



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.- 91 336 3060  
info.industriales@upm.es

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)

INDUSTRIALES

05 TRABAJO FIN DE GRADO

Alejandro de Santiago García-Valdecasas



TRABAJO FIN DE GRADO

# MODELO FISICO BIOMECANICO DE CRANEO Y RAQUIS CERVICAL APTO PARA ESTUDIO DE MOVIMIENTOS Y FUERZAS MUSCULARES

Diciembre 2020

**Alejandro de Santiago  
García-Valdecasas**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:  
**Antonio Ros Felip**



## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a mi tutor, Don Antonio, por darme la oportunidad de aprender algo completamente nuevo y estar disponible a ayudarme en cualquier momento.

Quiero dedicarle este trabajo de fin de grado a mis dos abuelos, Rafael y Claudio.

Al primero, mi querido abuelo de Granada, decirte que eres la persona más fuerte que conozco y agradecerte por alegrarte siempre de mis éxitos y ser mi mayor fan.

Al segundo, mi querido abuelo de Madrid, darte las gracias por enseñarme cada día algo nuevo y recordarme que todo con esfuerzo se puede conseguir. La vida como siempre dices, son “etapitas” y con este trabajo cierro una importante para seguir persiguiendo mis sueños.

Gracias a mi madre por enseñarme a esforzarme por las cosas desde pequeño, sin esa lección nunca hubiese llegado donde estoy ahora, y a mi padre por darme oxígeno cuando lo necesitaba.

Gracias a mi hermana por introducirme en el cuerpo humano, sin tu ayuda, no habría sabido por dónde empezar.

Quiero darle las gracias al resto de mi familia por apoyarme siempre. También a mis amigos por supuesto, por siempre estar ahí.

Por último, gracias a Dios por no dejarme nunca solo en esta loca aventura que ha sido la carrera.

## RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto ha sido diseñado con la idea de aportar más medios al estudio de numerosos médicos que no han encontrado el modelo biomecánico que les permita estudiar las relaciones de las articulaciones cervicales y las fuerzas musculares en los diferentes movimientos del raquis cervical. El diseño del modelo físico biomecánico de cráneo y raquis cervical surge con la finalidad de cubrir un espacio que hasta ahora ningún modelo en el mercado era capaz de abordar.

Para poder diseñar un modelo lo más preciso posible, ha sido necesario en primer lugar, realizar un profundo estudio acerca de la anatomía del sistema musculoesquelético. Este estudio ha permitido profundizar acerca del funcionamiento de la estructura del cuerpo humano, donde se ha partido de un nivel general desarrollando los tejidos conjuntivos, huesos, articulaciones, ligamentos y músculos para ir poco a poco centrando el estudio en la región cervical y la parte inferior de la cabeza. Seguido a la anatomía, se ha procedido a un detallado estudio acerca de la fisiología del raquis cervical, fundamental para el entendimiento de las relaciones necesarias entre vértebras cervicales para producir los movimientos de la cabeza. De la misma forma ha llevado al entendimiento de las relaciones y sinergias necesarias de los grupos musculares para la producción de cada uno de los movimientos del raquis cervical. Estos movimientos se han dividido en dos grandes grupos:

- Movimientos del raquis cervical superior: Flexión, extensión y rotación.
- Movimientos del raquis cervical inferior: Flexión, extensión y rotación-inclinación.

Una vez asimilados los fundamentos teóricos, se ha procedido al diseño del modelo biomecánico partiendo de un modelo de cráneo de la marca *3B Scientific*. El diseño del modelo se detalla con precisión a lo largo del proyecto y es representa cada uno de los movimientos mencionados anteriormente. Dado que no era viable una representación de cada uno de los grupos musculares del cuello, se han seleccionado aquellos cuya relevancia en la realización de movimientos era mayor y se ha estudiado detenidamente su intercesión en el cráneo para poder representar fielmente la dirección y sentido de las cargas musculares a la hora de producir el movimiento.

Estando el modelo físico biomecánico elaborado, se han elaborado diferentes ensayos con cada grupo muscular para comprobar el correcto funcionamiento de este. Para ello se han seleccionado los músculos encargados de cada movimiento y mediante la aplicación de cargas, se han ido representando cada uno de los movimientos mencionados. Se ha ido fotografiando cada secuencia de movimientos con el fin de realizar equilibrios estáticos que permitan estudiar la relación entre los músculos agonistas (aquellos que se contraen para la producción del movimiento) y músculos antagonistas (se contraen en la dirección opuesta del agonista y garantiza la vuelta al estado de reposos de este). También se ha estudiado las reacciones que han de ser absorbidas por el raquis cervical en cada posición de la cabeza.

Se han considerado dos tipos de problemas: problemas con solución analítica en los que interviene un mínimo número de músculos y problemas no deterministas en donde se tiene redundancia de músculos e hiperestaticidad.

# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....                                   | 8  |
| CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN.....  | 9  |
| 2.1 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DEL RAQUIS CERVICAL.....                           | 9  |
| 2.1.1 Planos anatómicos.....   | 9  |
| 2.1.2 Tejido conjuntivo.....   | 10 |
| 2.1.3 Huesos.....  | 10 |
| 2.1.3.1 Introducción.....  | 10 |
| 2.1.3.2 Vertebras.....   | 11 |
| <i>Región cervical</i> .....   | 11 |
| <i>Región torácica</i> .....   | 13 |
| <i>Región Lumbar</i> .....   | 13 |
| <i>Región sacra</i> .....  | 14 |
| 2.1.3.3 Hueso occipital.....   | 14 |
| 2.1.4 Articulaciones.....  | 14 |
| 2.1.4.1 Articulaciones sinoviales.....                                       | 14 |
| 2.1.4.2 Articulaciones sólidas.....  | 14 |
| 2.1.5 Ligamentos.....  | 15 |
| 2.1.6 Músculos.....  | 16 |
| 2.1.6.1 Músculos del triángulo anterior del cuello.....                      | 17 |
| 2.1.6.2 Músculos del triángulo posterior del cuello.....                     | 18 |
| <i>Esternocleidomastoideo</i> .....  | 18 |
| 2.1.6.3 Músculos espinotransversos.....                                      | 18 |
| <i>Esplenio de la cabeza</i> .....   | 18 |
| <i>Esplenio del cuello</i> .....   | 19 |
| 2.1.6.4 Músculos suboccipitales.....   | 19 |
| <i>Recto posterior mayor de la cabeza</i> .....                              | 19 |
| <i>Recto posterior menor de la cabeza</i> .....                              | 19 |
| <i>Oblicuo superior de la cabeza</i> .....                                   | 20 |
| <i>Oblicuo inferior de la cabeza</i> .....                                   | 20 |
| 2.1.7 Introducción al raquis cervical.....                                   | 20 |
| .....  | 21 |
| 2.1.8 Constitución esquemática de las tres primeras vértebras cervicales ... | 21 |
| 2.1.8.1 Atlas.....   | 21 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.1.8.2  | Axis .....   | 21 |
| 2.1.8.3  | Vértebra cervical tipo.....  | 21 |
| 2.1.9    | Raquis cervical superior .....   | 22 |
| 2.1.9.1  | Articulaciones atloidoaxoideas y atloidoodontoideas .....              | 22 |
|          | <i>Flexoextensión</i> .....  | 22 |
|          | <i>Rotación</i> .....  | 23 |
| 2.1.9.2  | Articulación occipitoatloidea .....                                    | 24 |
|          | <i>Rotación</i> .....  | 24 |
|          | <i>Inclinación lateral</i> .....                                       | 25 |
|          | <i>Flexoextensión del occipital sobre el atlas</i> .....               | 26 |
| 2.1.10   | Raquis cervical inferior .....   | 27 |
| 2.1.10.1 | Flexoextensión .....   | 27 |
| 2.1.10.2 | Movimientos en las articulaciones uncovertebrales .....                | 29 |
| 2.1.11   | Músculos.....  | 30 |
| 2.1.11.1 | Constitución y acción del músculo esternocleidomastoideo .....         | 30 |
| 2.1.11.2 | Músculos prevertebrales .....  | 30 |
|          | <i>El largo del cuello</i> .....                                       | 30 |
|          | .....  | 31 |
|          | <i>Recto anterior mayor de la cabeza</i> .....                         | 31 |
|          | <i>Recto anterior menor de la cabeza</i> .....                         | 31 |
|          | <i>Músculo recto lateral</i> .....                                     | 32 |
|          | .....  | 33 |
|          | <i>Los escalenos</i> .....   | 33 |
| 2.1.11.3 | Músculos anteriores del cuello .....                                   | 35 |
| 2.1.11.4 | Músculos de la nuca.....   | 36 |
|          | <i>Plano profundo</i> .....  | 36 |
|          | <i>Plano de los complexos</i> .....                                    | 37 |
|          | .....  | 38 |
|          | .....  | 38 |
|          | <i>Plano del esplenio y del angular</i> .....                          | 38 |
|          | <i>Plano superficial</i> .....   | 39 |
|          | <i>Extensión del raquis cervical por los músculos de la nuca</i> ..... | 40 |
| 2.1.11.5 | Músculos suboccipitales.....   | 41 |
|          | <i>Inclinación y extensión</i> .....                                   | 42 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Acción rotadora de los músculos suboccipitales</i> .....  | 44  |
| 2.1.12 Sinergia-Antagonismo de los músculos prevertebrales y del esternocleidomastoideo.....         | 45  |
| 2.1.13 Equilibrio de la cabeza sobre el raquis cervical .....  | 46  |
| 2.2 MODELOS BIOMECÁNICOS.....  | 47  |
| 2.2.1 Atlas y axis con lámina horizontal del occipital – <i>3B Smart Anatomy</i> . .....             | 47  |
| 2.2.2 Columna cervical – <i>3B Smart Anatomy</i> .....   | 47  |
| 2.2.3 Vértebra cervicales C5-C6, plástico sólido transparente.....                                   | 48  |
| 2.2.4 Vértebras cervicales con músculos.....   | 48  |
| 2.2.5 Cráneo clásico didáctico con columna cervical, 4 partes - <i>3B Smart Anatomy</i> .....        | 49  |
| 2.2.6 Estudio del estado de deformaciones en el maxilar superior durante la mordida .....            | 50  |
| 2.2.7 Modelo numérico .....  | 51  |
| CAPÍTULO 3: MATERIAL Y MÉTODOS.....  | 53  |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO, DISEÑO Y PUESTA A PUNTO .....  | 53  |
| 3.1.1 Modelo de cráneo.....  | 53  |
| 3.1.2 Soporte. Simulación articulación. Simulación de vértebras cervicales. Base. ....               | 54  |
| 3.1.3 Inserciones musculares. ....   | 60  |
| 3.1.4 Sistema de transmisión de carga y movimiento. ....   | 62  |
| 3.1.5 Registro de movimientos. ....  | 63  |
| 3.2 ESTUDIO CINÉTICO .....   | 68  |
| 3.2.1 Problema no determinista / Biomecánica muscular.....   | 68  |
| 3.2.2 Modelos simplificados. Ecuaciones de equilibrio y determinación de reacciones articulares..... | 71  |
| 3.2.2.1 Introducción y objetivo de los modelos .....   | 71  |
| 3.2.2.2 Movimientos del raquis cervical superior .....   | 75  |
| <i>Equilibrio del Recto Posterior Mayor</i> .....  | 76  |
| <i>Flexión y extensión por acción de los músculos infrahioideos y el recto posterior mayor</i> ..... | 89  |
| <i>Rotación por acción del oblicuo menor de la cabeza y del complejo mayor</i> .....                 | 99  |
| 3.2.2.3 Movimientos del raquis cervical inferior .....   | 104 |
| <i>Equilibrio</i> .....  | 104 |
| <i>Movimiento de flexoextensión</i> .....  | 117 |
| <i>Movimientos de inclinación-rotación</i> .....   | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....         | 125 |
| CAPÍTULO 5: PRESUPUESTOS Y PLANIFICACIÓN TEMPORAL..... | 127 |
| 5.1 Presupuestos .....                                 | 127 |
| 5.2 Planificación.....                                 | 129 |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                 | 132 |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS Y TABLAS .....                      | 138 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                     | 139 |
| ANEXOS .....   | 144 |

# CAPÍTULO 1: JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

En este proyecto se tiene como objetivo la elaboración de un modelo físico biomecánico de cráneo y raquis cervical apto para el estudio de movimientos y fuerzas musculares debido a la ausencia de modelos biomecánicos de estas características en el mercado y a la elevada importancia que tiene el estudio de los movimientos del raquis cervical por parte de los traumatólogos. Para cumplir los objetivos, se comenzará realizando un profundo estudio acerca de la anatomía del sistema musculoesquelético para tener una correcta comprensión acerca de la estructura de la cabeza y del cuello. A continuación, se pasará a un estudio de la fisiología del raquis cervical, que permitirá conocer los tipos de movimientos que es capaz de realizar el cuello.

Una vez asentados los fundamentos teóricos, se comenzará a precisar que músculos serán representados en el modelo debido a su relevancia a la hora de reproducir movimientos. Con estos músculos y el modelo de cráneo adquirido a 3D *Scientific anatomy* se elaborará un modelo físico biomecánico del raquis cervical, que permita la representación de cada uno de los movimientos de la cabeza.

Para garantizar que el modelo diseñado cumple los fundamentos teóricos estudiados, se desarrollarán una serie de ensayos en los que se representará cada uno de los movimientos del cuello, dividiendo los ensayos en función de la articulación cervical que esté trabajando, en movimientos del raquis cervical superior y raquis cervical inferior.

Se realizarán equilibrios estáticos en algunos de estos ensayos para sacar conclusiones acerca de la relación que hay entre los músculos agonistas y antagonistas y las reacciones producidas en cada movimiento en las articulaciones cervicales.



## CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

### 2.1 ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA DEL RAQUIS CERVICAL

El sistema musculoesquelético proporciona forma, estabilidad y movimiento al cuerpo humano, este está formado por los huesos, músculos, tendones, ligamentos, articulaciones, cartílagos y otras clases de tejido conjuntivo.

#### 2.1.1 Planos anatómicos

Antes de comenzar el estudio anatómico, se realizará una introducción a los diferentes planos atómicos que se pueden encontrar para estudiar los diferentes componentes del cuerpo humano.

Tipos de corte:

- **Corte sagital:** divide el cuerpo en dos mitades “casi” iguales, una derecha y otra izquierda, solo hay un corte sagital en sí, los cortes paralelos a este se denominan cortes parasagitales. La representación se hará de derecha a izquierda.
- **Corte coronal o frontal:** divide el cuerpo en anterior y posterior. La representación se hará siempre de atrás hacia adelante.
- **Corte axial o transversal:** divide al paciente en superior e inferior. La representación será de arriba hacia abajo (a excepción del cráneo).

En la imagen se puede observar una clara idea de lo explicado anteriormente: en color verde queda representado el corte axial o transversal; en color rosa el corte sagital y por último en color azul, el corte coronal o frontal.

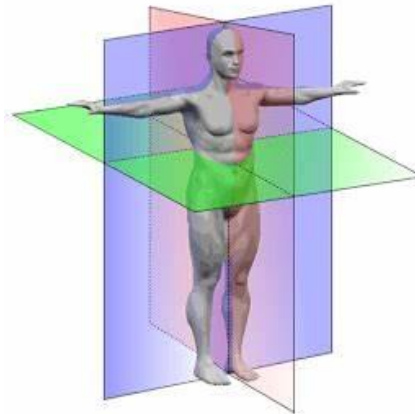


Figura 1. Planos anatómicos [1]

## 2.1.2 Tejido conjuntivo

El tejido conjuntivo se encarga de sostener, proteger, y estructurar el organismo, a su vez, almacena grasa, ayuda a desplazar nutrientes y otras sustancias entre los tejidos y órganos y de reparar daños en los tejidos.

El tejido conjuntivo este compuesto de una estructura de tipo fibroso, formado por fibras de colágeno, elastina y reticulina rodeado de una matriz de consistencia variable compuesta por agua, sales minerales, polipéptidos y azúcares complejos.

Al hacer referencia al tejido conjuntivo, se suele hacer llamada al conjunto de los tejidos conectivos, como puede ser la sangre.

## 2.1.3 Huesos

### 2.1.3.1 Introducción

Los huesos, desempeñan las siguientes funciones:

- Proporcionan una estructura rígida al cuerpo.
- Posibilita la acción mecánica de la musculatura.
- Crean una estructura que protege los órganos internos.
- Mantienen las reservas del calcio y fósforo del organismo.
- Formación de glóbulos rojos en la sangre.

Dependiendo de cual se la función específica de los huesos, estos presentarán una forma y tamaño distintos, pero siempre guardando una estructura común. La parte exterior y dura, denominada hueso cortical (80% del volumen total del hueso), está compuesta por proteínas como el colágeno y una sustancia denominada hidroxipatita constituida por calcio y otros minerales. El interior, manteniendo la continuidad, se encuentra una zona de aspecto esponjoso denominado hueso trabecular (20% del volumen total del hueso), es más blanda que la parte externa. La médula ósea es el tejido que rellena los huecos del hueso trabecular y contiene las células especializadas, también denominadas células madre que producen las células sanguíneas. También se pueden apreciar vasos sanguíneos, que aportan sangre al hueso y nervios.

Según su morfología, los huesos se pueden clasificar en:

- **Huesos largos:** los de mayor longitud, como el fémur.
- **Huesos cortos:** de menor extensión.
- **Huesos planos:** de disposición ancha y plana, para proteger los órganos internos del cuerpo, como pueden ser los huesos del cráneo y del tórax.
- **Huesos irregulares:** Por su morfología no entra en ninguno de los anteriores, pudiendo ser una combinación de estos, encontramos en este apartado los huesos de la mandíbula o las vértebras.

### 2.1.3.2 Vertebras

Una vértebra a nivel general consta de dos partes fundamentales, el cuerpo y el arco vertebral posterior.

En el arco vertebral (parte posterior), se extienden las apófisis, transversa (laterales) y espinosa (posterior) cuyas funciones son:

- La inserción de músculos y ligamentos.
- Función de palanca para la acción de músculos.
- Son el punto de articulación con vértebras adyacentes.

El cuerpo vertebral (parte anterior) se encarga de soportar el peso del conjunto y aumenta el tamaño desde la vértebra C1 hasta la L5.

El arco vertebral y el cuerpo están firmemente unidos mediante dos pedículos. También se puede observar el agujero vertebral, los cuales conjuntamente forman un conducto, denominado canal vertebral que contiene y protege la médula espinal y sus membranas protectoras, juntamente con los vasos sanguíneos, tejido conjuntivo, grasa y parte proximal de los nervios espinales.

#### Región cervical

Esta introducción se centrará en las vértebras cervicales puesto que son las que serán importantes a la hora de desarrollar el trabajo y la simulación de los movimientos de la cabeza. Estas se encuentran entre el tórax y el cráneo, constituyen el esqueleto, y gran parte del marco muscular del cuello, hay siete de estas.

Su función principal es soportar y mover la cabeza y transmitir la médula espinal y las arterias vertebrales entre la cabeza y el cuello. Son las vértebras más finas. La apófisis espinosa, es corta y bífida, como se puede observar en la parte inferior de la imagen.

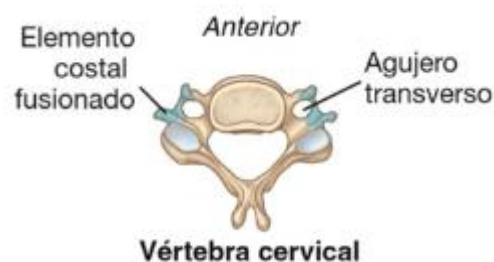


Figura 2. Vértebra cervical tipo. [2]

En la apófisis transversa tiene forma de túnel y se encuentra perforada por un orificio denominado agujero transverso. El agujero vertebral tiene forma de triángulo.

La vertebra más cercana al cráneo se denomina atlas y la segunda más cercana, axis, ambas están especializadas para poder acomodar los movimientos de la cabeza.

#### Atlas y Axis

Atlas es como se denomina la primera vértebra cervical (C1) en la Terminología Anatómica y en la Nomenclatura Anatómica Veterinaria. El principal rasgo distintivo del atlas es que carece de cuerpo vertebral. Se adjunta una imagen para un mejor entendimiento de la forma de esta. Las apófisis transversas del atlas son muy grandes, las mayores de todas las cervicales para poder hacer palanca a los músculos.

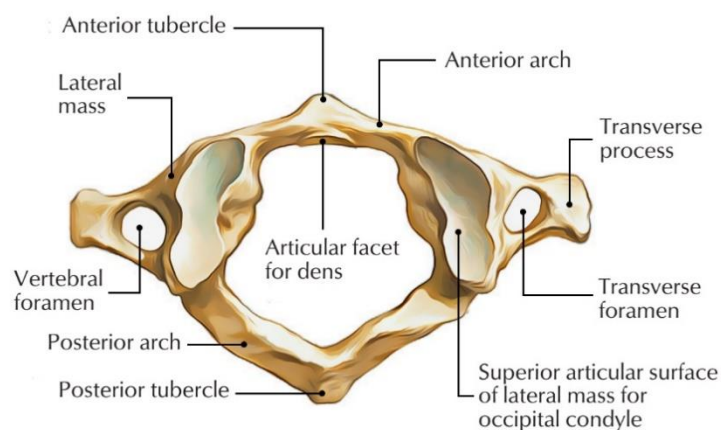
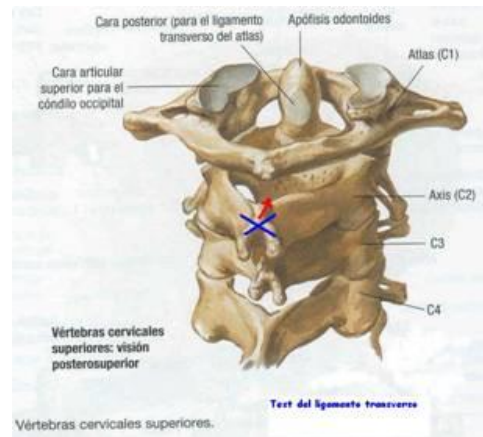
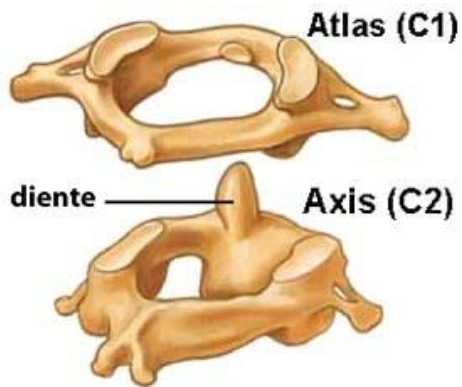


Figura 3. Primera vértebra cervical, atlas [3].

