*®), cuya modificación principal es el añadido de los discos intervertebrales como elementos articuladores.

un papel más como articuladores (sometidos a presión variable) para permitir movimiento, que como puros transmisores de carga axial. Es decir, las partes blandas no son sólo apéndices motores, sino que forman también parte de la estructura (17,18).

Se podrían establecer tres principios básicos en este nuevo modelo: a) Los ligamentos están bajo tensión continua. Los estudios de Nachemson (19), Tkaczuk (20) y Kazarian (21) han demostrado el estado de “pre-tensión” del *ligamentum flavum* (ligamento amarillo), el ligamento longitudinal anterior y el ligamento longitudinal posterior, cuando la columna está en posición neutra. En ningún momento el conjunto de estos ligamentos está completamente relajado. Es más, el trabajo de Kazarian encontró que cuando los cuerpos intervertebrales están unidos sólo por los discos, tras cortar los ligamentos longitudinales anterior y posterior, la columna vertebral se



Fig. 11. Simulación 3D de la columna vertebral como estructura de tensegridad. Situación pre-tratamiento. (Simulación e imágenes elaboradas por el autor, Autodesk®3dsMax® 2015)



Fig. 12. Simulación 3D de la columna vertebral como estructura de tensegridad. Situación post-tratamiento. (Simulación e imágenes elaboradas por el autor, Autodesk®3dsMax® 2015)

expande, como se esperaría en un sistema tensegrítico si alguno de los miembros a tensión es seccionado. b) Se pueden predecir ciertas configuraciones, puesto que los reticulados de tensegridad utilizan un ángulo de 60° para coordinarse (más eficiente desde el punto de vista estructural), en lugar de un ángulo de 90°. Estudios anatómicos de las fibras del *annulus* del disco intervertebral muestran esta interrelación de fibras próxima a 60° (22). c) Aunque algunos de los componentes rígidos de un sistema de tensegridad pueden llegar a tocarse, eso no significa que se encuentren uno contra otro a compresión.

De acuerdo con esta nueva perspectiva, los datos experimentales recogidos en el presente estudio parecen justificables. La administración de toxina botulínica paravertebral en la concavidad de la curva de escoliosis, produciría una debilidad estructural en los componentes de tensión del lado inyectado. Como consecuencia de ello, resultaría un restablecimiento del equilibrio del conjunto de la estructura de tensegridad que se transmitiría a todos sus componentes en forma de corrección de la deformidad (Figs. 11 y 12).

Los resultados de este trabajo, si bien no son concluyentes, pueden ayudar a mejorar el conocimiento de algunas enfermedades neuromusculares, particularmente las escoliosis idiopáticas progresivas. Son necesarias nuevas investigaciones para validar la columna vertebral como un modelo de estructura de biotensegridad y contrastar las potenciales aplicaciones clínicas derivadas de esta nueva perspectiva.

Conclusiones

El presente estudio demuestra la utilidad de la toxina botulínica para frenar la progresión de escoliosis en pollos pinealectomizados. El uso de toxina botulínica en pacientes que padecen escoliosis idiopática progresiva podría resultar de interés como terapia alternativa para controlar la evolución de la enfermedad en estos niños. Su empleo podría evitar los inconvenientes derivados de los tratamientos actuales y postponer la cirugía definitiva, cuando fuera necesaria, al momento de madurez musculoesquelética. La consideración de la columna vertebral como una estructura de tensegridad podría explicar este fenómeno, como consecuencia del restablecimiento del equilibrio de los componentes del sistema, a saber, elementos de compresión (vértebras) y elementos de tensión (músculos y ligamentos). Son necesarias nuevas investigaciones para determinar la aplicabilidad clínica de esta terapia y la validez del modelo de biotensegridad.

Agradecimientos

Al Dr. Pedro García Barreno, por sembrar en mí la semilla de la curiosidad, la ciencia crítica y la superación profesional sin dejar de lado nunca la cara más humana de las cosas.

Declaración

Este trabajo obtuvo una beca de investigación competitiva de la GEER (Sociedad Española para el Estudio de las Enfermedades del Raquis) en 2014, cuyo importe se dedicó íntegramente al desarrollo del proyecto.