La parte superior del atlas tiene forma anular y está constituida por dos masas laterales interconectadas por un arco anterior y un arco posterior. Cada masa lateral se articula superiormente con un cóndilo occipital del cráneo y por debajo con la apófisis articular superior del vertebra C2 (el axis).

La articulación entre el atlas y el axis se desarrolla en el arco anterior que posee una faceta oval cóncava para poder articularse con el diente del axis que es convexo (gran apófisis que constituye la característica principal del axis se extiende superiormente desde el cuerpo vertebral), este diente o apófisis odontoides, se mantiene en posición por el potente ligamento transversario del atlas. Se observa en la primera imagen la forma del axis, con el diente, protuberancia que sobresale, comparándola con la forma del atlas. En la segunda imagen se observa la conexión entre ambas.



- En este punto hay dos articulaciones:
- **Articulación atlantooccipital:** permite la inclinación de arriba y debajo de la columna vertebral.
  - **Articulación atloaxial:** permitida por el diente del axis puesto que actúa como un pivote permitiendo que el atlas y la cabeza roten sobre el eje, de lado a lado.

Tercera vértebra cervical

Esta vértebra es parecida a las cuatro últimas vértebras cervicales, por tanto, se denomina vértebra cervical tipo como ya se ha desarrollado anteriormente.

Región torácica

Se caracterizan por su articulación con las costillas y su función es soportar el tórax.



Figura 6. Vértebra torácica. [12]

Región Lumbar

Se posicionan tras las vértebras torácicas, forman el soporte esquelético de la pared abdominal posterior y se caracterizan por su gran tamaño.



Figura 7. Vértebra lumbar. [12]

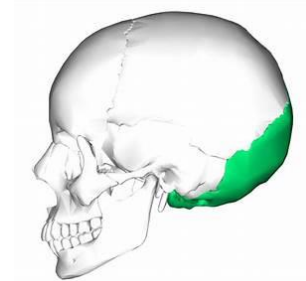
### Región sacra

Se encarga de transmitir el peso a los miembros inferiores a través de los huesos pélvicos.

#### **2.1.3.3 Hueso occipital**

Dentro de la infinidad de huesos que hay en el cuerpo humano, cabe destacar para el estudio de los movimientos de la cabeza, el hueso occipital, dada la frecuencia con la que va a ser mencionado debido a que forma parte de las conexiones entre los músculos del cuello.

El hueso occipital se encuentra en la visión posterior del cráneo junto con los huesos parietal y temporal. El punto más saliente de la protuberancia occipital externa es el inión. Se adjunta una imagen para un mejor entendimiento de este.



*Figura 8. Hueso occipital de la cabeza. [6]*

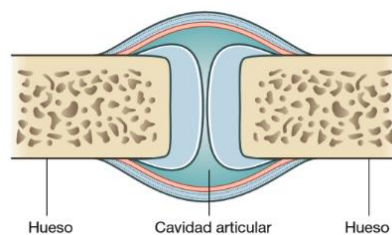
#### **2.1.4 Articulaciones**

Se define articulación como punto donde dos elementos esqueléticos contactan.

##### **2.1.4.1 Articulaciones sinoviales**

Una articulación sinovial es aquella en la que los huesos no están en contacto y están separados por una cavidad articular. Este tipo de articulaciones posee una serie de rasgos característicos, en primer lugar, una capa de cartílago, parte en contacto con el hueso. La segunda característica de las articulaciones sinoviales es la presencia de una membrana fibrosa externa.

Se adjunta una imagen de la articulación sinovial, donde se observa el hueso y la cavidad articular:



*Figura 9. Articulación sinovial. [12]*

##### **2.1.4.2 Articulaciones sólidas**

Las articulaciones sólidas no poseen esta cavidad mencionada y están unidos por el tejido conjuntivo. Los movimientos en estas articulaciones están más restringidos que

en las sinoviales. En función del elemento de unión entre huesos, tenemos uniones fibrosas y cartilaginosas.

Las articulaciones cartilaginosas incluyen las sínfisis, en las que dos huesos separados se interconectan por cartílago, tipo de unión entre vertebras adyacentes.

Se adjunta una imagen de la articulación sólida.

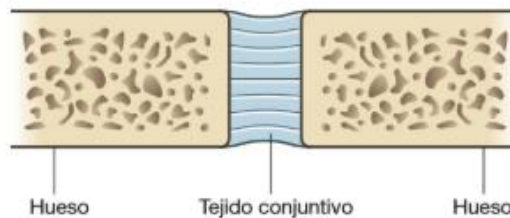


Figura 10. Articulación sólida. [12]

Este estudio se centrará en las articulaciones cartilaginosas tipo sínfisis puesto que son las que se encuentran entre vertebras y de esta forma poder entender con más profundidad las articulaciones del cuello junto con sus movimientos.

La sínfisis entre cuerpos vertebrales adyacentes, está formada por una capa de cartílago hialino en cada cuerpo vertebral y un disco intervertebral que se sitúa entre dichas capas. El disco intervertebral, está formado por un anillo fibroso externo que rodea a un núcleo pulposo central, como puede observarse en la imagen.

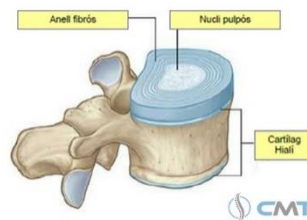


Figura 11. Sínfisis entre cuerpos vertebrales, se aprecia el cuerpo y el disco intervertebral. [12]

El anillo fibroso cuyo componente principal es el colágeno, como se ve, está dispuesto de forma laminar, de forma que limita la rotación individual de las vértebras, haciendo que estas solo puedan rotar conjuntamente. El núcleo pulposo es de naturaleza gelatinosa y se encarga de absorber las fuerzas de compresión entre las vértebras.

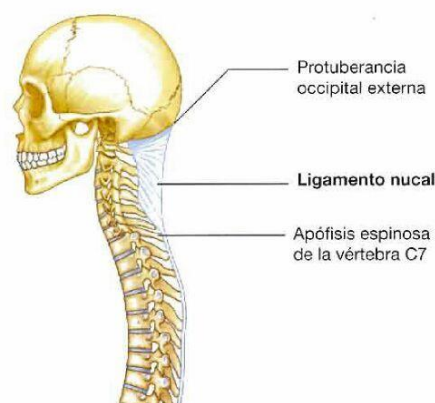
### 2.1.5 Ligamentos

Los ligamentos son estructuras conformadas por tejido fibroso, principalmente colágeno, que tiene forma de bandas y se fija a los huesos por sus extremos siendo necesarios para dar estabilidad a las articulaciones. Una vez establecida la definición

de ligamento, este estudio se centrará en el ligamento nucal encargado de reforzar y mantener las articulaciones intervertebrales.

El **ligamento nucal** es una estructura triangular situada en el plano medio sagital cuyas características son las siguientes:

- La base del triángulo está unida al cráneo, desde la protuberancia occipital externa hasta el agujero magno.
- El vértice del triángulo está unido al extremo de la apófisis espinosa de la vértebra C7.
- La cara profunda del triángulo está unida al tubérculo posterior de la vértebra C1 y a las apófisis espinosas de las otras vértebras cervicales.



*Figura 12. Ligamento nucal con origen en la protuberancia externa del occipital. [7]*

En la imagen superior se aprecia la base del triángulo donde la parte situada más a la derecha es la protuberancia occipital externa mencionada anteriormente y siguiendo el contorno del cráneo hacia la izquierda de la imagen, se llega hasta el agujero magno. De la misma manera también puede apreciarse el vértice del triángulo situado en la apófisis espinosa de la vértebra C7.

El ligamento nucal tiene las siguientes funciones:

- Soportar la cabeza.
- Resiste la flexión.
- Facilita el retorno de la cabeza a la posición anatómica (forma en la que se ubica el cuerpo humano en el espacio al momento de ser descrita cada una de sus partes).

### **2.1.6 Músculos**

Los músculos del cuerpo humano son los principales tejidos del sistema musculoesquelético, estos son los responsables de que el cuerpo se mueva. La característica principal que define los músculos es su capacidad de contracción, cuando las fibras de un músculo reciben la orden a través del sistema nervioso, este



se contrae, al contraerse, se hace más corto y tira del hueso o de la estructura que sujeta. Cuando la orden termina, vuelve a la posición de reposo.

Hay que destacar que, en base a los movimientos del cuello, cuando se hace referencia a flexión, se refiere al movimiento hacia adelante del cuello y, por el contrario, la extensión, se refiere al movimiento hacia atrás del cuello.

Para realizar un profundo estudio de la musculatura del cuello, se dividirá en diferentes grupos:

### 2.1.6.1 Músculos del triángulo anterior del cuello

Se realizará una breve introducción de estos músculos puesto que, en el apartado de raquis cervical, se procederá a estudiar con profundidad estos grupos.

Como se observa en la imagen, el triángulo anterior del cuello está limitado lateralmente por el borde anterior del músculo esternocleidomastoideo, superiormente por el borde inferior de la mandíbula, y medialmente por la línea media del cuello.

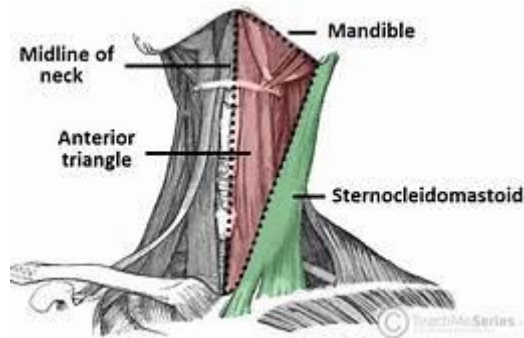


Figura 13. Triángulo anterior del cuello, donde se aprecia el esternocleidomastoideo, la mandíbula y la línea media del cuello. [8]

Los músculos del triángulo anterior del cuello se van a agrupar según su localización respecto del hueso hioides. Los músculos superiores al hioides se clasifican como músculos suprahioides e incluyen el estilohioides, digástrico, milohioides y geniohioides. No se procederá a la explicación de estos, puesto que su función es elevar el hioides durante la deglución.

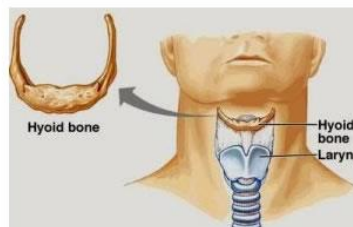


Figura 14. Hueso hioides. [9]

Los músculos inferiores al hioides son los músculos infrahioides e incluyen el omohioideo, esternohioideo, tirohioideo y esternotiroideo, igual que el grupo de los suprahioides, no serán desarrollados.

### 2.1.6.2 Músculos del triángulo posterior del cuello

El triángulo posterior del cuello se encuentra sobre la cara lateral del cuello y continúa directamente con el miembro superior. Como se puede apreciar en la imagen, se encuentra limitado por:

- Anteriormente por el borde posterior del músculo esternocleidomastoideo.
- Posteriormente por el borde anterior del músculo trapecio.
- Su base se encuentra en el tercio medio de la clavícula.
- Su vértice es el hueso occipital.

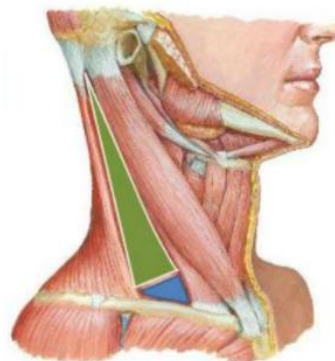


Figura 15. Triángulo posterior del cuello. [10]

Solo se comentará el esternocleidomastoideo puesto que es el único que trabaja en el movimiento de la cabeza dentro de este grupo.

#### Esternocleidomastoideo

- *Origen:* Parte superior del a superficie anterior del manubrio del esternón.
- *Inserción:* Mitad lateral de la línea nuchal superior.
- *Inervación:* Nervio accesorio (XI) y ramas de las ramas anteriores de C2 a C3 (C4).
- *Función:* individualmente: inclina la cabeza hacia el hombro del mismo lado girando la cabeza para volver la cara hacia el lado opuesto.

### 2.1.6.3 Músculos espinotransversos

Se encuentran dentro de la región dorsal del tronco.

#### Esplenio de la cabeza

- *Origen:* Mitad inferior del ligamento nuchal, apófisis espinosas de C7 a T4.
- *Inserción:* Apófisis mastoides, cráneo por debajo del tercio lateral de la línea nuchal superior.
- *Inervación:* Con inervación se hace mención del nervio que lleva la información necesaria para contraer el músculo. Ramos posteriores de los nervios cervicales medios.
- *Función:* Puesto que son dos músculos, trabajarán conjunta e individualmente. Conjuntamente, dirigen la cabeza hacia atrás al contraerse, extendiendo el cuello; individualmente, dirigen y rotan la cabeza hacia un lado (giran la cara hacia el mismo lado).

### Esplenio del cuello

- *Origen:* Apófisis espinosas de T3 a T6.
- *Inserción:* Apófisis transversas de C1 a C3.
- *Inervación:* Ramos posteriores de los nervios cervicales inferiores.
- *Función:* Conjuntamente extienden el cuello; individualmente dirigen y rotan la cabeza hacia un lado (giran la cara hacia el mismo lado).

Se adjunta una imagen de ambos músculos donde se puede observar la inserción y el origen de ambos:

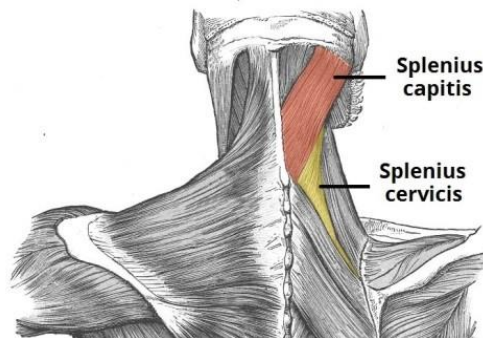


Figura 16. Esplenio de la cabeza y esplenico del cuello en la parte posterior del cuello. [11]

### **2.1.6.4 Músculos suboccipitales**

Los músculos suboccipitales son un grupo pequeño de músculos profundos en la región cervical superior, en la base del hueso occipital que de nuevo pertenecen a la región dorsal del tronco. Este grupo de músculos se encarga mediante su contracción de mover la cabeza, produciendo una extensión de esta en la **articulación atloaxoidea** ya mencionada en el apartado de huesos. Estos conectan la vértebra C1 (el atlas) con la vértebra C2 (el axis) y a su vez conectan ambas vértebras con la base del cráneo.

La ubicación de estos músculos es muy importante, puesto que en función de donde están colocados, al contraerse, pueden realizar un movimiento distinto.

#### Recto posterior mayor de la cabeza

- *Origen:* Apófisis espinosa del axis (C2).
- *Inserción:* Porción lateral del hueso occipital por debajo de la línea nugal inferior.
- *Inervación:* Ramo posterior de C1.
- *Función:* Extensión de la cabeza; rotación de la cara hacia el mismo lado del músculo.

#### Recto posterior menor de la cabeza

- *Origen:* Apófisis espinosa del atlas (C1).

- *Inserción:* Porción media del hueso occipital por debajo de la línea nucal inferior.
- *Inervación:* Ramo posterior de C1.
- *Función:* Extensión de la cabeza.

#### Oblicuo superior de la cabeza

- *Origen:* Apófisis transversa del atlas (C1).
- *Inserción:* Hueso occipital entre las líneas nucales superior e inferior.
- *Inervación:* Ramo posterior de C1.
- *Función:* Extensión de la cabeza e inclinación de esta hacia el mismo lado.

#### Oblicuo inferior de la cabeza

- *Origen:* Apófisis transversa del axis (C2).
- *Inserción:* Apófisis transversa del atlas (C1).
- *Inervación:* Ramo posterior de C1.
- *Función:* Rotación de la cara hacia el mismo lado.

### 2.1.7 Introducción al raquis cervical

Raquis es un concepto que deriva del griego y que, en el ámbito de la anatomía, se utiliza como sinónimo de columna vertebral. El raquis en este sentido es la estructura formada por huesos, cartílagos y fibra. Se extiende desde la cabeza hasta la pelvis permitiendo que el individuo se mantenga en pie y pueda realizar diversos movimientos. El raquis consta de treinta y tres vértebras que se articulan entre sí que se van a distribuir en distintas zonas o curvaturas: curvatura cervical, curvatura dorsal, curvatura lumbar y curvatura sacra. Las funciones del raquis son las siguientes: conservar el centro de gravedad, proteger la médula espinal y dar soporte al esqueleto.

A continuación, se desarrollará el raquis cervical puesto que es el que interesa para este estudio. El raquis cervical está constituido por dos partes anatómicas y funcionalmente distintas:

- **Raquis cervical superior** o raquis suboccipital, compuesto por la primera vértebra cervical (C1) o atlas, y la segunda vértebra cervical (C2) o axis. Estos huesos están unidos entre sí además de con el occipital por una compleja cadena articular con tres ejes y tres grados de libertad.
- **Raquis cervical inferior:** se extiende desde la meseta inferior del axis hasta la meseta superior de la primera vértebra dorsal. Las articulaciones del raquis cervical inferior poseen dos tipos de movimiento: movimientos de flexoextensión y movimientos mixtos de inclinación-rotación.

En la imagen se aprecia la zona del raquis cervical superior con el número 1 y la del raquis cervical inferior con el número 2.



*Figura 17. Cráneo junto con vértebras cervicales divididas en raquis cervical inferior y superior. [13]*

## **2.1.8 Constitución esquemática de las tres primeras vértebras cervicales**

### **2.1.8.1 Atlas**

El atlas posee un anillo, dos masas laterales ovaladas que tienen una carilla articular superior cóncava que se articula con los cóndilos occipital, y una carilla articular inferior convexa que se articula con la carilla superior del axis. El arco anterior del atlas tiene por cara posterior una carilla cartilaginosa ovalada que se articula con las apófisis odontoides del axis. En el arco posterior del atlas no hay apófisis espinosa si no una cresta vertical. En las apófisis transversales se observa un agujero para dar cabida a la arteria vertebral.

### **2.1.8.2 Axis**

La característica principal del axis es la presencia de las apófisis odontoides en la cara superior del cuerpo vertebral que sirve de pivote a la articulación atlantoaxoidea. La parte superior también da soporte a las dos carillas articulares que servirán de unión con el atlas y con las vértebras inferiores. La apófisis espinosa es bífida como en el resto de las vértebras cervicales. La apófisis transversa de nuevo presenta un orificio por el que circula la arteria vertebral.

### **2.1.8.3 Vértebra cervical tipo**

Se denomina vértebra cervical tipo a las vértebras que se encuentran en la posición C3 hasta la C7. Posee un cuerpo vertebral que tiene forma de paralelepípedo en el que en su cara superior presenta una meseta vertebral superior que está limitada lateralmente por las apófisis unciformes, y que presenta carillas para ser articulada con las vértebras superior e inferior. El arco posterior está formado por las apófisis articulares cada una de las cuales contiene una carilla superior y se articula con la

carilla inferior de la vértebra suprayacente. Estas apófisis articulares se encuentran unidas al cuerpo vertebral por el pedículo, el cual soporta también la apófisis transversa que contiene un orificio por el que circula la arteria vertebral. La apófisis transversa como ocurre en el axis está compuesta por dos tubérculos.

## 2.1.9 Raquis cervical superior

### 2.1.9.1 Articulaciones atloidoaxoideas y atloidoodontoides

Tres articulaciones son las que garantizan la unión mecánica del atlas y el axis:

- Una articulación axial, la **atloidoodontoides**, a la que la apófisis odontoides o dientes del axis sirve de pivote.
- Dos articulaciones laterales y simétricas, las **atloidoaxoideas**, que establecen el nexo entre la cara inferior de las masas laterales del atlas y las superficies articulares superiores del axis.

Se desarrollarán a continuación los movimientos de flexoextensión y rotación que permiten estas articulaciones:

#### Flexoextensión

En un primer estudio, se va a suponer que durante el **movimiento de flexión** (movimiento de la cabeza hacia delante), las masas laterales del atlas ruedan sin deslizarse sobre las superficies superiores del axis, por tanto, el punto de contacto entre el atlas y el axis se desplazará hacia delante, esto en lo referido a la articulación atloidoaxoidea. Basándose ahora en la articulación atloidoodontoides se observa que el punto de contacto entre el arco anterior del atlas y la carilla anterior del odontoides cambia, apreciándose un bostezo (fenómeno que describe la apertura de la articulación) hacia arriba en la articulación. El movimiento de flexión queda definido en la siguiente imagen, donde se aprecia el deslizamiento de las masas del atlas sobre las superficies superiores del axis:

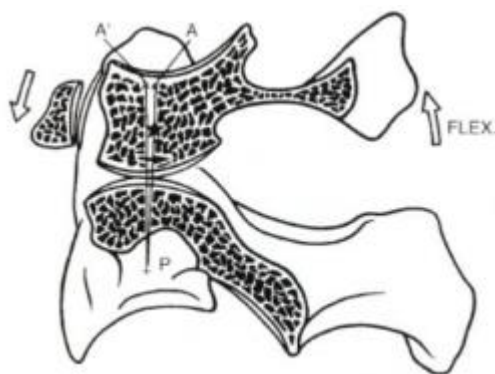


Figura 18. Movimiento relativo de flexión entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13]

En el **movimiento de extensión** suponiendo que no hay deslizamiento, ocurrirá lo descrito anteriormente en sentido contrario. Las masas laterales del atlas ruedan sobre la superficie del axis, cambiando el punto de contacto, desplazándose este hacia la derecha y el bostezo de la articulación atloidoontoidea ocurrirá en este caso en la parte inferior. En la imagen adjunta se observa este movimiento, apreciándose en la parte izquierda el bostezo.