Dirección del autor

Dr. Álvaro González Miranda
Servicio de Cirugía Plástica y Quemados
Hospital Universitario La Paz
Paseo de la Castellana 261
28046 Madrid, España
drgonzalezmiranda@gmail.com

Videos complementarios al artículo disponibles en
www.ciplaslatin.com

Bibliografía

1. **Coe J.D., Arlet V., Donaldson W. y col.** Complications in spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis in the new millennium. A report of the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee. *Spine*. 2006;31(3):345-349.
2. **Carreon L.Y., Puno R.M., Lenke L.G. y col.** Non-neurologic complications following surgery for adolescent idiopathic scoliosis. *The Journal of bone and joint surgery American volume*. 2007;89(11):2427-2432.
3. **Katz D.E., Herring J.A., Browne R.H. y col.** Brace wear control of curve progression in adolescent idiopathic scoliosis. *The Journal of bone and joint surgery American volume*. 2010;92(6):1343-1352.
4. **Wang X., Jiang H., Raso J. y col.** Characterization of the scoliosis that develops after pinealectomy in the chicken and comparison with adolescent idiopathic scoliosis in humans. *Spine*. 1997;22(22):2626-2635.
5. **Fagan A.B., Kennaway D.J., Oakley A.P.** Pinealectomy in the chicken: a good model of scoliosis? *European spine journal*. 2009;18(8):1154-1159.
6. **Pascual-Pascual S.I., Herrera-Galante A., Poo P. y col.** Guía terapéutica de la espasticidad infantil con toxina botulínica. *Revista de neurología*. 2007;44(5):303-309.
7. **Strobl W., Theologis T., Brunner R. y col.** Best clinical practice in botulinum toxin treatment for children with cerebral palsy. *Toxins*. 2015;7(5):1629-1648.
8. **Bobyn J.D., Little D.G., Gray R. y col.** Animal models of scoliosis. *Journal of orthopaedic research*. 2015;33(4): 458-467.
9. **Ouellet J., Odent T.** Animal models for scoliosis research: state of the art, current concepts and future perspective applications. *European spine journal*. 2013; 22 (Suppl 2):S81-595.
10. **Aota Y., Terayama H., Saito T. y col.** Pinealectomy in a broiler chicken model impairs endochondral ossification and induces rapid cancellous bone loss. *The spine journal*. 2013;13(11):1607-1616.
11. **Turgut M., Basaloglu H.K., Yenisey C. y col.** Surgical-pinealectomy accelerates intervertebral disc degeneration process in chicken. *European spine journal*. 2006; 15 (5):605-612.
12. **Langenskiold A., Michelsson J.E.** The pathogenesis of experimental progressive scoliosis. *Acta Orthopaedica Scandinavica Supplementum*. 1962;59:1-26.
13. **Werneck L.C., Cousseau V.A., Graells X.S. y col.** Muscle study in experimental scoliosis in rabbits with costo-transversectomy: evidence of ischemic process. *European spine journal*. 2008;17(5):726-733.
14. **Gómez Jáuregui V.** Tensegridad. Estructuras Tensegríticas en Ciencia y Arte. Santander: Universidad de Cantabria, 2007.
15. **Ingber D.E.** The architecture of life. *Scientific American*. 1998;278(1):48-57.
16. **Levin S.M.** Tensegrity: the new biomechanics. En: *Textbook of Musculoskeletal Medicine*. Ed.: Hutson M.E. Oxford: Oxford University Press, 2005.
17. **Levin S.M.** The Importance of soft tissues for structural support of the body. En: *Prolotherapy in the Lumbar Spine and Pelvis*. Ed.: Dorman T. Philadelphia: Hanley & Belfus, 1995.
18. **Gaudreault N., Arsenault A.B., Lariviere C. y col.** Assessment of the paraspinal muscles of subjects presenting an idiopathic scoliosis: an EMG pilot study. *BMC musculoskeletal disorders*. 2005;6:14.
19. **Nachemson A.L., Evans J.H.** Some mechanical properties of the third human lumbar interlaminar ligament (ligamentum flavum). *Journal of biomechanics*. 1968; 1(3):211-220.
20. **Tkaczuk H.** Tensile properties of human lumbar longitudinal ligaments. *Acta orthopaedica Scandinavica*. 1968; 39(Suppl 115):1-69.
21. **Kazarian L.E.** Creep characteristics of the human spinal column. *The Orthopedic clinics of North America*. 1975; 6(1):3-18.
22. **Hussain M., Gay R.E., An K.N.** Reduction in disk and fiber stresses by axial distraction is higher in cervical disk with fibers oriented toward the vertical rather than horizontal plane: a finite element model analysis. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*. 2010; 33 (4):252-260.