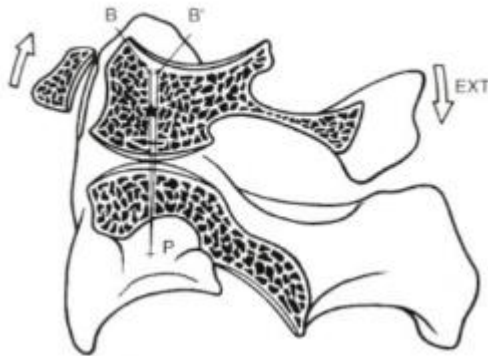


Figura 19. Movimiento relativo de extensión entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13]

En realidad, si hay deslizamiento entre las masas laterales del atlas y la parte superior del axis, puesto que el bostezo de la articulación atloidoontoidea no existe por la presencia del ligamento transverso, que mantiene el arco anterior del atlas estrechamente unido al odontoides.

### Rotación

La articulación atloidoontoidea es una trocoide (articulación sinovial en la que solo se permite movimiento en el eje longitudinal con movimientos de rotación lateral y rotación medial) con dos superficies encajadas la una sobre la otra:

- **Superficie cilíndrica maciza:** la apófisis odontoide. Debido a que no es totalmente cilíndrica, aparte de realizar el movimiento de rotación, es capaz también de realizar el movimiento de flexoextensión teniendo así dos grados de libertad. Esta apófisis odontoide presenta dos carillas articulares, anterior y posterior para su correcta articulación con el atlas (C1).
- **Cilindro hueco:** en el que irá encajada la apófisis odontoide. Este cilindro hueco está formado por delante por el arco anterior del atlas y por los lados, por las masas laterales del atlas. En las masas laterales del atlas, se fija un potente ligamento que se extiende transversalmente llamado ligamento transverso que fija la articulación.

En conclusión, a lo anteriormente explicado, la odontoides está incrustada en el interior de un anillo osteoligamentoso formado por el atlas y el ligamento transverso. A continuación, se explicará cómo se produce este movimiento de rotación: la odontoides permanece fija, mientras que el anillo osteoligamentoso gira en el sentido de la

rotación; simultáneamente se produce un desplazamiento en las dos articulaciones atloidoaxoideas derecha e izquierda que están mecánicamente unidas.

### 2.1.9.2 Articulación occipitoatloidea

La función de la articulación occipitoatloidea es unir los cóndilos occipitales y las carillas superiores del atlas, por tanto, realmente hay dos articulaciones pares y simétricas mecánicamente unidas. La articulación occipitoatloidea es una enartrosis, es decir, es una articulación de superficie esférica con tres ejes, y, por lo tanto, con tres grados de libertad:

- **Rotación axial:** en torno a un eje vertical.
- **Flexoextensión:** entorno a un eje transversal.
- **Inclinación lateral:** entorno a un eje anteroposterior.

#### Rotación

Para explicar la rotación de la articulación occipitoatloidea lo primero que hay que hacer es identificar qué elementos intervienen en esta: occipital, atlas, axis y ligamento occipitodontoideo lateral. Este ligamento que no se ha explicado con anterioridad, tiene su origen en el borde del agujero occipital y su inserción en el borde superior del arco anterior del atlas y presenta dos capas: una capa profunda y delgada; capa superficial que presenta dos refuerzos, un haz anterior y un haz occipitoatloideo anterolateral.

Para entender con precisión el movimiento se adjunta la siguiente imagen en la que se observan los elementos anteriormente mencionados. Con la letra A, se ha seccionado el occipital, con la B, las masas laterales del atlas. El axis se puede ver en la parte inferior de la imagen de forma completa.

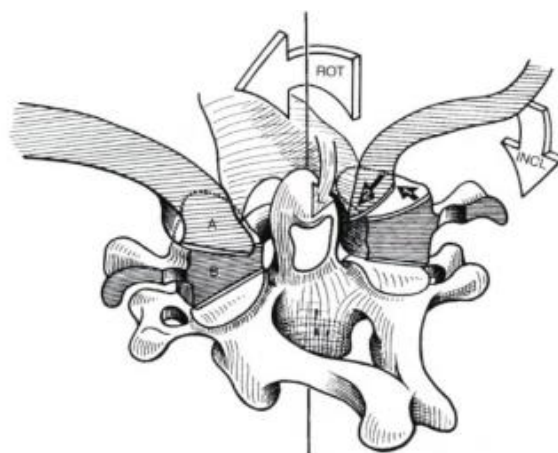


Figura 20. Movimiento relativo de rotación entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13]

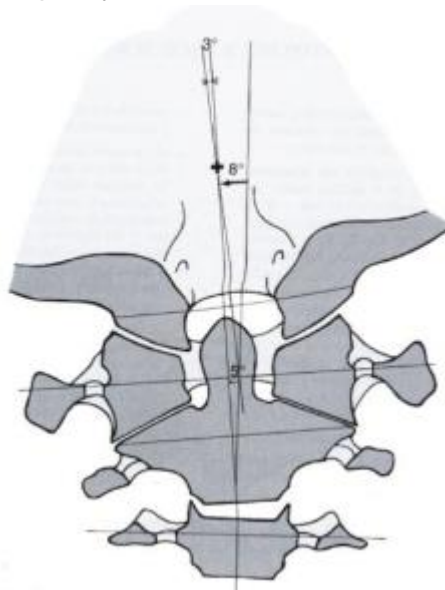
En el movimiento de rotación el occipital gira sobre el atlas, pero también se produce un movimiento general de rotación del atlas sobre el axis que se efectúa en torno al eje vertical que pasa por el centro del odontoides. Esta rotación no es ideal, puesto que es acompañada de otros movimientos debido a la presencia e intervención de



ligamentos que son tensionados durante el movimiento, es especial el ligamento occipitodontoideo lateral. Este ligamento cuando se produce la rotación se enrolla alrededor del odontoides y se tensa, produciendo así un desplazamiento del cóndilo del occipital. Así, por ejemplo, si se produjese una rotación hacia la izquierda, como se observa en la imagen superior, se produciría un deslizamiento hacia adelante del cóndilo derecho del occipital sobre la masa lateral del atlas, pero simultáneamente, el ligamento occipitodontoideo lateral se tensa, produciendo un desplazamiento de 2 a 3 mm hacia la izquierda del cóndilo derecho del occipital. También se produce una inclinación del occipital hacia la derecha, debido a esta tensión. En conclusión, no existe una rotación pura, sino una rotación asociada a una traslación y a una inclinación.

### Inclinación lateral

Todo el proceso que se va a comentar queda escenificado en la imagen de la derecha. En la inclinación lateral se produce por la intervención del axis y la tercera vértebra cervical (C3) por una parte, y, por otra, la intervención entre el occipital y el atlas. La articulación atlóidoaxoidea, no interviene, no produciéndose un movimiento relativo entre el atlas y el axis. Cuando se produce la inclinación lateral, entre el occipital y el atlas, hay poca amplitud de movimiento debido a los límites a los que sometida esta articulación por el ligamento occipitodontoideo lateral y la cápsula de las occipitoatloideas (cápsula articular que envuelve las superficies articulares y está reforzada a los lados por los ligamentos laterales). Por tanto, y a modo de ejemplo, cuando se produce una inclinación hacia la izquierda, aparece un deslizamiento de los cóndilos occipitales hacia la derecha, si se produjese la inclinación hacia la derecha, el deslizamiento sería hacia la izquierda. Siguiendo el ejemplo de la inclinación hacia la izquierda, cabe destacar que el cóndilo occipital izquierdo se aproxima al odontoides, pero sin contactar con este, limitado el movimiento por la cápsula de las occipitoatloideas y por el ligamento occipitodontoideo. La inclinación total entre el occipital y la tercera cervical es de  $8^\circ$ , que se reparten en  $5^\circ$  entre el axis y la tercera vértebra (C3), y  $3^\circ$  entre el occipital y el atlas.

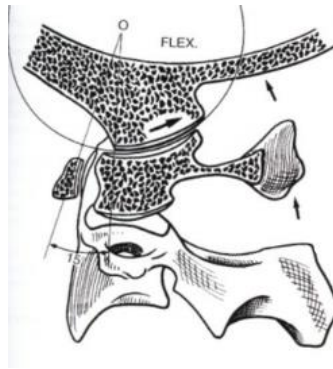


*Figura 21. Inclinación lateral producida por el movimiento relativo del atlas (C1) y el axis (C2). [13]*

### *Flexoextensión del occipital sobre el atlas*

Este movimiento se lleva a cabo mediante el deslizamiento de los cóndilos occipitales sobre las masas laterales del atlas.

Durante la **flexión**, los cóndilos occipitales, retroceden sobre las masas laterales del atlas y la concha occipital se aleja del arco posterior del atlas y simultáneamente se produce una flexión atloidoaxoidea, alejándose también el arco posterior del atlas del arco posterior del axis. La flexión está limitada por los ligamentos posteriores (membrana occipitoatloidea y el ligamento cervical posterior). En la imagen de la derecha se observan los efectos comentados.



*Figura 22. Flexión del hueso occipital sobre el atlas (C1). [13]*

Durante la **extensión**, se producirá el mismo mecanismo, pero en sentido contrario. Los cóndilos occipitales se deslizarán hacia delante, produciéndose un acercamiento entre el arco posterior del atlas y la concha del occipital y simultáneamente produciéndose una extensión en la atloidoaxoidea. El arco posterior del axis se aproxima al arco posterior del atlas. A diferencia de la flexión, la extensión se ve limitada por el contacto de estos tres elementos óseos. Todo lo desarrollado se puede comprobar en la siguiente imagen:



Figura 23. Extensión del hueso occipital sobre el atlas (C1). [13]

La amplitud total de la flexoextensión en la occipitoatloidea es de 15°.

## 2.1.10 Raquis cervical inferior

### 2.1.10.1 Flexoextensión

Se realizará un análisis de las diferentes posiciones y el estado tensional y mecánico de los elementos que participan en el movimiento.

- **Posición neutra:** Los cuerpos vertebrales, representado en gris el suprayacente y en blanco la vértebra inmediatamente inferior, están unidos por un disco vertebral que está formado exteriormente por un anillo fibroso compuesto por numerosas laminillas e interiormente por un núcleo pulposo, representado en la imagen con un círculo. En esta situación, el núcleo se encuentra en una posición estable, es decir, no se produce desplazamiento alguno desde su posición inicial y todas las laminillas del anillo fibroso se encuentran sometidas a la misma tensión. Aparte del contacto entre cuerpos vertebrales, se produce interacción a través de las apófisis articulares. Todo lo comentado se observa en la siguiente imagen:

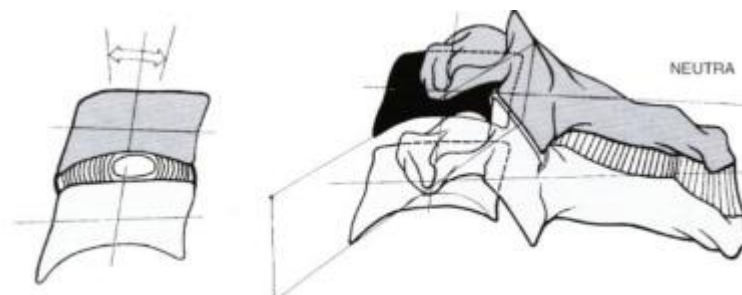
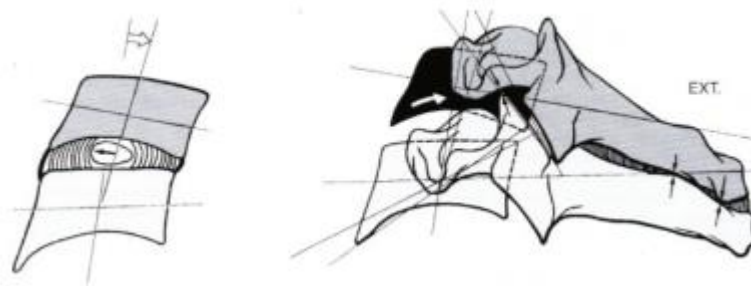


Figura 24. Posición neutra de las vértebras cervicales. [13]

- **Movimiento de extensión:** Se procede a explicar el movimiento de extensión basándose en la imagen adjuntada tras este párrafo. Observando la figura, se ve claramente como la vértebra suprayacente se inclina y se desliza hacia

atrás, el espacio entre mesetas quedará más limitado atrás que delante. El núcleo pulposo, círculo situado en el medio de las dos vértebras, se desplazará hacia la izquierda, es decir, hacia delante. De la misma forma las fibras anteriores del anillo fibroso se tensan más debido a la presión que ejerce el núcleo. Como pasaba en la posición neutral, no solo intervienen los cuerpos vertebrales, sino también las carillas articulares, las cuales se deslizan hacia abajo y hacia atrás, produciéndose un bostezo en la articulación interapofisaria (articulación sinovial de tipo plana, que se encuentra entre la carilla articular superior de las apófisis articular superior de una vértebra y la carilla articular inferior de la apófisis articular inferior de la vértebra que se encuentra directamente sobre ella). El movimiento de extensión está limitado por la tensión del ligamento vertebral común anterior y por el choque de la apófisis articular superior de la vértebra inferior sobre la apófisis transversa de la vértebra superior. También se produce contacto entre los arcos posteriores a través de los ligamentos.



*Figura 25. En la parte de la derecha, se representa el movimiento relativo de extensión entre las vértebras cervicales. A la izquierda se observa el desplazamiento del núcleo pulposo hacia la parte anterior debido a la extensión. [13]*

- **Movimiento de flexión:** en este movimiento, la vertebra suprayacente, sombreada y de color gris, se inclina y se desplaza hacia delante, lo que como se observa en la imagen, produce una disminución del grosor en la parte anterior, lo que obliga al núcleo a desplazarse hacia atrás, quedando de esta forma tensadas las fibras posteriores del anillo fibroso. La carilla inferior de la vértebra suprayacente se desplaza hacia arriba y hacia delante, a la par que se produce un bostezo hacia abajo y hacia atrás. A diferencia del movimiento de extensión, el movimiento de flexión no está limitado por los topes óseos, sino sólo por las tensiones ligamentosas.

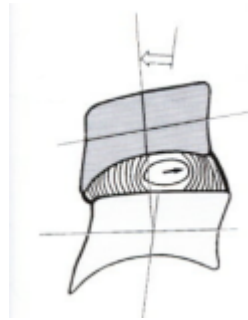
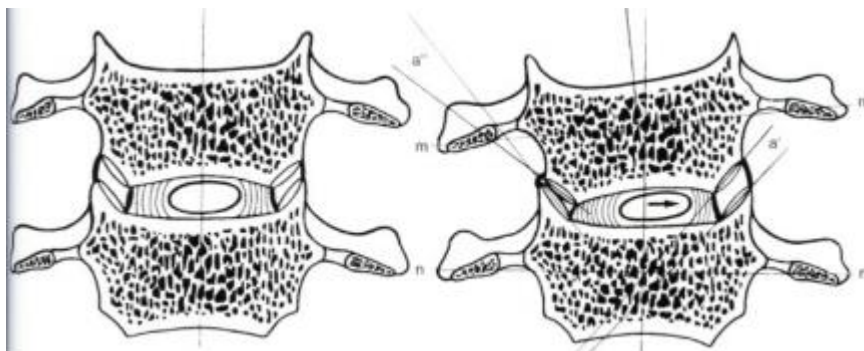


Figura 26. Desplazamiento del núcleo pulposo hacia la parte posterior debido al movimiento de flexión. [13]

### 2.1.10.2 Movimientos en las articulaciones uncovertebrales

En los movimientos del raquis cervical expuestos anteriormente se ha descrito las consecuencias que tiene sobre las articulaciones interapofisarias y los discos vertebrales, pero no se ha tenido en cuenta, que, en cada segmento del raquis cervical, hay dos pequeñas articulaciones adicionales llamadas articulaciones uncovertebrales. Se observa en la imagen de la izquierda como entre las dos vértebras, se encuentra el núcleo pulposo y el anillo fibroso, pero este anillo no llega hasta el borde de la vértebra. De hecho, en la meseta superior sobresalen dos apófisis situadas en el plano sagital, denominadas apófisis unciformes, recubiertas de cartílago y formando la articulación.

Las articulaciones uncovertebrales influyen en los movimientos de flexoextensión, de tal manera que cuando la vértebra suprayacente se desliza hacia delante o hacia atrás, se produce un deslizamiento de las carillas de las articulaciones uncovertebrales. También tiene consecuencia sobre los movimientos de inclinación, como se observa en la imagen de la derecha, produciéndose el fenómeno de bostezo, en las articulaciones uncovertebrales y como se puede apreciar, si la inclinación se produce hacia la izquierda, el núcleo se desplaza hacia la derecha, tensando de esta forma las fibras derechas del anillo fibroso.



*Figura 27. En la parte de la izquierda se representan dos vértebras cervicales en la posición de equilibrio. En la derecha se reproduce un movimiento de inclinación hacia el lado izquierdo con un desplazamiento del núcleo pulposo hacia la derecha. [13]*

## **2.1.11 Músculos**

### **2.1.11.1 Constitución y acción del músculo esternocleidomastoideo**

El músculo esternocleidomastoideo está formado por cuatro porciones: una porción profunda, el cleidomastoideo; tres porciones superficiales, la cleidooccipital, la esternooccipital y la esternomastoidea. La contracción unilateral del esternocleidomastoideo determina un triple movimiento que asocia la rotación de la cabeza hacia el lado opuesto a su contracción, la inclinación hacia el lado de su contracción y la extensión. La contracción simultánea del esternocleidomastoideo junto con el resto de los músculos del raquis cervical tiene distintos efectos:

- Si el raquis cervical permanece flexible, esta contracción bilateral conlleva una hiperlordosis del raquis cervical con una extensión de la cabeza y una flexión de este sobre el raquis dorsal.
- Si el raquis cervical permanece rígido y rectilíneo debido a la contracción de los músculos prevertebrales, la contracción simultánea del esternocleidomastoideo conlleva la flexión del raquis cervical sobre el raquis dorsal y una flexión de la cabeza hacia adelante.

### **2.1.11.2 Músculos prevertebrales**

#### *El largo del cuello*

El músculo largo del cuello es el más profundo de los músculos prevertebrales y se observa en la imagen (identificado con la abreviatura lc) que se extiende por la cara anterior del raquis cervical, desde el arco anterior del atlas (C1) hasta la tercera vértebra dorsal. El músculo largo del cuello cubre a ambos lados de la línea media la totalidad del raquis cervical.

Funciones:

- **Contracción bilateral y simétrica:** endereza la lordosis cervical y acarrea la flexión del cuello. Por tanto, desempeña un papel fundamental en la sustentación del raquis cervical.
- **Contracción unilateral:** determina una flexión del raquis y una inclinación hacia el lado de su contracción.

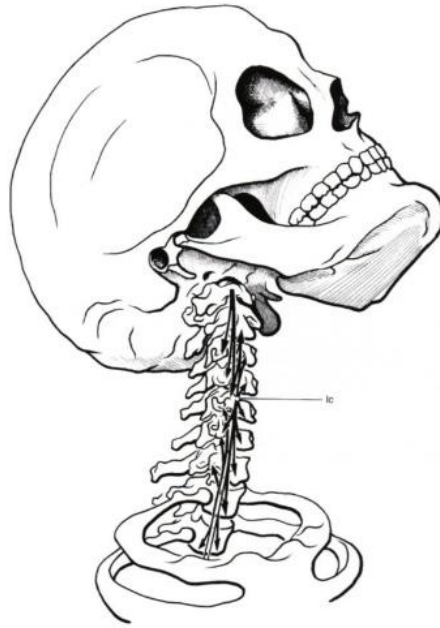


Figura 28. Representación del largo del cuello con la abreviatura de lc. [13]

#### Recto anterior mayor de la cabeza

Hay dos músculos rectos anteriores, uno a cada lado de la línea media (en la imagen se denomina con la abreviatura ra). Contacta con el recto anterior menor de la cabeza (en la imagen se denomina con la abreviatura ram) y se sitúa por delante del agujero occipital recubriendo la parte superior del músculo largo del cuello (lc). Termina mediante tendones distintos en cada uno de los tubérculos anteriores de la tercer, cuarta, quinta y sexta apófisis transversas cervicales.

Funciones:

- **Contracción simultánea** de los dos músculos rectos anteriores: determina la flexión de la cabeza sobre el raquis cervical y el enderezamiento de la lordosis de la parte superior del mismo.
- **Contracción unilateral:** determina la flexión y la inclinación de la cabeza hacia el lado de su contracción.

#### Recto anterior menor de la cabeza

Como se observa en la imagen, se sitúa detrás y por fuera del precedente y se extiende entre la apófisis basilar del occipital y la cara anterior de la masa lateral del atlas hasta el tubérculo anterior de su apófisis transversa.

Funciones:

- **Contracción simultánea** de los dos músculos homólogos: determina la flexión de la cabeza sobre el raquis cervical a nivel de la articulación occipitoatloidea.
- **Contracción unilateral:** determina un triple movimiento de flexión, rotación e inclinación hacia el lado de su contracción. Estos movimientos se efectúan en la articulación occipitoatloidea.

#### Músculo recto lateral

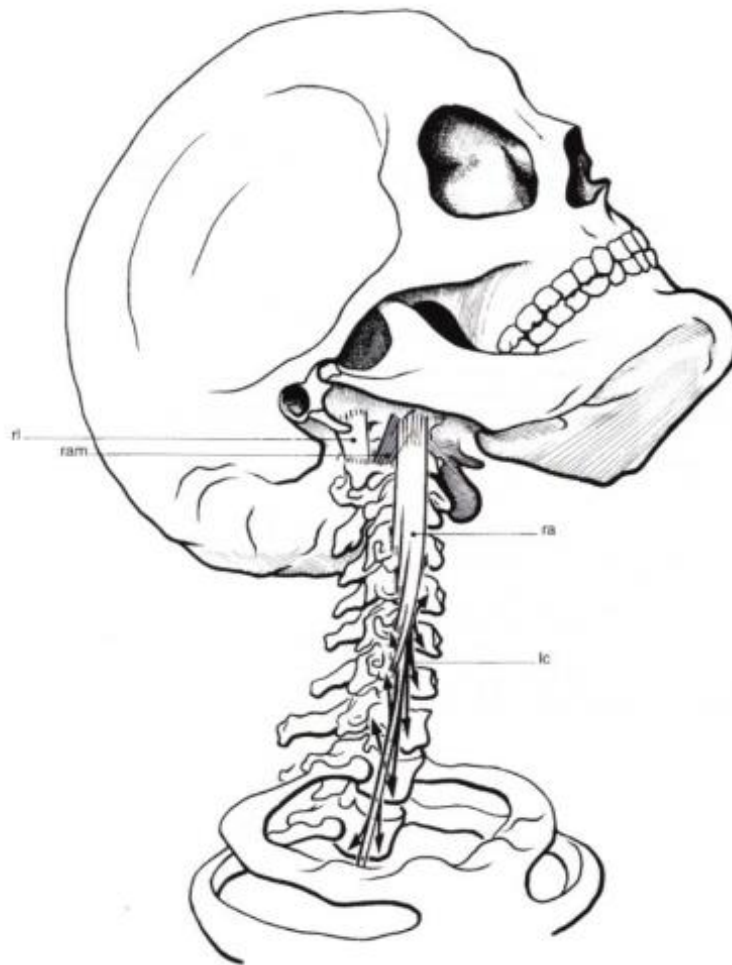
En la imagen aparece simplificado con la abreviatura “r1”. Es el más superior de los músculos intertransversos. Como se puede apreciar en la imagen se localiza en la parte exterior al recto anterior menor y recubre la cara anterior de la articulación occipitoatloidea.

Funciones:

- **Contracción bilateral:** determina la flexión de la cabeza sobre el raquis cervical.
- **Contracción unilateral:** determina una ligera inclinación hacia el lado de su contracción.

Ambos movimientos tienen lugar en la articulación occipitoatloidea.





*Figura 29. Representación del raquis cervical y del cráneo donde se aprecian el recto lateral (ri), el largo del cuello (lc), el recto anterior (ra) y el recto anterior mayor (ram). [13]*

### Los escalenos

Los músculos escalenos son tres y se explicarán basándose en la imagen adjunta. Se extienden sobre la cara anterolateral del raquis cervical. Unen las apófisis transversas cervicales a la primera y segunda costilla. Se aprecia en la imagen que hay tres escalenos: escaleno anterior (ea), escaleno medio (em) y escaleno posterior (ep).

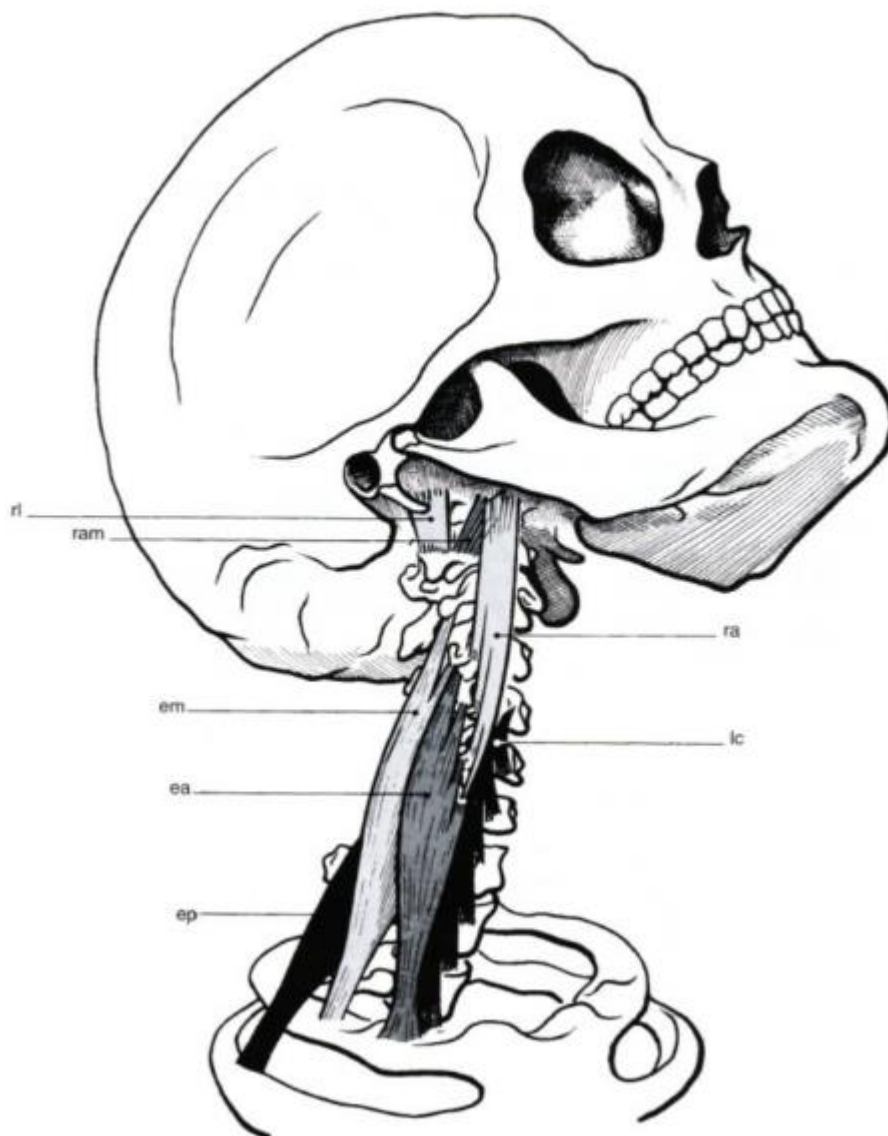


Figura 30. Representación del recto lateral (ri), el largo del cuello (lc), el recto anterior (ra) y el recto anterior mayor (ram), escaleno anterior (ea), escaleno medio (em) y escaleno posterior (ep). [13]

Funciones:

- **Contracción simétrica de los escalenos:** determina la flexión del raquis cervical sobre el raquis dorsal y una hiperlordosis (aumento de la lordosis, curvatura fisiológica de la columna vertebral). Para que se de este movimiento, se tiene que cumplir la condición de que el raquis cervical no esté rígido por la contracción del músculo largo del cuello, ya que, si esto se diese, la contracción simétrica de los escalenos determina únicamente la flexión del raquis cervical sobre el raquis dorsal.

- **Contracción unilateral de los escalenos:** determina la inclinación y la rotación del raquis hacia el lado de la contracción.
- Los escalenos son músculos que trabajan durante la inspiración, elevando las dos primeras costillas.

### **2.1.11.3 Músculos anteriores del cuello**

Los músculos anteriores del cuello son los músculos supra e infrahioideos que actúan como potentes flexores de la cabeza y del raquis cervical. La contracción de estos músculos determina la flexión de la cabeza sobre el raquis cervical y la flexión del raquis vertical sobre el raquis dorsal, al mismo tiempo que un enderezamiento de la lordosis cervical. Por tanto, estos músculos desempeñan un papel fundamental en la estática del raquis cervical.

#### 2.1.11.4 Músculos de la nuca

La zona de la nuca se compone de cuatro planos musculares superpuestos, se desarrollarán desde la profundidad hasta la superficie y se utilizará una imagen junto con una numeración para ir situándolos.



Figura 31. Músculos de la nuca. [13]

##### Plano profundo

El plano profundo se compone de:

- Los pequeños músculos motores del raquis suboccipital, que se extienden entre el occipital, el atlas y el axis: El rector posterior mayor de la cabeza (1), el rector posterior menor de la cabeza (2) y los oblicuos mayor (3) y menor (4).
- La porción cervical del transversoespinosos (5). La contracción del transversoespinoso determina:
  - ❖ **Contracción bilateral y simétrica:** extensión del raquis cervical y una hiperlordosis. Se trata del músculo erector del raquis cervical.

- ❖ **Contracción asimétrica o unilateral:** extensión, inclinación hacia el lado de su contracción y rotación del raquis hacia el lado opuesto. Esta acción sobre el raquis se asemeja a la del esternocleidomastoideo sobre la cabeza.
- Los músculos interespinosos (6).

Plano de los complexos

El plano de los complexos es el segundo plano muscular y se sitúa directamente sobre el plano más profundo. Está constituido por:

- El complejo mayor (7):
  - ❖ **Contracción simétrica y bilateral:** determina la extensión de la cabeza y del raquis cervical con hiperlordosis.
  - ❖ **Contracción asimétrica o unilateral:** determina una extensión de la cabeza asociada a una ligera inclinación hacia el lado de su contracción.
- El complejo menor (8):
  - ❖ **Contracción bilateral y simétrica:** determina la extensión de la cabeza.
  - ❖ **Contracción unilateral o asimétrica:** determina la extensión asociada a la inclinación del mismo lado, conlleva también una rotación.
- El transverso del cuello:
  - ❖ **Contracción simétrica de los dos transversos:** determina la extensión del raquis cervical inferior.
  - ❖ **Contracción unilateral o asimétrica de un transverso:** determina la extensión y una inclinación homolateral.
- El dorsal largo, sus acciones son similares al transverso del cuello.
- La parte superior del sacrolumbar (11).

Estos músculos se pueden observar con mayor claridad en la siguiente imagen:

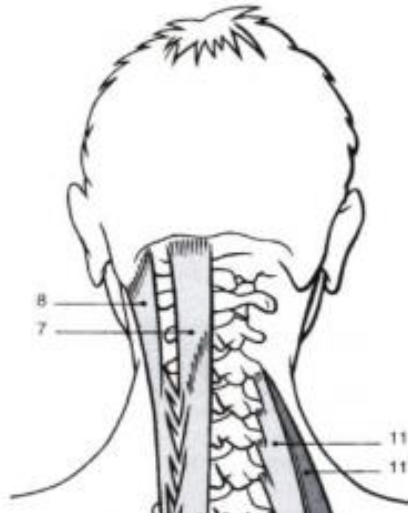


Figura 32. Parte posterior de la cabeza y del cuello con representación del sacrolumbar (11), del complejo mayor (7) y del complejo menor (8). [13]

### Plano del esplenio y del angular

Contiene los músculos:

- El esplenio dividido en dos partes: esplenio de la cabeza (9) y el esplenio del cuello (10). La contracción del esplenio tiene las siguientes consecuencias:
  - ❖ **Contracción bilateral simétrica:** determina una extensión de la cabeza y del raquis con hiperlordosis.
  - ❖ **Contracción asimétrica o unilateral:** determina una extensión, una inclinación y una rotación hacia el lado de su contracción, es decir, en el sentido del movimiento.
- El angular del omóplato (12).
  - ❖ **Contracción bilateral y simétrica:** determina una extensión del raquis cervical con hiperlordosis.
  - ❖ **Contracción unilateral o asimétrica:** Al igual que el esplenio del cuello, conlleva una extensión con inclinación y rotación hacia el lado de su contracción y, por lo tanto, en el sentido del movimiento unívoco del raquis cervical inferior.

En la siguiente imagen se puede ver con una mayor definición el esplenio de la cabeza (9), el esplenio del cuello (10) y el angular del omóplato (12).

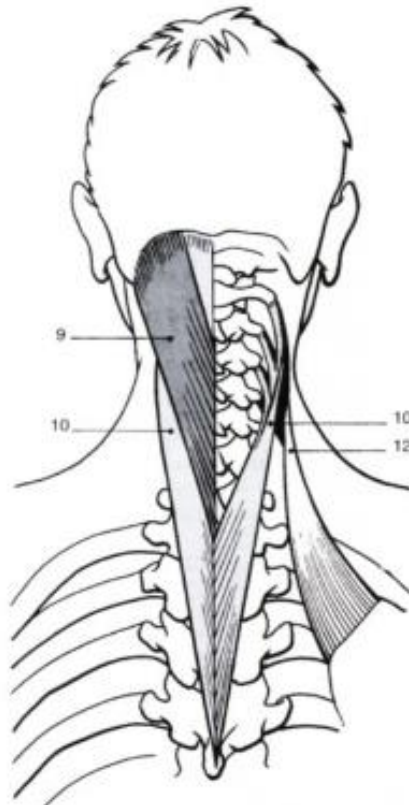


Figura 33. Parte posterior del cuello con representación del esplenio de la cabeza (9), esplenio del cuello (10) y angular del omóplato (12). [13]

Plano superficial

Se compone de:

- El trapecio (15), compuesto de fibras que están dispuestas en abanico, como puede observarse en la imagen, junto con el esternocleidomastoideo (ECOM). La contracción del trapecio produce los siguientes movimientos:
  - ❖ **Contracción bilateral simétrica de los trapecios:** determina una extensión del raquis cervical y de la cabeza con acentuación de la lordosis cervical.
  - ❖ **Contracción unilateral o asimétrica del trapecio:** determina una extensión de la cabeza y del raquis cervical con hiperlordosis, una inclinación hacia el lado de la contracción y una rotación de la cabeza hacia el lado opuesto.
- El esternocleidooccipitomastoideo (14).

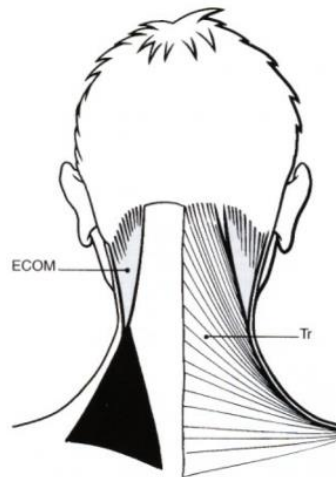


Figura 34. Esternocleidomastoideo (ECOM) y trapecio (Tr). [13]

Los músculos del plano profundo determinan simultáneamente la extensión, la rotación y la inclinación hacia el lado de su contracción, es decir, las tres componentes del movimiento mixto del raquis cervical inferior en torno a los ejes oblicuos. A su vez los músculos de la capa superficial determinan la extensión y la inclinación hacia el lado de su contracción, aunque con una rotación hacia el lado opuesto. Los músculos del plano superficial complementan funcionalmente a los músculos del plano profundo.

#### Extensión del raquis cervical por los músculos de la nuca

Todos los músculos de la nuca, como se ha desarrollado en los anteriores párrafos son extensores del raquis cervical y de la cabeza, pero según su disposición, se pueden clasificar en tres grupos:

- **Primer grupo:** Contiene todos los músculos que se insertan en el raquis cervical a la altura de las apófisis transversas. Estos músculos son extensores del raquis cervical, aumentando la lordosis de este. Su contracción unilateral, determina la inclinación y la rotación hacia el lado de su contracción. Se trata de:
  - ❖ El esplenio del cuello.
  - ❖ El transverso del cuello y la porción cervical del sacrolumbar.
  - ❖ El angular del omóplato.
- **Segundo grupo:** Estos músculos extienden el raquis cervical, cuya lordosis aumentan y extienden la cabeza sobre el raquis cervical debido a sus inserciones directas en el occipital.
  - ❖ El transversoespinoso, músculo propio del raquis cervical inferior.
  - ❖ Los músculos que unen el occipital al raquis cervical inferior: el complejo mayor, el complejo menor y el esplenio de la cabeza.
  - ❖ Los músculos suboccipitales.
- **Tercer grupo:** Este grupo de músculos unen el occipital y la mastoides de la cintura escapular. Se trata de:
  - ❖ El trapecio.



❖ El esternocleidomastoideo.

La contracción simultánea de todos los grupos musculares determina una rectificación del raquis cervical en su posición media. Los músculos se comportan como cables de sostén desempeñando el papel primordial de mantener el equilibrio de la cabeza y del transporte de cargas sobre esta.

### 2.1.11.5 Músculos suboccipitales

Para desarrollar e indicar los músculos suboccipitales se utilizarán números y se irán relacionando con la imagen adjunta.

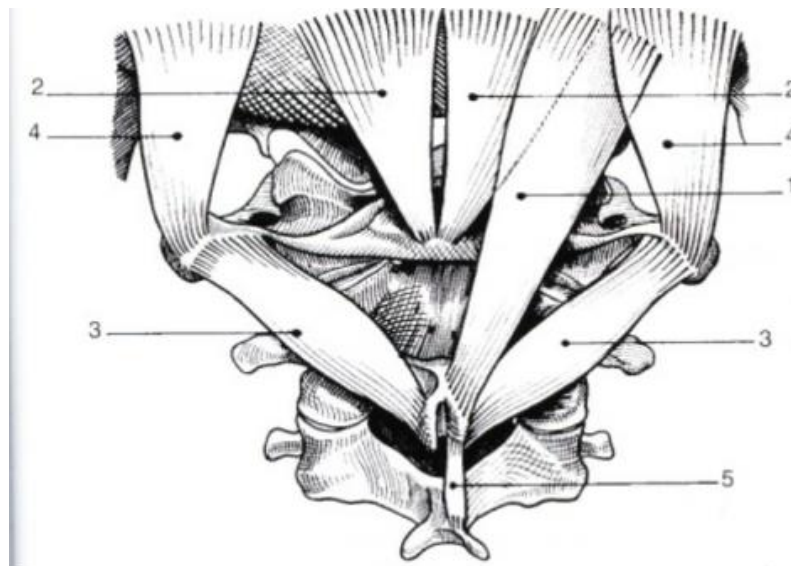


Figura 35. Músculos suboccipitales. [13]

Con el número 1 se representa **el recto posterior mayor de la cabeza**, músculo triangular de base superior, se extiende desde la apófisis espinosa del axis hasta la línea curva inferior del occipital. A continuación, el número 2 representa **el recto posterior menor de la cabeza**, también plano y triangular, más corto y profundo que el precedente y situado inmediatamente fuera de la línea media. Se extiende desde el tubérculo posterior, hasta el tercio interno de la línea curva occipital inferior. El número 3 representa **el oblicuo mayor de la cabeza**, músculo alargado, grueso y fusiforme, que se sitúa por encima y por fuera del recto mayor. Se extiende desde la apófisis espinosa del axis a la cara inferior y borde posterior de la apófisis transversa del atlas. Con el número 4 queda expuesto **el oblicuo menor de la cabeza**, músculo corto, plano y triangular, situado por detrás de la articulación occipitoatloidea, se extiende desde la apófisis transversa del atlas al tercio externo de la línea curva inferior del occipital. Por último, el número 5 son los **músculos interespinosos**, que están situados a ambos lados de la línea media, entre las apófisis espinosas cervicales, por debajo del axis.

### Inclinación y extensión

Vamos a comentar en primer lugar la influencia del músculo **oblicuo mayor** en la articulación atloidoaxoidea y en la atloidooodontoidea.

En la articulación atloidoaxoidea desempeña un papel fundamental tanto en la dinámica como en la estática. Para explicar este movimiento se hará uso de la imagen adjunta. En esta imagen se puede apreciar el atlas y el axis unidos por el oblicuo mayor, por tanto, cuando se produce una contracción simétrica de estos músculos, se desarrolla un movimiento de retroceso y extensión del atlas sobre el axis. Esto se produce al llevar el oblicuo mayor hacia atrás las apófisis transversas del atlas.

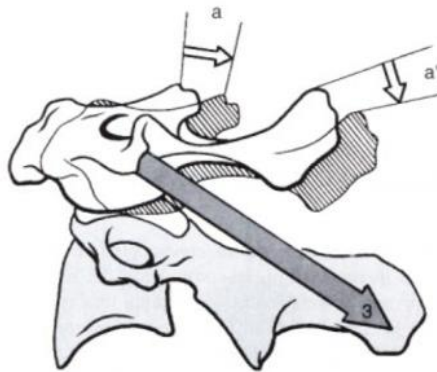
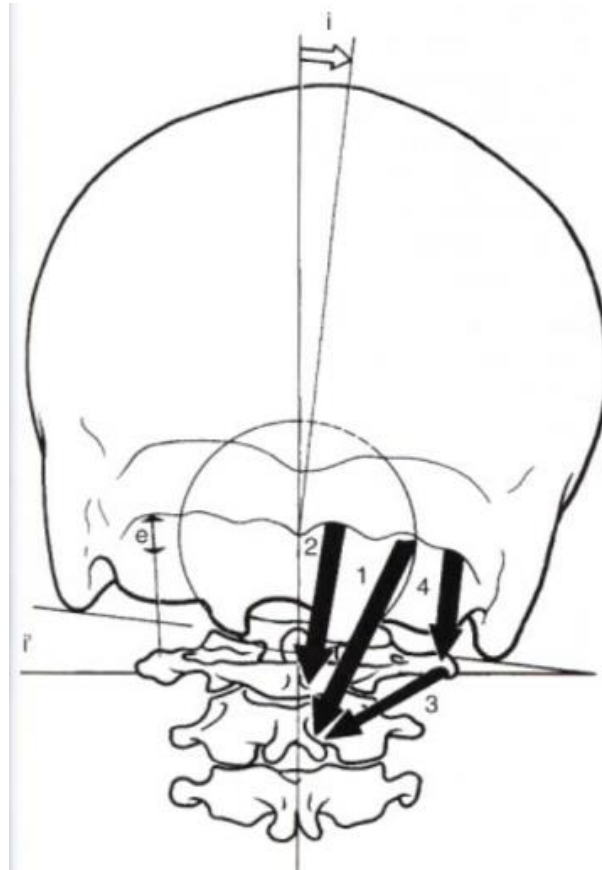


Figura 36. Movimiento de inclinación, por acción del oblicuo mayor. [13]

Con respecto a la articulación atloidoondontoidea se debe comentar que al contraerse el oblicuo mayor y producirse la extensión, se produce una descarga del ligamento

transverso, que asegura la contención pasiva de las apófisis odontoides y le impide luxarse hacia atrás.

La **contracción unilateral de los cuatro músculos posteriores suboccipitales** determina la inclinación de la cabeza hacia el lado de su contracción. En la imagen en la que se observa la parte posterior del cráneo, las flechas negras con sus respectivos números representan los músculos explicados en el apartado anterior de *Músculos suboccipitales*. Una contracción de los que se encuentran a la derecha de la línea media significará una inclinación de la cabeza hacia la derecha. La inclinación de la cabeza se produce por movilización de la articulación occipitoatloidea.



*Figura 37. Parte posterior del cráneo y tres primeras vértebras cervicales, con representación del recto posterior mayor (1), oblicuo posterior menor (2), oblicuo mayor (3), oblicuo menor (4). [13]*

La **contracción simultánea y bilateral de los músculos posteriores suboccipitales** determina la extensión de la cabeza sobre el raquis cervical superior. Se puede ver claramente en la imagen como la contracción de estos músculos produce el movimiento de extensión en la articulación occipitoatloidea gracias a la contracción del oblicuo posterior menor (2) y del oblicuo menor (4) y en la articulación atloidoaxoidea gracias a la contracción del recto posterior mayor (1) y del oblicuo mayor (3).



*Figura 38. Flexión provocada por la contracción simultánea y bilateral de los Músculos posteriores suboccipitales. [13]*

#### Acción rotadora de los músculos suboccipitales

Los músculos suboccipitales realizan el movimiento de rotación aparte de los movimientos ya explicados de inclinación y extensión. Para la explicación se utilizará la ayuda la siguiente imagen y se consideraran dos tramos suboccipitales diferentes explicando el movimiento que realiza cada articulación por separado.

Se empezarán por el primer tramo suboccipital, es decir, **la articulación occipitoatloidea**, por tanto, en la imagen solo se observa el atlas y el occipital. En este tramo, se produce la contracción del músculo oblicuo menor, en la imagen aparece con el número cuatro. La contracción de este músculo gira la cabeza unos diez grados hacia el lado opuesto de la rotación. En la imagen se está produciendo la contracción del músculo izquierdo a la línea media lo cual significa que se está desarrollando una rotación hacia la derecha. También se tensan de forma pasiva el oblicuo menor derecho, con el número 4' y el oblicuo menor posterior, con el número 2, ambos aseguran el retorno de la cabeza a la posición neutra.

A continuación, se pasará a explicar el segundo tramo suboccipital, es decir, **la articulación atloidoaxoidea**. Para ello se necesitará una segunda imagen inferior en la que se observe el axis (color claro) y el atlas (color gris). Se puede constatar que la contracción de los músculos recto posterior (1) y oblicuo mayor (3) determinan una rotación de la cabeza del orden de unos doce grados hacia el lado de su contracción. En este ejemplo, el recto mayor derecho (1), determina una rotación de la cabeza hacia la derecha.

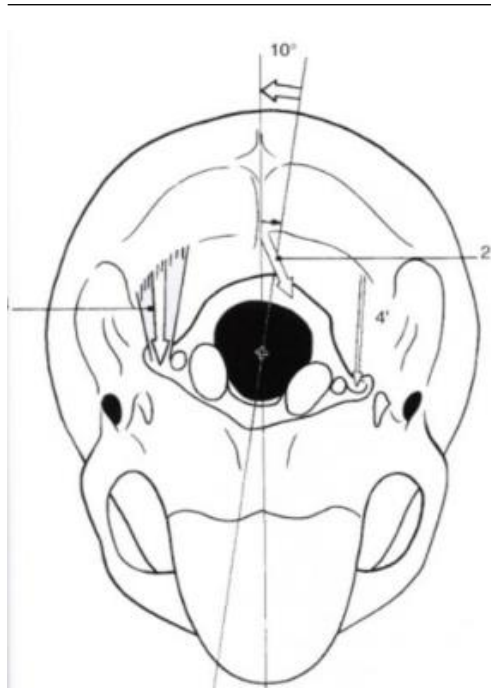


Figura 40. Movimiento de rotación por acción de la articulación occipitoatloidea. [13]

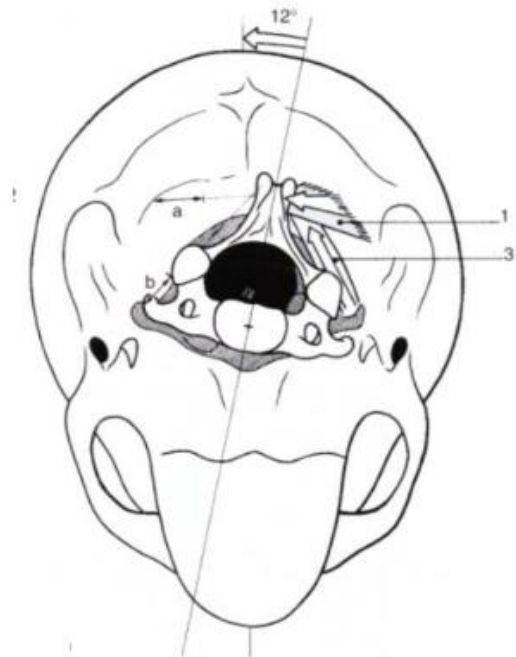


Figura 39. Movimiento de rotación por acción de la articulación atloidoaxoidea. [13]

### 2.1.12 Sinergia-Antagonismo de los músculos prevertebrales y del esternocleidomastoideo

Sinergia es el sinónimo de cooperación y es necesario utilizar este vocablo a la hora de hablar del trabajo conjunto de los distintos grupos musculares. Cuando los esternocleidomastoideos se contraen de manera aislada, no pueden de manera eficaz asegurar el equilibrio de la cabeza y la estática del raquis cervical. Para compensar esto, requiere de la ayuda de los grupos sinergistas-antagonistas, que previamente enderezarán la lordosis cervical. Estos músculos serán:

- El largo del cuello.
- Los músculos flexores de la cabeza sobre el raquis cervical situados en el tramo suboccipital: rectos anteriores de la cabeza mayor y menor y recto latera.
- Los músculos supra e infrahioides.

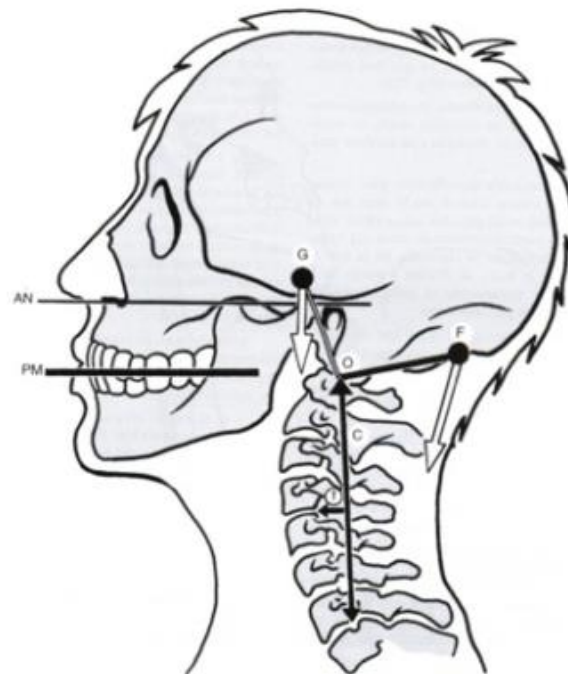
A continuación, se procede a explicar el proceso de flexión del raquis cervical sobre el raquis dorsal consecuencia de la contracción del esternocleidomastoideo. En un primer lugar, se produce la rectificación del raquis cervical, gracias a la contracción de los músculos mencionados en el párrafo anterior. En este momento, la lordosis permanece enderezada y la extensión de la cabeza sobre el raquis cervical es impedida. Por último, se produce la contracción simultánea de los esternocleidomastoideos que determina la flexión del raquis cervical sobre el raquis dorsal.

### 2.1.13 Equilibrio de la cabeza sobre el raquis cervical

Para determinar que la cabeza se encuentra en equilibrio, se observan tres aspectos diferentes: los ojos se encuentran sobre una línea horizontal; el plano masticador (PM), representado en la imagen por un cartón apretado entre los dientes, también es horizontal; y por último el plano auriculonasal (AN), que pasa por el borde superior del conducto auditivo externo y por la espina nasal, también se encuentra en una línea horizontal.

Puntos determinantes para el equilibrio de la cabeza:

- **Punto de apoyo O:** está situado sobre los cóndilos occipitales.
- **Centro de gravedad G:** punto que soporta el peso de la cabeza por acción de la fuerza gravitatoria.
- **Potencia F:** Esta formada por los músculos de la nuca y tiene como finalidad hacer que la cabeza no se caiga hacia delante puesto que tienen que contrarrestar la fuerza de la gravedad.



*Figura 41. Perfil del cráneo y del cuello con representación del plano masticador (PM), centro de gravedad (G), punto de apoyo (O), plano auriculonasal (AN). [13]*

## 2.2 MODELOS BIOMECÁNICOS

En este apartado de la introducción, se realizará un estudio sobre los modelos biomecánicos existentes y los modelos realizados hasta ahora para el estudio de los movimientos del cráneo y del raquis cervical, siendo estos la antesala al estudio objeto de este trabajo de fin de grado.

En el mercado existen dos marcas punteras que venden modelos médicos para realizar estudios, estas son *3B SCIENTIFIC* [40] y *SAWBONES* [41]. Investigando en el catálogo proporcionado por ambas marcas, se han encontrado los siguientes modelos que podrían servir de base para el estudio que se realizará a continuación.

### 2.2.1 Atlas y axis con lámina horizontal del occipital – *3B Smart Anatomy*.

Modelo que simula la articulación del atlas con el axis, montado sobre un soporte desmontable. Tiene un peso de 0,3 kg y es de la marca *3B SCIENTIFIC*. Como se observa en la figura adjunta del catálogo, el modelo incluye el hueso del occipital, el atlas (C1) y el axis (C2), por tanto, se podría realizar un estudio de las articulaciones occipitoatloidea, atloaxoidea y atlantooidontoidea. El estudio estaría limitado puesto que no se podrían establecer todas las inserciones musculares necesarias para la simulación de los movimientos y de las fuerzas musculares. Tampoco estaría completo puesto que serían necesaria el resto de las cervicales para el estudio de los movimientos del raquis cervical inferior.



Figura 42. Modelo de atlas y axis (*3B SCIENTIFIC*) (Precio: 85€). [40]

### 2.2.2 Columna cervical – *3B Smart Anatomy*

Este modelo de la marca *3B SCIENTIFIC* completa el del anterior apartado puesto que incluye las siete vértebras cervicales. También expone el disco intervertebral, nervios cervicales, arterias vertebrales y médula espinal. Sigue estando limitado el estudio, debido a la falta de puntos de inserción de músculos para simulación de movimientos y fuerzas. También se ve limitado puesto que las cervicales son rígidas y no se puede reproducir los movimientos del raquis cervical inferior.



Figura 43. Modelo de columna cervical (3B SCIENTIFIC) (Precio: 110€). [40]

### 2.2.3 Vértebra cervicales C5-C6, plástico sólido transparente

Modelos de las vértebras cervicales C5 y C6 articuladas con el disco intervertebral para poder estudiar los movimientos relativos del raquis cervical inferior: flexoextensión e inclinación-rotación. Al ser transparentes se puede observar de forma más precisa la trayectoria que sigue la articulación intervertebral. Son de la marca SAWBONES.



Figura 44. Modelo de vértebras cervicales C5-C6 (SOWBONES) (Precio: 37€). [41]

### 2.2.4 Vértebras cervicales con músculos

Modelo de la marca SAWBONES en el que se ejemplifica el raquis cervical superior e inferior junto con algunos de los músculos, el cerebelo y las terminaciones nerviosas. Pese a ser un modelo preciso para apreciar las distintas partes que componen el raquis cervical, no permite el desarrollo de movimientos al ser estático, quedando el estudio limitado.



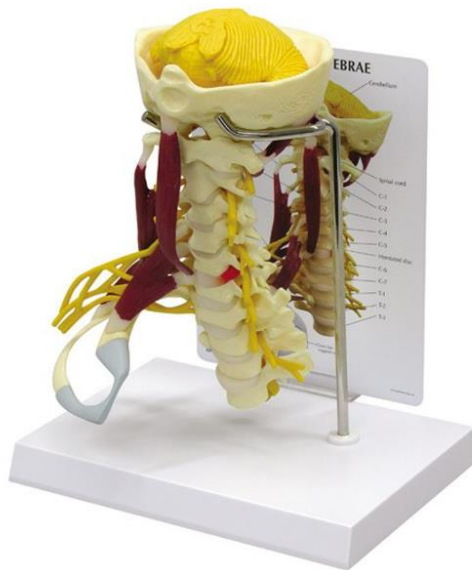


Figura 45. Modelo del raquis cervical, terminaciones nerviosas, cerebelo y músculos (SOWBONES) (Precio: 153€). [41]

### 2.2.5 Cráneo clásico didáctico con columna cervical, 4 partes - 3B Smart Anatomy

Este modelo muestra las formas y relaciones de las distintas láminas óseas del cráneo, esto lo diferencia del resto de modelos vistos hasta ahora en los que solo se mostraba el occipital. También se muestran las vértebras cervicales desde la C1 hasta la C7, el rombencéfalo, la médula espinal, los nervios espinales de la columna cervical, las arterias vertebrales, arteria basilar y las arterias cerebrales posteriores. El cráneo es desmontable. Este modelo es muy preciso en cuanto al posterior estudio de las inserciones musculares, pero al ser un modelo rígido no permite el estudio de fuerzas y movimientos musculares. Es de la marca 3B SCIENTIFIC.



Figura 46. Modelo de cráneo clásico rígido (3B SCIENTIFIC) (Precio: 310€). [40]

## 2.2.6 Estudio del estado de deformaciones en el maxilar superior durante la mordida

Esto es un Proyecto Fin de Carrera de fecha 2012 realizado por Margarita Pérez Martín desarrollado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UPM (tutor Antonio Ros). Este proyecto formaba parte de una colaboración con la Facultad de Medicina, departamento de odontología de la Universidad de Barcelona. Tenía como objetivo someter a la mandíbula a distintos esfuerzos para estudiar las deformaciones producidas por causa de estos.

El modelo consistía en un cráneo fijado a un soporte metálico. La energía necesaria para mover la mandíbula la proporcionan los músculos que estos al contraerse producen tensiones que deformarán la mandíbula. Los músculos de masticación se simularon con cadenas elásticas de ortodoncia, colocándose en su dirección real y siguiendo referencias anatómicas para la colocación de las inserciones. La tensión de las cadenas simulaba la tensión generada por la contracción de las fibras musculares.

La tensión se midió fácilmente tensando con un dinamómetro de muelle (instrumento utilizado para medir fuerzas) como se adjunta en la siguiente imagen.

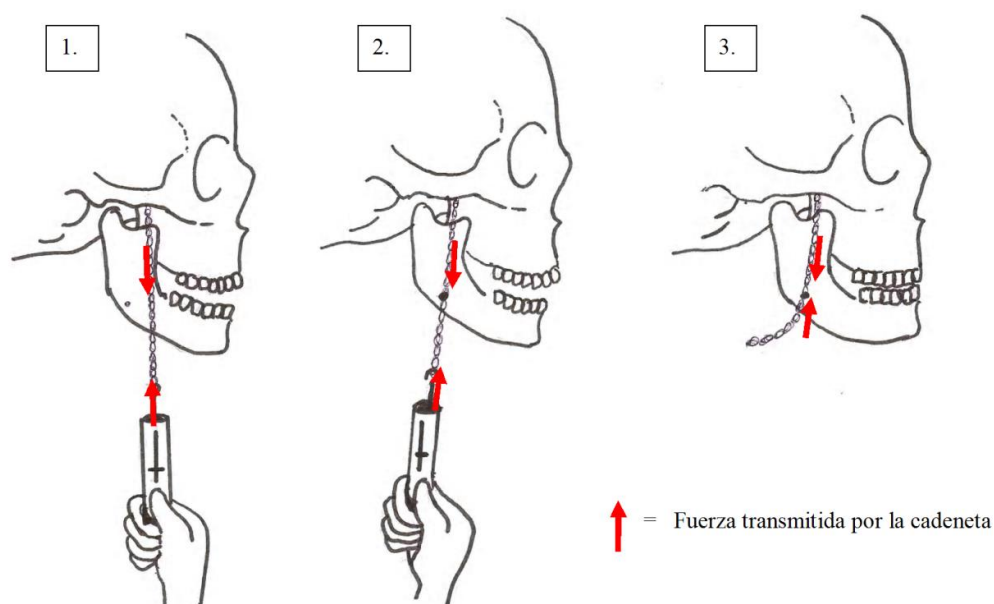
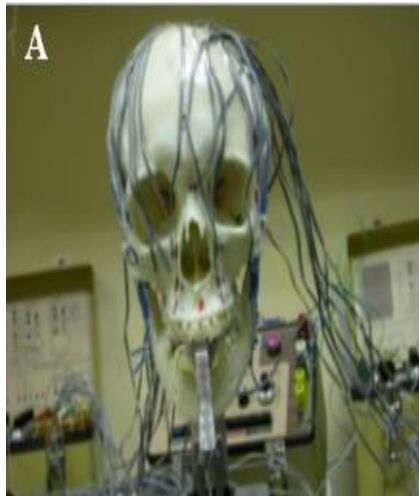
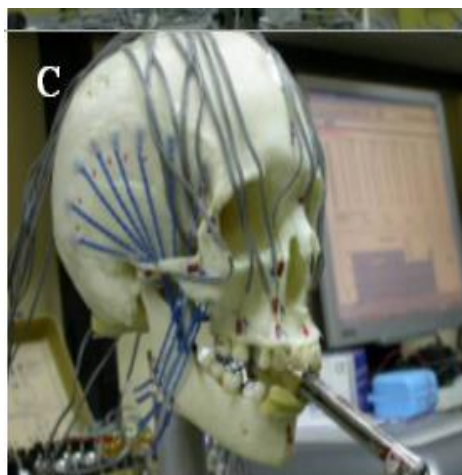


Figura 47. Simulación de las tensiones producidas por los músculos de la mandíbula mediante dinamómetros aplicados a cadenas de ortodoncia. Fuente: Margarita Pérez Martín.

Para el análisis de las deformaciones, se utilizó una de las técnicas más conocida, la **extensiometría eléctrica**, que es una técnica de campo discreto, es decir, suministra información punto a punto y según direcciones preferentes. La extensiometría eléctrica se basa en el uso de pequeños transductores resistivos, o galgas extensométricas que captan con gran precisión deformaciones longitudinales en el punto y dirección en el que se hayan colocado. Por tanto, una de las mayores complicaciones de este estudio, es la dificultad del montaje al estudiar una gran cantidad de puntos, ya que estos proporcionan la deformación longitudinal unitaria en el entorno de un punto y en una dirección concreta.



*Figura 48. Montaje para el estudio de las deformaciones de la mandíbula mediante la técnica de extensimetría eléctrica. Vista frontal. Fuente: Margarita Pérez Martín.*



*Figura 49. Montaje para el estudio de las deformaciones de la mandíbula mediante la técnica de extensimetría eléctrica. Vista lateral. Fuente: Margarita Pérez Martín.*

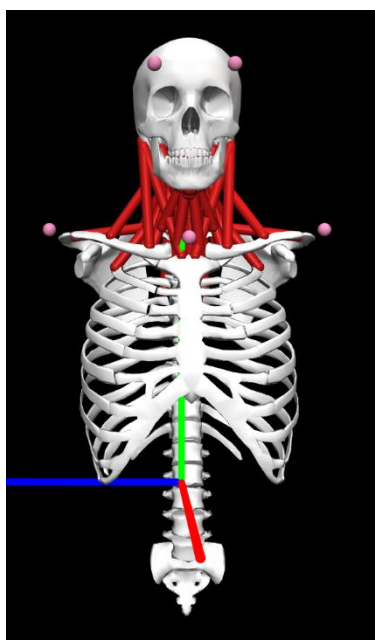
### **2.2.7 Modelo numérico**

*OpenSim* es una herramienta poderosa y gratuita disponible para el modelado y simulación de movimientos. Empezó en 2006 y ha ido desarrollándose, siendo una tecnología utilizada para simular movimientos biomecánicos enfocándose principalmente en áreas críticas de rehabilitación de la medicina, incluyendo daños en la medula espinal, parálisis cerebral, prótesis... Estos movimientos se simulan mediante modelos del sistema musculoesquelético.

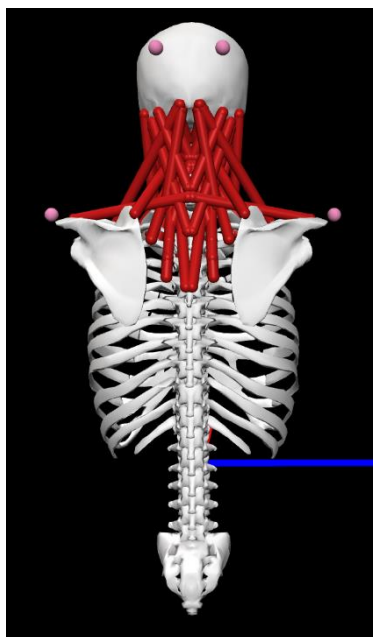
Se adjunta en este apartado el modelo de *OpenSim* para el raquis cervical que permitiría el estudio dinámico del esguince cervical (latigazo cervical). El modelo cuenta con 6 grados de libertad que permite la realización de movimientos del raquis cervical (flexoextensión, rotación e inclinación).

Este modelo también cuenta con todos los músculos del raquis cervical con un total de 72 líneas de acción musculares (tendones) y un total de 15 grupos musculares según su función.

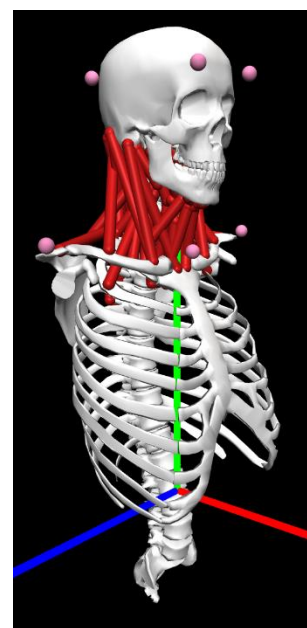
Se adjuntan varias imágenes del modelo mencionado en el programa *OpenSim*:



*Figura 51. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista anterior. Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 52. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista posterior. Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 50. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista angular. Fuente: Elaboración propia.*

Este modelo no tiene en cuenta la naturaleza no determinista del problema. Da soluciones particulares considerando que actúan todos los músculos de la articulación con su máxima intensidad en condiciones isométricas.

## CAPÍTULO 3: MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO, DISEÑO Y PUESTA A PUNTO

La dificultad de crear un modelo acorde con los estudios que se quieren realizar se centra en los siguientes puntos:

- **Modelo de cráneo** que permita insertar de todos aquellos músculos necesarios para reproducir los movimientos y fuerzas musculares.
- **Articulación atlas-occipital** (occipitoatloidea) que desarrolle los movimientos de flexoextensión, inclinación y rotación.
- **Simulación de vértebras cervicales** que no sean rígidas y permitan un movimiento relativo entre ellas, pudiéndose observar la lordosis cervical producida en cada movimiento.

Todos estos puntos se han ido resolviendo para crear un modelo que permitiese los ensayos más precisos posibles. Se desarrollan las soluciones aplicadas en los siguientes apartados.

#### 3.1.1 Modelo de cráneo

El **modelo de cráneo** utilizado es un modelo de la marca *3B SCIENTIFIC*. Su nombre en el catálogo es Cráneo clásico didáctico con columna cervical, 4 partes – *3B Smart Anatomy* y se encuentra desarrollado en el *punto 2.2.6*. Del modelo que se vende, se ha utilizado solo el cráneo puesto que como se explicó, es una maqueta rígida que no permite la simulación de movimientos. Por esta razón se decidió utilizar el cráneo del modelo de *3B SCIENTIFIC*, prescindiendo de las cervicales para de esta forma poder diseñar una articulación entre el atlas y el occipital, que permitiese al cráneo realizar los movimientos de flexoextensión, inclinación y rotación. En los siguientes apartados se desarrollarán el soporte diseñado, la articulación y las vértebras cervicales utilizadas para los ensayos.

Es una representación muy exacta del cráneo humano, quedando perfectamente definidos los surcos, orificios, apófisis y suturas. Está fabricado y terminado manualmente con un material muy resistente siendo desmontable en bóveda del cráneo, base del cráneo y mandíbula. En las siguientes imágenes se puede observar el cráneo completo y el cráneo separado en dos partes, bóveda y base.



Figura 53. Modelo biomecánico del cráneo separado en base y bóveda. Fuente: Elaboración propia.



Figura 54. Modelo biomecánico del cráneo. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 Soporte. Simulación articulación. Simulación de vértebras cervicales. Base.

El **soporte del cráneo** es una parte fundamental del modelo puesto que es la que permitirá una correcta visualización de cada una de las posiciones. El soporte consta de vástago de acero de 10 mm de diámetro y 275 mm de altura, apoyado sobre otra plataforma de acero rectangular. La plataforma tiene un largo de 260 mm, un ancho de 210 mm y un espesor de 9 mm. El vástago se acopla a la plataforma mediante un roscado y es fundamental esta unión para darle rigidez al modelo.

Para facilitar el trabajo se ha ubicado el soporte sobre una mesa de madera. Como se observa en las imágenes, ha sido necesario utilizar mordazas (mecanismo usado en máquinas herramienta para la sujeción de piezas) para mejorar la sujeción del soporte sobre la mesa para que el modelo se encontrase siempre en la misma posición y que de esta forma los ensayos fueran lo más precisos posible. En la imagen también se aprecia parte de la articulación que será explicada a continuación.



Figura 55. Soporte del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Las articulaciones son una parte fundamental del modelo ya que serán las encargadas de permitir los movimientos. La articulación que permite el movimiento del cráneo sobre el raquis cervical es la articulación occipitoatloidea (unión atlas-axis). Para la **simulación esta articulación** una pieza esférica de resina de poliuretano queda ubicada entre dos anillos de aluminio, permitiendo así la rotación, la flexión y la

extensión. Se irán adjuntando imágenes de lo explicado para una correcta comprensión de los elementos utilizados y de su función.

El anillo superior irá al cráneo, en el agujero magno utilizándose un fleje para asegurar su posición. En la imagen se observa la base del cráneo donde se aprecia el fleje (elemento de fijación que trabaja a flexión) roscado mediante un espárrago al anillo superior de la articulación y apretado mediante una tuerca. Este anillo tiene un espesor de 19,3 mm y un diámetro de 44,6 mm.



*Figura 57. Fleje de la articulación occipitoatloidea ubicado en el agujero magno del cráneo. Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 56. Anillo superior ubicado en la base del cráneo. Fuente: Elaboración propia.*

Para fijar los anillos y que la esfera no quede suelta, se utilizan tres tornillos de métrica 10 mm (M10) que se roscarán entre ambos y de esta forma asegurar la unión. El anillo inferior tiene un diámetro de 44,6 mm y un espesor de 11,5 mm. En la siguiente figura, se observa el anillo inferior y la rótula de 26 mm de diámetro. Esta pieza está anclada a un vástago que tiene una rosca en su parte inferior, permitiéndole acoplarse al anillo en el que está soldado el muelle que será explicado posteriormente.



Figura 58. Anillo inferior y rótula. Fuente: Elaboración propia.



Figura 59. Anillo inferior y rótula. Vista superior. Fuente: Elaboración propia.

Por último, para completar la articulación se ha utilizado una junta de caucho se coloca entre los dos anillos para generar una mayor compresión y asegurar firmeza a la articulación. En las siguientes imágenes se observa el anillo inferior junto con la junta, la rótula y los tres tornillos.



Figura 61. Rótula, anillo inferior, tornillos y junta de caucho. Imagen de perfil. Fuente: Elaboración propia.

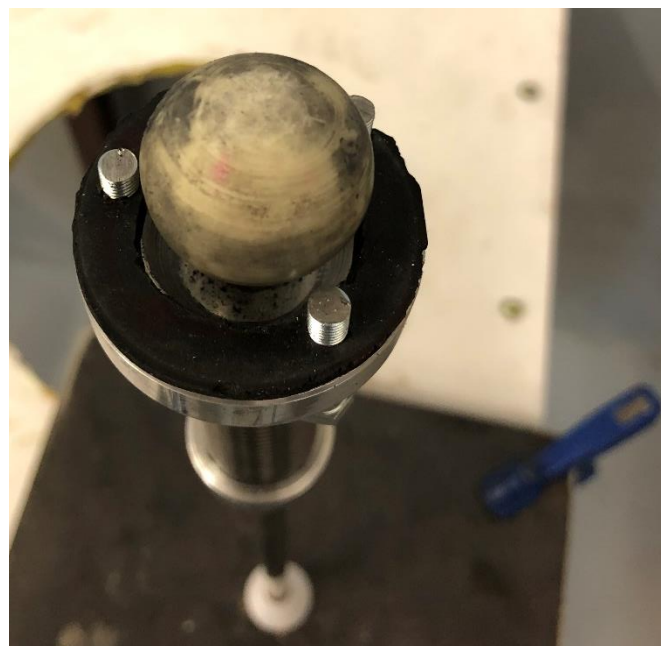


Figura 60. Rótula, anillo inferior, tornillos y junta de caucho. Vista superior. Fuente: Elaboración propia.



En la siguiente imagen se representa la articulación occipitoatloidea completamente montada con los anillos, la rótula y la junta sobre la base del cráneo. Se aprecia el espárrago que irá roscado en el vástago del soporte.

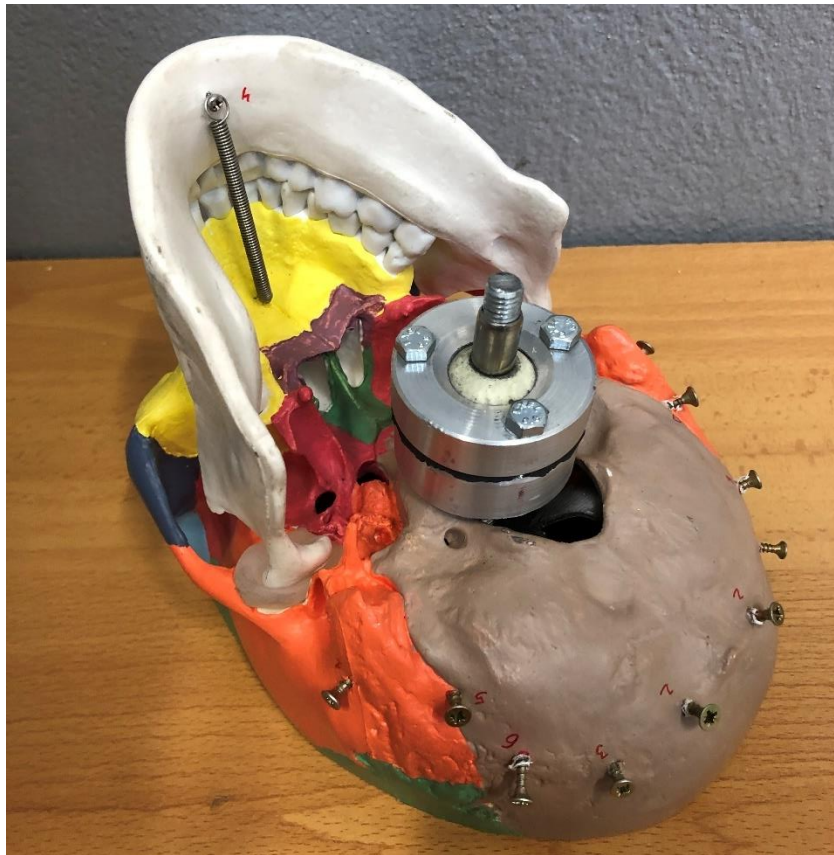


Figura 62. Parte inferior del cráneo con articulación occipitoatloidea. Fuente. Elaboración propia.

Por último, se presenta el resultado final de la articulación occipitoatloidea con un movimiento de flexión.

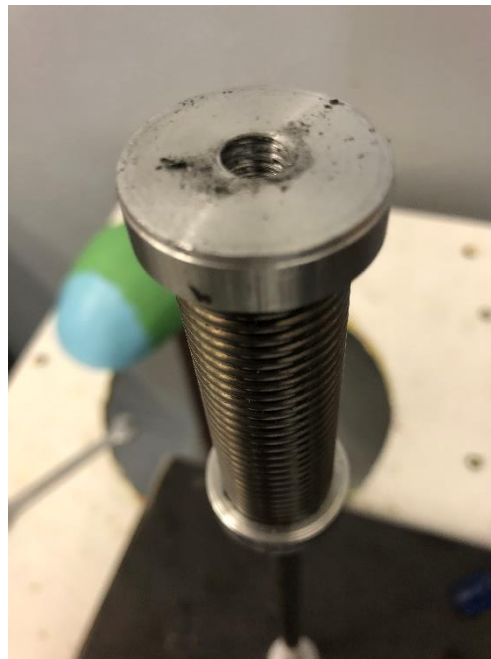


Figura 63. Representación de la articulación occipitoatloidea. Fuente: Elaboración propia.

Para la **simulación de las vértebras cervicales** restantes, desde el axis (C2) hasta la C7, se ha utilizado un muelle de acero de 83,6 mm de altura y 23,6 mm de diámetro. Este muelle se encuentra apoyado sobre dos anillos de aluminio de 30,2 mm de diámetro y un espesor de 10 mm. La unión entre el muelle y los anillos es soldada. El anillo inferior se encuentra roscado al vástago del soporte. Con este muelle se puede hacer la perfecta simulación de los movimientos del raquis cervical inferior y del movimiento relativo entre vértebras.



*Figura 64. Articulación de las vértebras cervicales mediante un muelle. Vista de perfil. Fuente: Elaboración propia.*

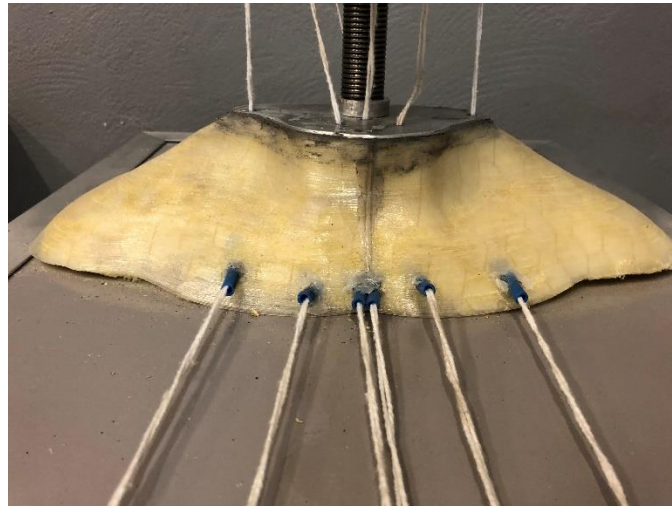


*Figura 65. Articulación de las vértebras cervicales mediante un muelle. Fuente: Elaboración propia.*

En la *figura 61 y 62* se aprecia perfectamente la rosca hembra donde va roscada la rótula.

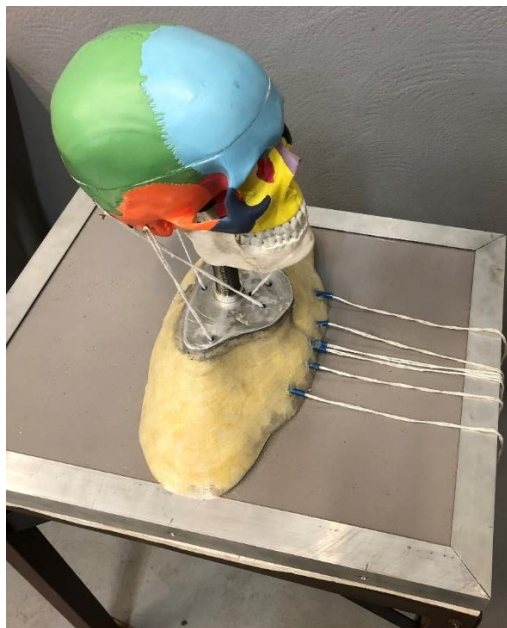
La base del modelo es fundamental puesto que permite que la dirección de los músculos simulados sea lo más precisa posible, representando los orígenes de estos en la parte superior del torso.

Esta representación de los hombros ha sido fabricada con una impresora 3D. En la parte superior se ha fijado una placa de aluminio la cual ha sido taladrada representando la dirección del origen de los respectivos músculos. Para facilitar la simulación de cada movimiento, como se aprecia en la figura de abajo, en la parte inferior, se han realizado perforaciones en el material impreso y con pequeños tubos de plástico, se han hecho pasar los hilos que representan los músculos, pudiendo de esta forma aplicar esfuerzos sobre estos para representar los movimientos del raquis cervical.



*Figura 66. Base del modelo que representa la parte superior del torso. Fuente: Elaboración propia.*

La parte superior del torso modelada apoya sobre un material conglomerado que a su vez está fijado con un marco de aluminio que le aporta rigidez.



*Figura 67. Vista superior del modelo completo. Fuente: Elaboración propia.*



Figura 68. Vista frontal del modelo completo. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3 Inserciones musculares.

Las **inserciones musculares** son muy importantes puesto que serán el “motor” que producirá ciertas cargas que permitirán el movimiento de las articulaciones.

Para poder realizar el estudio de movimientos y fuerzas musculares, es necesario saber que músculos actúan en cada movimiento y donde está su origen e inserción en el cráneo. Para ello como se ha desarrollado en la introducción, se ha realizado un profundo estudio anatómico para poder establecer los músculos que participarán en cada movimiento, estableciendo en que direcciones aplicarán sus cargas al contraerse a partir de sus inserciones para poder realizar el posterior estudio.

Al ser un modelo se ha tratado de simplificar el número de músculos que actúan en cada movimiento, ejemplificando aquellos cuyas cargas serán las más influyentes debido a su posición y dirección. Para realizar el ensayo con precisión, se han dividido los músculos por grupos en función de donde se encuentre su inserción en el cráneo, agrupando en un mismo punto todos aquellos músculos cuya inserción sea muy próxima, debido a la poca influencia que tendría sobre el ensayo dos puntos muy cercanos.

Se adjunta una tabla con los músculos elegidos para desarrollar los movimientos, los puntos donde se insertarán en el cráneo y parte craneal en la que se ubican. Se indica *punto simétrico* puesto que ese punto se encuentra dispuesto de forma simétrica respecto de la línea media del cráneo ya que ese grupo muscular se compone de dos músculos simétricos:

| Número              | Ubicación                               | Músculos   |
|---------------------|---|--|
| 1 (punto simétrico) | Apófisis mastoides del hueso occipital. | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Esternocleidomastoideo.</li> <li>➤ Esplenio de la cabeza.</li> <li>➤ Músculo recto anterior menor.</li> </ul>   |
| 2 (punto simétrico) | Protuberancia occipital externa.        | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Complejo mayor.</li> <li>➤ Trapecio.</li> </ul>   |
| 3 (punto simétrico) | Línea nuchal del hueso occipital.       | Recto posterior mayor.   |
| 4                   | Hueso hioides.                          | Grupo infrahioides: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Músculo omohioides.</li> <li>➤ Músculo tirohioides.</li> <li>➤ Músculo esternohioides.</li> <li>➤ Músculo esternotiroideo.</li> </ul> |
| 5 (punto simétrico) | Vértice de la mastoides.                | Complejo menor.  |
| 6 (punto simétrico) | Curva inferior del occipital.           | Oblicuo menor de la cabeza.  |

Tabla 1. Identificación de los músculos en el cráneo mediante puntos. Fuente: Elaboración propia.

Se adjunta una imagen de la distribución de los puntos en la base del cráneo:

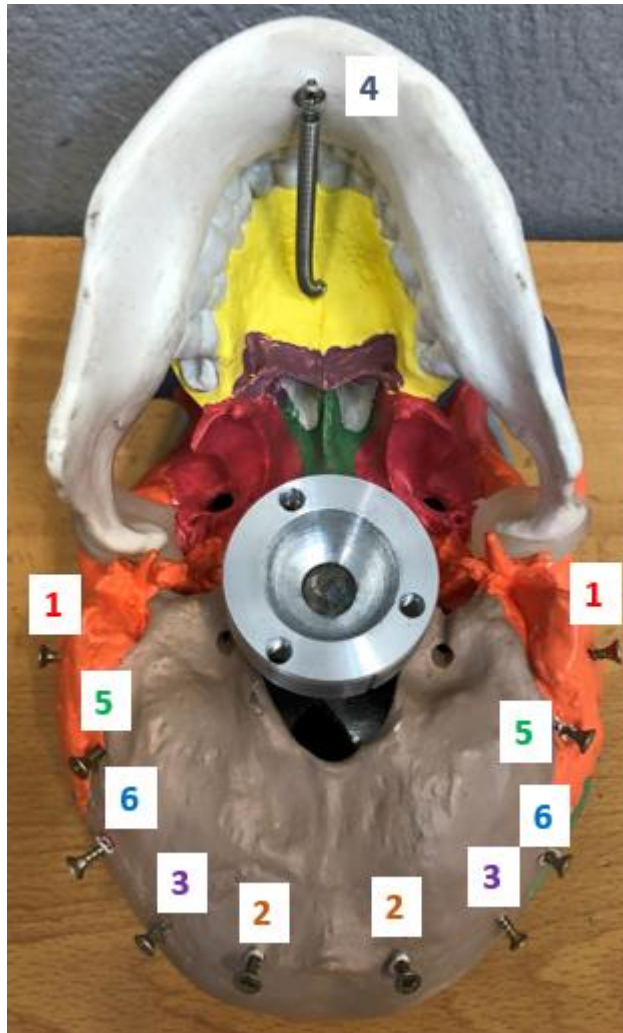


Figura 69. Numeración de las inserciones musculares. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.4 Sistema de transmisión de carga y movimiento.

Los músculos que realizarán los movimientos se simulan con hilos. Se colocan siguiendo las inserciones de los puntos del apartado 3.1.3 para representar a partir de estas la dirección real del músculo. La tensión de los hilos simula la tensión muscular generada por la contracción de las fibras musculares. El procedimiento de implantación de los hilos en el modelo de cráneo es el siguiente, primero se realizará una pequeña marca con un punzón en el punto donde irá insertado el músculo, a continuación, se podrá un pequeño tornillo de estrella que se apretará con un destornillador. Este tornillo se enroscará lo suficiente como para dejar un hueco en la parte exterior donde irá enrollado el hilo. Con este tipo de inserción no permanente de hilos, se puede en todo momento cambiar y elegir con que músculo se querrá trabajar.

La tensión en cada hilo puede medirse incorporando en serie sensores de fuerza.

El modelo admite medir con precisión las fuerzas.

### 3.1.5 Registro de movimientos.

Se describirán en este apartado los distintos movimientos de la cabeza van a ser simulados en los ensayos y la mecánica que se sigue para que estos se produzcan. En cada movimiento, actúan un número determinado de músculos, los que se contraen y realizan el movimiento, se denominan **agonistas**, mientras que los músculos que se relajan permitiendo el movimiento son los **antagonistas**.

La forma de seleccionar los distintos músculos que participan en cada uno de los ensayos desde el punto de vista mecánico es la siguiente: habrá un grupo muscular agonista que se contraerá y será el encargado de producir el movimiento del cráneo en la dirección en la que se encuentra su inserción, estos se representarán en las imágenes con una flecha azul. Habrá otro grupo muscular que aplicará un momento en sentido contrario al músculo agonista, en una dirección determinada y su función es asegurar la vuelta al estado de equilibrio. Los músculos antagonistas se representarán con flechas rojas. Para realizar los movimientos será fundamental tener ubicado el **centro de gravedad del cráneo** puesto el peso propio de la cabeza ejercerá una fuerza perpendicular al suelo que tenderá a producir una flexión del cráneo, por tanto, esta fuerza deberá tenerse en cuenta a la hora de realizar el equilibrio de la cabeza. Otro punto importante que habrá que fijar, es la articulación occipitoatloidea (occipital-atlas) ya que las fuerzas que producen los músculos en una dirección (determinada por la línea trazada entre el origen y la inserción del músculo) producen un momento respecto al punto de articulación, siendo este mayor cuanto más alejado este el músculo de este punto, puesto que la fórmula que determina el valor del momento es:

$$\text{Momento (Nm)} = \text{distancia (m)} * \text{Fuerza (N)}$$

Por equilibrio estático, en cada movimiento la suma de momentos en el punto de la articulación deberá de ser nulo puesto que si esto no fuese así se produciría cargas indeseadas entre el axis y el atlas que podrían desarrollar un desacople entre estas. Este punto teórico será el punto de partida para el desarrollo de los movimientos.

Se comentará a continuación de forma básica como se producen los movimientos posibles del raquis cervical y, en base a las fuerzas necesarias para producir los momentos, se han elegido los grupos musculares más significativos para la realización de estos y su posterior estudio:

- **Equilibrio:** Si se representa el cráneo de perfil, como puede observarse en la imagen, el centro de gravedad (CDG) se encuentra desplazado hacia la parte anterior del cráneo en referencia al punto de articulación (PA), por tanto, si se quiere obtener el equilibrio estático del cráneo para encontrarse en la posición neutral, los músculos agonistas (MA) tendrán que localizarse en la parte posterior y hacer una fuerza suficiente para compensar el efecto del peso propio del cráneo que se sitúa sobre el centro de gravedad. Si no actuaran los músculos de la parte posterior de la cabeza, esta tendería a caerse hacia delante por acción de la gravedad.

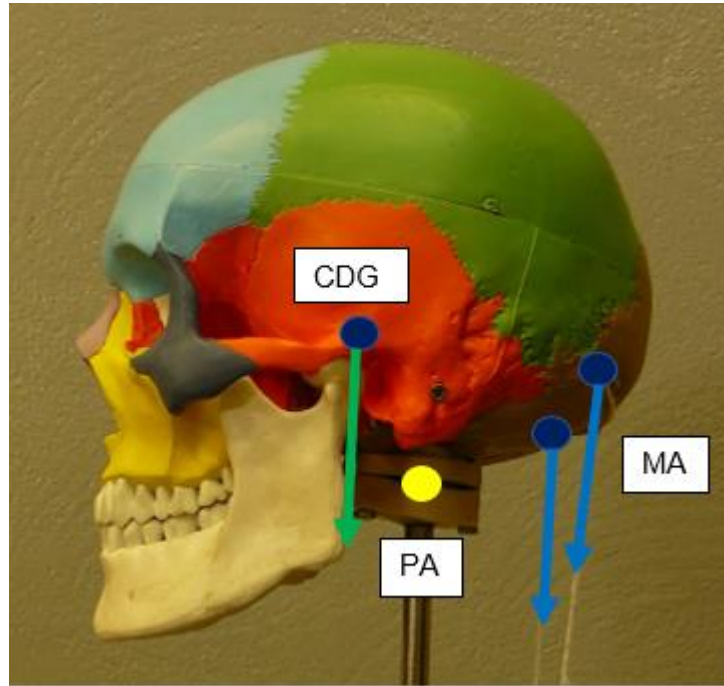


Figura 70. Posición de equilibrio del raquis cervical con representación del centro de gravedad (CDG), punto de articulación (PA) y músculos agonistas (MA). Fuente: Elaboración propia.

- **Flexión:** Para desarrollar un movimiento de flexión es necesario que se genere un momento respecto del punto de articulación (PA) por la acción de una fuerza que se produce por la contracción de un grupo muscular. Este momento es producido por la acción de los músculos agonistas (MA). Es necesario también que se produzca otro momento en sentido contrario al anteriormente mencionado para asegurar la vuelta a la situación de equilibrio del cráneo. Estas fuerzas son producidas por la contracción de los músculos antagonistas (MAN). En la figura se ejemplifican estas fuerzas de forma visual, las flechas azules representan la fuerza ejercida por los músculos agonistas que se está contrayendo, en color rojo la fuerza ejercida por los músculos antagonistas, en verde el peso propio en el centro de gravedad y por último se representa el punto de articulación con respecto al cual se producen los momentos y en el cual tiene que haber equilibrio.



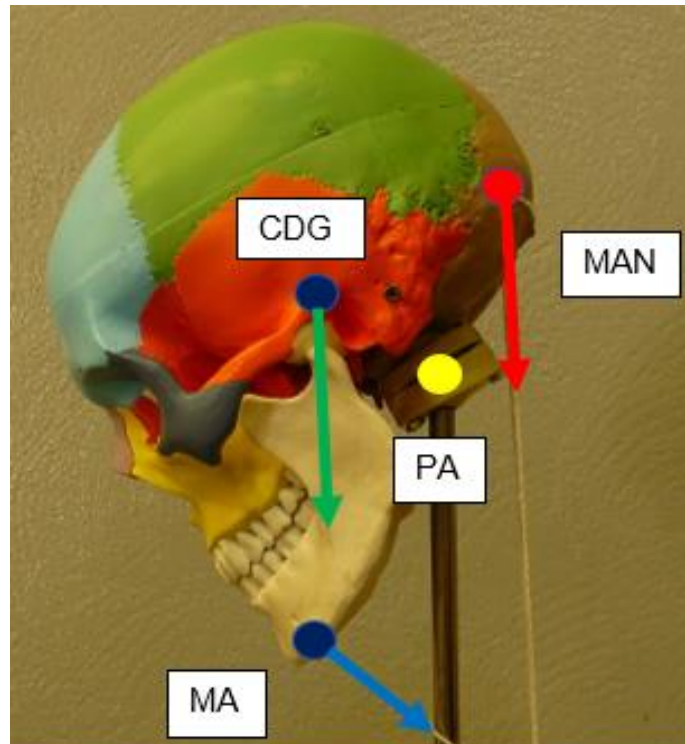


Figura 72. Movimiento de flexión con representación de las fuerzas producidas por los músculos agonistas (MA), antagonistas (MAN) y el peso propio de la cabeza. Se representa también el punto de articulación (PA) y el centro de gravedad (CDG). Fuente: Elaboración propia.

- **Extensión:** Para realizar el movimiento de extensión, se sigue el mismo procedimiento que en el de flexión, pero cambiando el papel de cada músculo, siendo ahora el que era el antagonista el agonista y viceversa, para de que de esta forma el momento producido por la fuerza del músculo agonista (MA), en azul, sea mayor que el momento del músculo antagonista (MAN), representado en rojo y que de esta forma la cabeza pueda echarse hacia atrás. Asegurando que podrá volver a su posición neutral.

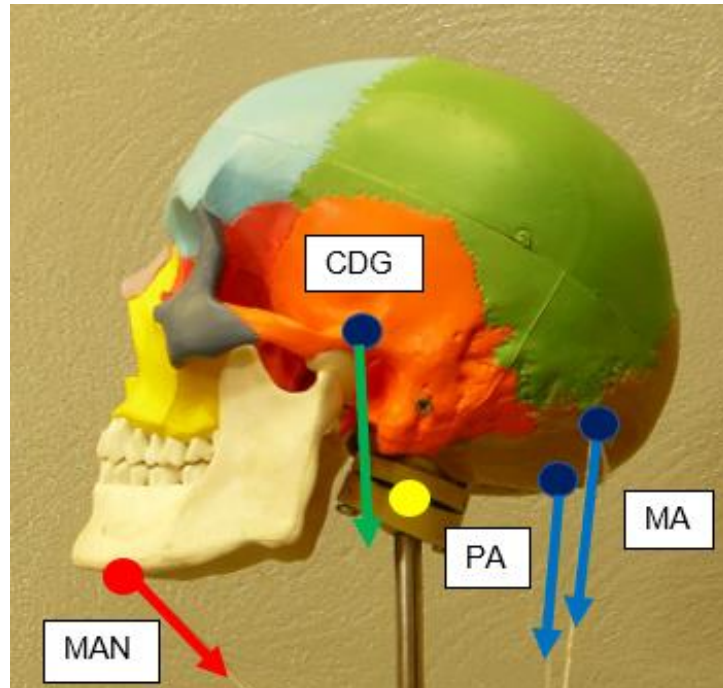


Figura 73. Movimiento de extensión con representación de las fuerzas producidas por los músculos agonistas (MA), antagonistas (MAN) y el peso propio de la cabeza. Se representa también el punto de articulación (PA) y el centro de gravedad (CDG). Fuente: Elaboración propia.

- **Rotación:** Para que se produzca rotación, se tiene que producir la contracción unilateral de un grupo muscular, en este caso, el músculo agonista (MA), el que se contrae, es el que dirige la dirección de la rotación. El agonista que se encuentra relajado sirve de fijación para asegurar la vuelta a la posición de equilibrio y fijar el movimiento. El mecanismo de funcionamiento es el mismo que el explicado en flexión y extensión, el músculo contraído genera una fuerza que, multiplicada por la distancia al punto de equilibrio, genera un momento que produce el movimiento. También es necesaria la contracción de un grupo muscular en la parte posterior de la cabeza para asegurar la estabilidad del raquis cervical y poder garantizar el equilibrio estático. En el ejemplo de la imagen se observa una rotación hacia la izquierda, siendo el músculo izquierdo, en azul, el que se contrae y el que está señalado en rojo el antagonista, en verde la fuerza por acción del peso propio del cráneo, en naranja la fuerza ejercida por los músculos rectificadores del raquis cervical y en amarillo el punto de articulación:

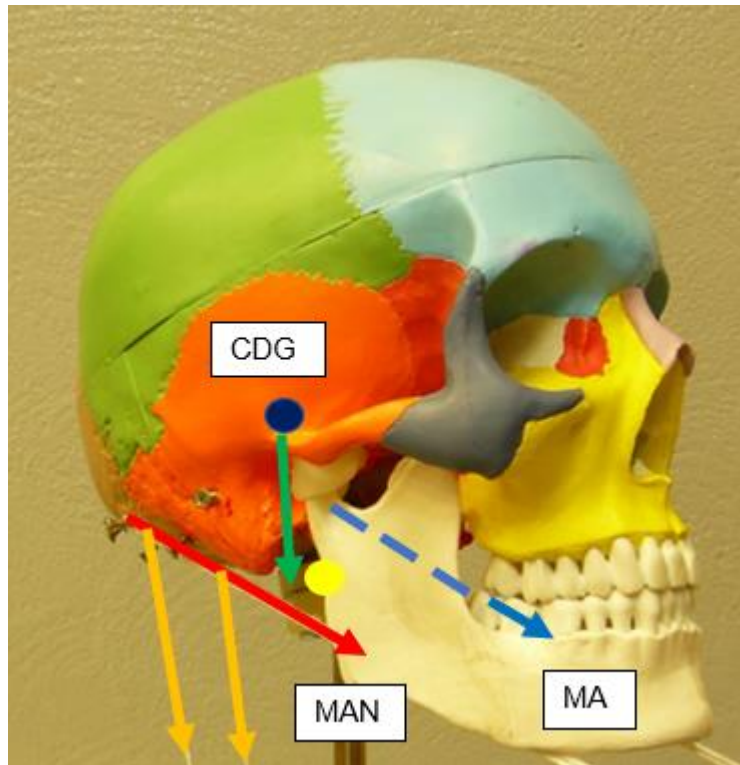


Figura 74. Movimiento de flexión. Fuente: Elaboración propia.

- **Inclinación:** Se produce por la contracción unilateral de un grupo muscular. El músculo que se contrae es el músculo agonista y dirigirá hacia qué lado se produce la inclinación. El otro músculo del grupo será el antagonista y se encargará de la vuelta a la posición de equilibrio del cráneo.

## 3.2 ESTUDIO CINÉTICO

### 3.2.1 Problema no determinista / Biomecánica muscular

El músculo es un tejido fibroso activo que se autocontrae mediante un proceso electroquímico. Se encuentra unido a los huesos por los extremos a través de los tendones (tejido pasivo constituido en su mayor parte por fibras de colágeno). Los músculos transmiten fuerzas de tracción a los huesos de dos maneras: por la resistencia pasiva a alargarse y por la autocontracción.

En la contracción intervienen dos filamentos paralelos de proteínas: actina y miosina. La miosina presenta unos apéndices que se adhieren a la actina y tiran de ella al producirse la reacción electroquímica. Se adjunta una imagen de la relación agonista-antagonista del bíceps y del tríceps.

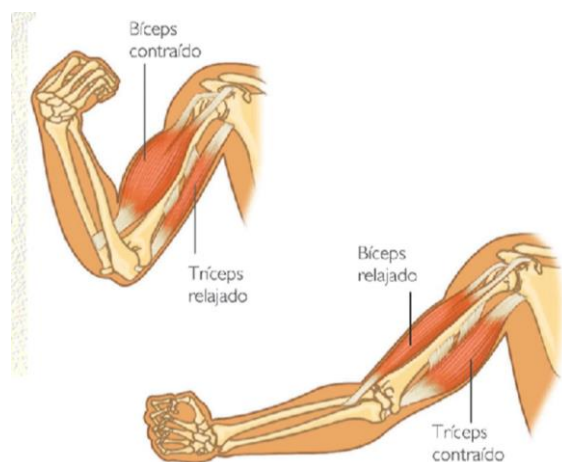


Figura 75. Contracción y relajación de bíceps y tríceps. Fuente: [52]

En la siguiente figura se observa el sarcómero (modelo mecánico de la unidad de activación muscular) estirado y el sarcómero contraído. En la parte superior, el músculo está estirado, estando por tanto el sarcómero en la misma posición. Una vez que se produce la reacción electroquímica, la miosina tira de la actina produciendo la contracción del músculo y del sarcómero como se aprecia en la parte inferior de la imagen.

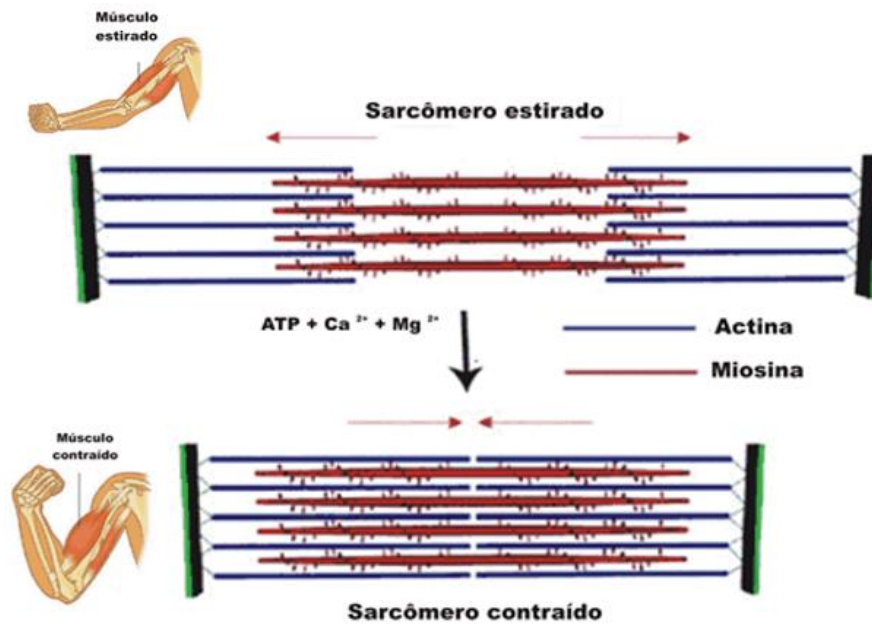


Figura 76. Reacción entre la actina y miosina para la contracción muscular. Fuente: [52]

Hay distintos tipos de contracción muscular:

- ❖ **Concéntrica:** el músculo vence una resistencia externa acercando sus extremos al contraerse.
- ❖ **Excéntrica:** la contracción muscular se opone a la fuerza exterior, pero ésta es superior y los extremos del músculo se alejan
- ❖ **Isométrica:** contracción muscular estática, sin movimiento
- ❖ **Isotónica:** contracción concéntrica o excéntrica en la que la tensión en el músculo se mantiene constante.

Se adjunta dos imágenes con los distintos tipos de contracción, ejemplificándose en la flexo-extensión del codo:



Figura 77. Contracción isotónica e isométrica del codo. Fuente: [52]

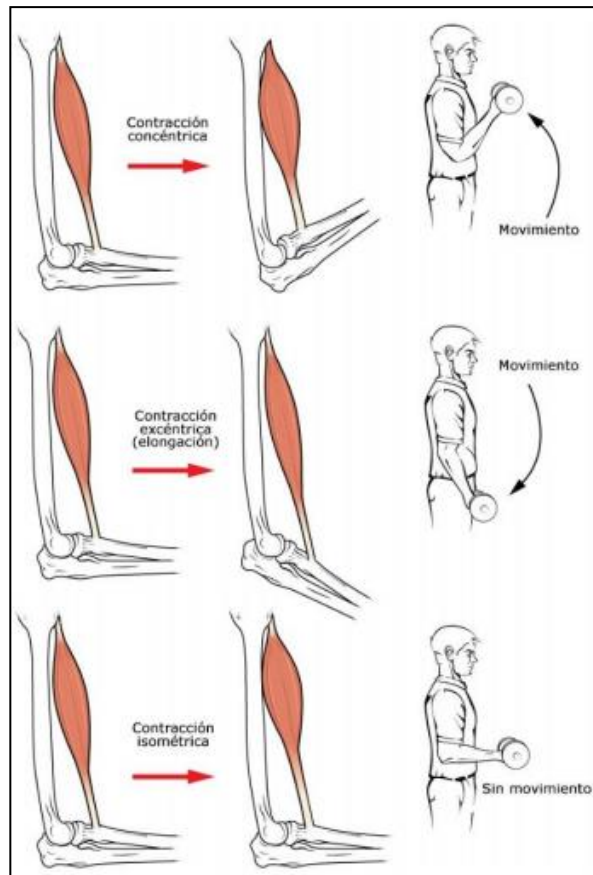


Figura 78. Contracción concéntrica, excéntrica e isométrica del codo. Fuente: [52]

Se obtiene la siguiente relación Fuerza-Longitud entre el músculo contraído (agonista) y el músculo relajado (antagonista). Se puede destacar como la longitud y fuerza del músculo pasivo es menor que la del activo que es el que se contrae para realizar el movimiento.

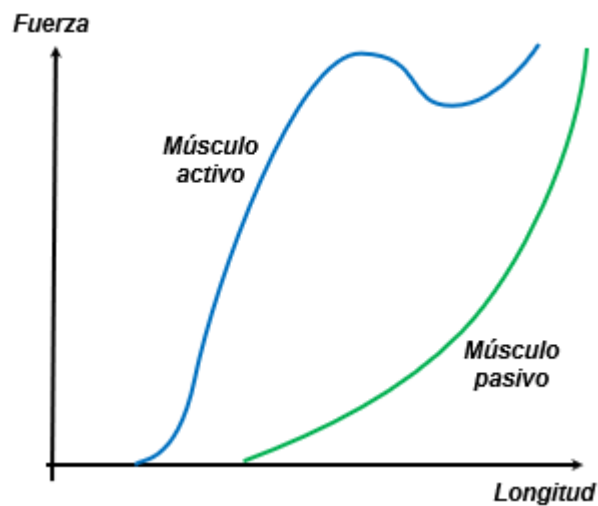


Figura 79. Relación Fuerza-Longitud entre músculo agonista y antagonista. Fuente: [52].

En base a la teoría desarrollada se puede concluir que el estudio del sistema muscular presenta ciertas **incertidumbres** haciendo que el problema sea no determinista y buscando para su resolución una aproximación lo más cercana a la realidad:

- ❖ En cada movimiento pueden intervenir varios músculos ejerciendo la misma función (redundancia). No se puede predecir analíticamente cuántos actúan.
- ❖ Un mismo movimiento puede realizarse mediante la acción única de los músculos agonistas. Si además actúan los antagonistas, el movimiento puede realizarse igualmente, pero con un incremento de la acción de los agonistas.
- ❖ En la reacción electroquímica de contracción se activa simultáneamente un número indeterminado de unidades musculares (sarcómeros). El número total define la intensidad de la fuerza muscular desarrollada.
- ❖ Las técnicas experimentales de medida que detectan actividad muscular en vivo (la más conocida es la electromiografía) son cualitativas, no permiten medir la fuerza muscular.
- ❖ Los programas de cálculo por ordenador dan soluciones particulares. Consideran, por ejemplo, que actúan todos los músculos de la articulación transmitiendo la máxima fuerza isométrica en cada posición (Open Sim). Son soluciones posibles pero irreales por resultar incompatibles con la resistencia de la articulación.

### 3.2.2 Modelos simplificados. Ecuaciones de equilibrio y determinación de reacciones articulares.

#### 3.2.2.1 Introducción y objetivo de los modelos

El **objetivo de estos modelos** es calcular las fuerzas de reacción que tiene que absorber el raquis cervical como consecuencia de los movimientos de la cabeza. Para ello, en este apartado, se van a ir simulando en ensayos con el modelo explicado, distintos movimientos que puede realizar la cabeza y su consecuencia en el raquis cervical.

Se realizará una detallada explicación sobre los músculos que intervienen en cada ensayo y el movimiento relativo producido entre las articulaciones para que esto funcione.

Primero se realizará un modelo 3D representando los músculos que participan en el movimiento y a continuación se representará un modelo 2D simplificado donde se irán estableciendo las cargas producidas por la contracción muscular y su dirección. El objetivo del modelo 2D es obtener las reacciones que recibe la articulación occipitoatloidea por la acción de las fuerzas musculares, estableciendo un equilibrio estático en el cráneo:

$$\sum \text{Fuerzas verticales} = 0.$$

$$\sum \text{Fuerzas horizontales} = 0.$$

$$\sum \text{Momentos respecto al punto de articulación} = 0.$$

Por tanto, las incógnitas en ese equilibrio estático son la reacción vertical y horizontal que recibe el punto de unión entre el occipital y el atlas (articulación occipitoatloidea) en el cráneo. Estas fuerzas serán las mismas, pero de sentido contrario en el atlas por acción y reacción, tal y como se enuncia en la tercera ley de Newton. Las fuerzas que recibe el atlas debido a los movimientos de la cabeza tienen que ser absorbidas por el raquis cervical y se transmiten a este por los medios de unión entre el atlas y el axis.

Para entender cómo se van a distribuir estas cargas a lo largo del raquis cervical, es necesario explicar cómo van a transmitirse desde el atlas hasta el axis y para ellos hay que desarrollar las **estructuras ligamentosas** cuya función es:

- Restringir las mociones dentro de límites bien definidos.
- Proteger la médula espinal en situaciones traumáticas (situación con daño físico al cuerpo).
- Guiar y reducir los movimientos de la cabeza y el cuello.
- Mantener el equilibrio entre las vértebras.

En la unión entre el atlas y el axis intervienen los siguientes ligamentos:

- **Ligamento transverso del atlas:** fuerte y gruesa banda horizontal que se extiende de un lado a otro del atlas por detrás del diente del axis.

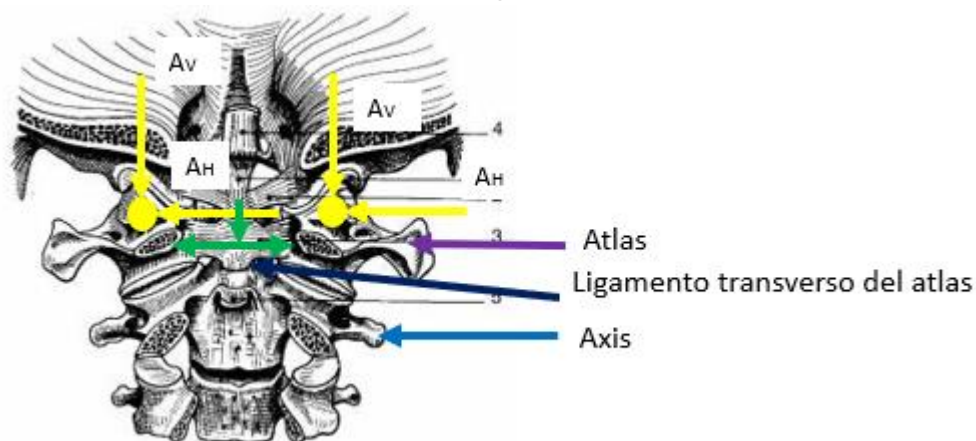


Figura 80. Representación del ligamento transverso del atlas. Fuente: [13] y elaboración propia.

- **Cápsulas de la articulación atloaxoidea:** Une las carillas superiores del axis con los márgenes de las masas laterales del atlas. Esta lateralmente es una continuación del ligamento atloaxoideo posterior.



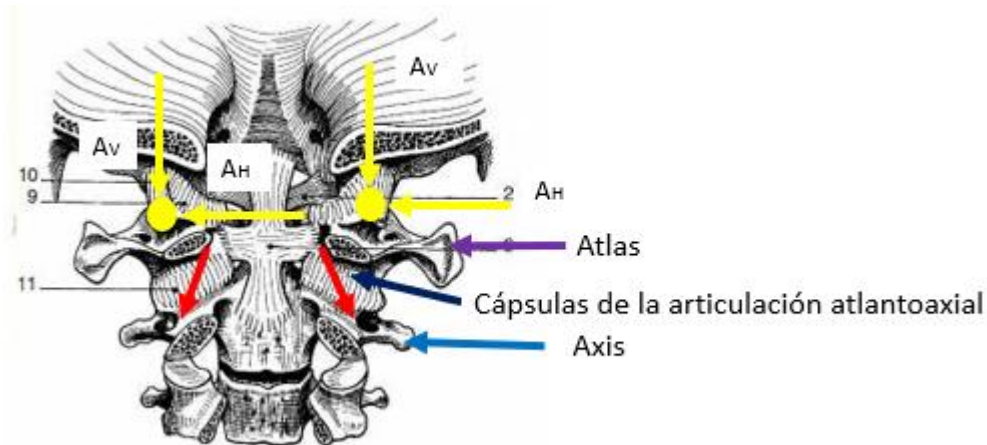


Figura 81. Representación de la articulación atloaxoidea. Fuente: [13] y elaboración propia.

- **Ligamento atloaxoideo anterior:** Prolonga hacia abajo el ligamento occipitoatloideo anterior. Se extiende desde el borde inferior del arco del atlas hasta la cara anterior del cuerpo del axis.

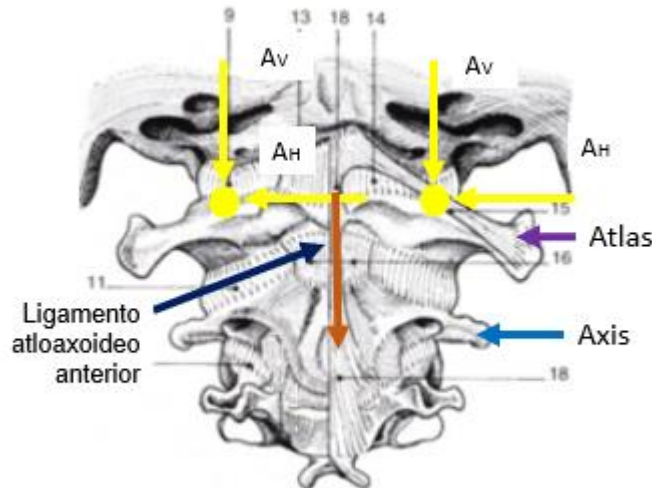


Figura 82. Representación del ligamento atloaxoideo anterior. Fuente: [13] y elaboración propia.

- **Ligamento atloideoaxoideo posterior:** une los arcos posteriores del atlas y del axis a modo de un ligamento amarillo (es un tejido con fibras resistentes que, aunque su función es mantener las vértebras en una correcta posición, también interviene en los movimientos, por eso sus fibras son fuertes pero elásticas. Estos se encuentran en la columna vertebral, entre las láminas intervertebrales, justo a cada lado de las apófisis y detrás de los cuerpos vertebrales). Por detrás de la articulación existe un orificio por el que sale el segundo nervio cervical.

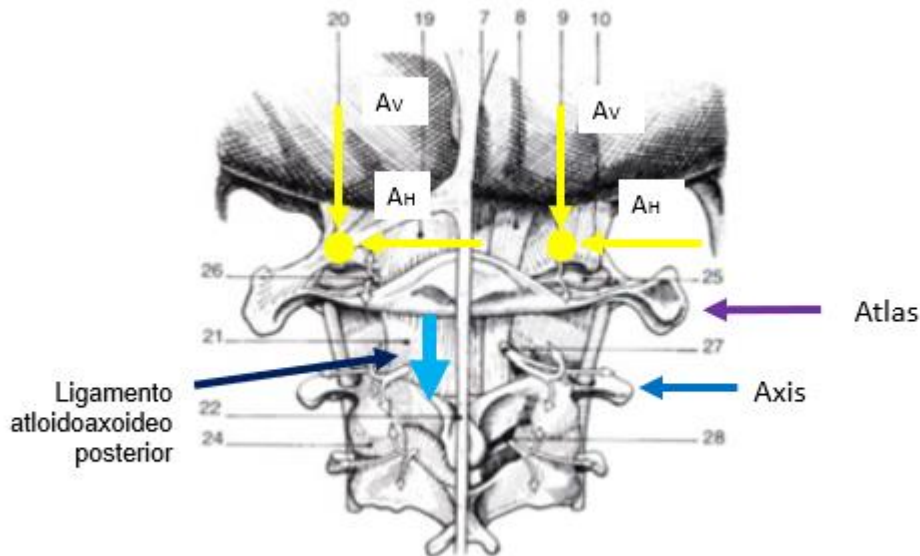


Figura 83. Representación del ligamento atloaxoideo posterior. Fuente: [13] y elaboración propia.

- **Ligamento accesorio:** ayuda a reforzar la unión entre dos huesos, aunque no forma parte de la cápsula articular. Se encuentra por debajo de la membrana tectoria y se extiende desde cerca de la base del diente del axis hasta la masa lateral del atlas, cerca de la fijación del ligamento transverso.

En todas las figuras anteriores se ha representado como las reacciones del punto de articulación que es simétrico, entre el atlas y el occipital son absorbidas y distribuidas por el raquis cervical mediante los diferentes ligamentos mencionados, siguiendo estas cargas direcciones distintas.

Para que estos ensayos se desarrollen con la mayor precisión posible, se procederá a dividir los movimientos en función de las articulaciones que trabajen. Por tanto, se realizarán dos grupos de ensayos: aquellos en los que se produzca un movimiento relativo entre el atlas, el hueso occipital y el axis, **movimientos del raquis cervical superior o raquis suboccipital**; y en un segundo grupo de ensayo se representarán aquellos movimientos en los que se vea involucrado el **raquis cervical inferior**.

Por tanto, para cada ensayo se escogerán los músculos que trabajan para desarrollar los movimientos relativos que se tienen que producir entre las articulaciones, estando siempre en equilibrio estático para ir estableciendo distintas posiciones de la cabeza con respecto del cuello.

Los pasos que se realizarán en los ensayos para obtener los modelos deseados serán los siguientes:

- 1) Identificación y explicación de las **articulaciones** que intervienen en el movimiento. Se desarrollará la fisiología de estas.
- 2) Elección, posicionamiento, simulación y explicación de los **grupos musculares** necesarios para producir el movimiento relativo de las articulaciones.

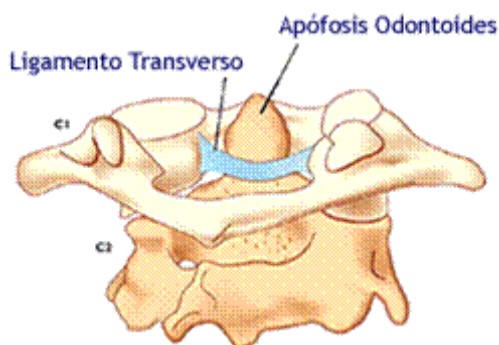
- 3) Representación de las cargas producidas por la contracción de los grupos musculares escogidos en un **modelo 3D**.
- 4) Simplificación a un **modelo 2D** en base al modelo 3D del punto anterior, para poder realizar el equilibrio estático y obtener las reacciones sobre el punto de articulación.

### 3.2.2.2 Movimientos del raquis cervical superior

El raquis cervical superior está compuesto por la primera vértebra cervical o atlas y la segunda vértebra cervical o axis. Estos huesos están unidos entre sí, además de con el occipital, por grupos musculares.

En un primer lugar se tendrá en cuenta el movimiento relativo de la primera vértebra cervical, el atlas con el hueso occipital, en el cráneo y la segunda vértebra cervical, el axis. Para asegurar la unión mecánica del atlas (C1) con el occipital y el axis (C2), se establecen cuatro articulaciones:

- **Articulación atloidoodontoidea:** unión entre el diente del axis y el atlas quedando fijada por el ligamento transverso. Aparte de producir los movimientos de rotación, debido a que no es totalmente cilíndrica, realiza también los movimientos de flexoextensión, teniendo así dos grados de libertad.
- **Articulación atloidoaxoidea:** dos articulaciones que establecen la unión de las masas laterales del atlas con el axis. Es del tipo sinovial.



*Figura 84. Articulación atloidoodontoidea y atloidoaxoidea. Unión del atlas (C1) con el axis (C2) y fijación mediante el ligamento transverso. [34]*

- **Articulación occipitoatloidea:** unión entre el atlas y el occipital compuesta por cartílago, cápsula articular y bolsa sinovial. Se produce un contacto entre la superficie articular superior del atlas y el cóndilo anterior del occipital. Se adjunta una imagen. La articulación occipitoatloidea es una enartrosis, es decir, es una articulación de superficie esférica con tres ejes, y, por tanto, con tres grados de libertad: rotación axial, flexoextensión e inclinación lateral.

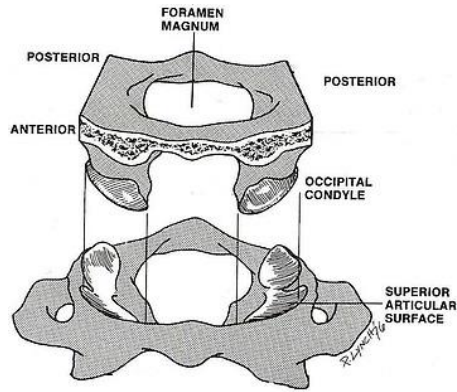


Figura 85. Construcción explosionada de la articulación occipitoatloidea. [33]

También se podría considerar la articulación occipitoaxoidea, que es la unión del occipital con el axis, pero no se ha escrito en el párrafo superior, puesto que no es una articulación propiamente dicha, sino que es una unión o fijación mediante un ligamento las apófisis odontoides del axis, con el hueso occipital.

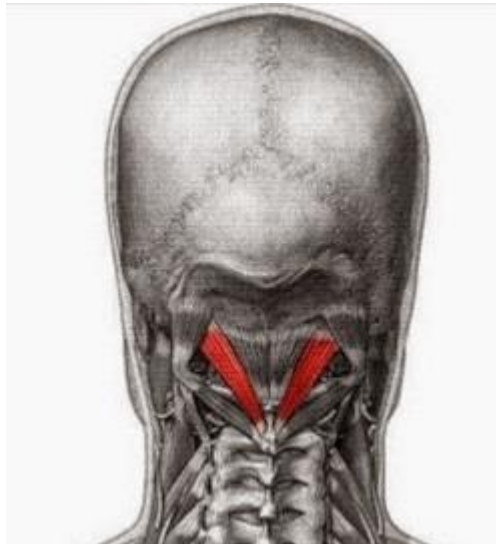
La finalidad de este grupo de ensayos es estudiar los movimientos que estén permitidos con las articulaciones anteriormente mencionadas, es decir, que solo se produzca movimiento en el atlas y el hueso occipital, siendo el axis el elemento fijo sobre el que se producen los desplazamientos. Por tanto, los ensayos que se realizarán serán de equilibrio, de flexoextensión y de rotación. Se despreciará el movimiento de inclinación lateral puesto que para que esta se produzca, es necesario un desplazamiento del axis sobre la tercera vértebra cervical (C3), se desarrollará en el siguiente capítulo.

#### Equilibrio del Recto Posterior Mayor

En este ensayo se representa la posición de equilibrio. Por tanto, no se produce movimiento alguno en las articulaciones del raquis cervical superior.

El músculo que se va a elegir para que trabaje y mantenga la cabeza en una posición neutral es el **recto posterior mayor**. Se ha escogido este de entre todos los que se pueden encontrar en la nuca por la posición en la que se ubica ya que permite contrarrestar el peso propio de la cabeza sobre el centro de gravedad de forma óptima.

El músculo recto posterior mayor de la cabeza es un músculo triangular con vértice inferior dirigido oblicuamente de abajo hacia arriba. Como se puede observar en la figura adjunta, tiene su origen en la apófisis espinosa del axis y su inserción se ubica en la porción lateral del hueso occipital, por debajo de la línea nual. Como también se aprecia hay dos músculos situados simétricamente con respecto de la línea media, para que se pueda realizar el equilibrio, ambo músculos tienen que trabajar, produciendo una contracción bilateral.



*Figura 86. Inserción y origen del recto posterior mayor. [34]*

Para trabajar con este músculo en la maqueta, se ha utilizado como se ha explicado en la parte superior, el punto número 3, para de esta forma representar la dirección del músculo de la forma más precisa posible y poder realizar los cálculos deseados. Se observa en la imagen, como estos músculos están trabajando, permaneciendo contraídos, aplicando una fuerza en dirección descendente contrarrestando el movimiento natural de la cabeza de irse hacia delante por acción de la gravedad.

La figura corresponde al **modelo 3D** del ensayo realizado en el laboratorio, representándose en color verde la fuerza provocada por el peso propio ubicado en el centro de gravedad y en azul la fuerza provocada por la contracción de los músculos agonistas.

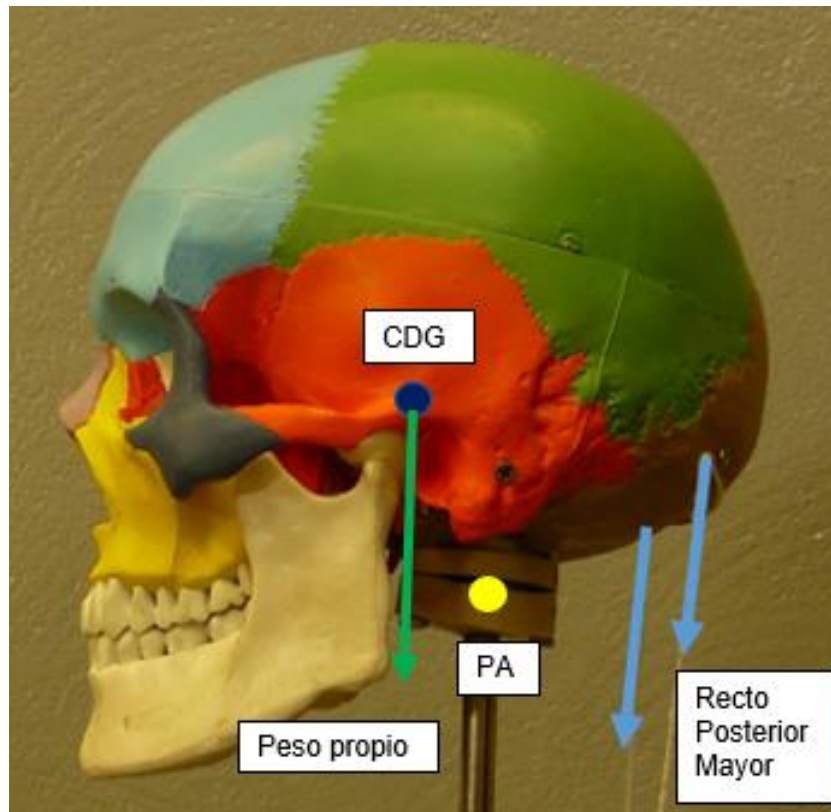


Figura 87. Modelo 3D. Posición de equilibrio con representación de las fuerzas ejercidas por el recto posterior mayor (azul) y el peso propio (verde). Fuente: Elaboración propia.

A continuación, para realizar el equilibrio estático y poder calcular las reacciones que se producen sobre el atlas, se simplificará el modelo anterior en un **modelo 2D**. Esta simplificación es posible, puesto que la fuerza que está ejerciendo cada músculo tiene la misma magnitud y el mismo sentido, ya que se está produciendo una contracción bilateral simétrica del recto posterior mayor. Por tanto, en color azul se representará la resultante de las fuerzas producida por el recto posterior mayor (RPM), en color verde el peso propio (P), en color amarillo la reacción vertical del punto de articulación ( $A_v$ ) y la reacción horizontal ( $A_h$ ), la distancia entre el peso propio y el punto de articulación ( $d_p$ ), la distancia entre la fuerza del recto posterior mayor y el punto de articulación ( $d_{RPM}$ ) y el ángulo del recto posterior mayor con respecto de la vertical.

Cabe destacar que en la *figura 41* obtenida del libro Kapandji hay un error puesto que el sentido de la reacción horizontal es a izquierdas, teniendo que ser a derechas para poder contrarrestar la componente horizontal del músculo como se puede observar en las siguientes figuras. De la misma forma, la reacción horizontal aparece con dos sentidos, teniendo que ser sentido único.

Posición de equilibrio:

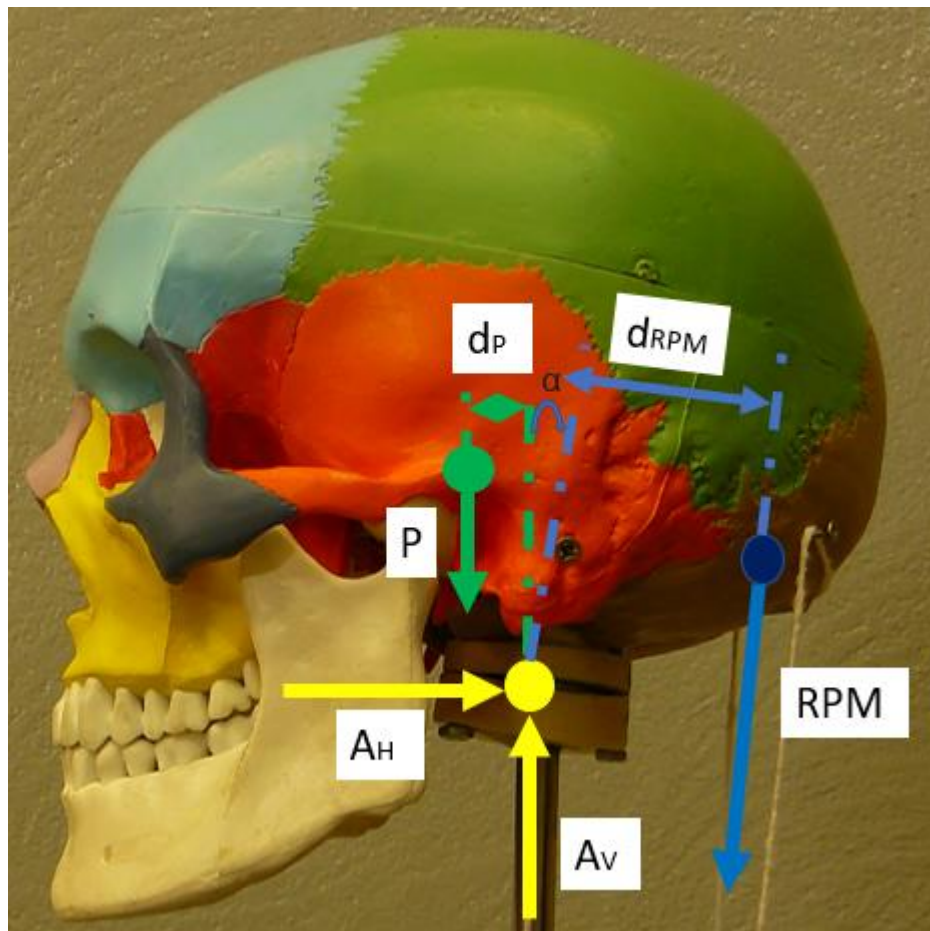


Figura 88. Modelo 2D de la posición de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 10^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(10^\circ) = 0,984 \text{ y } \text{sen}(10^\circ) = 0,173$$

$$d_P = K * 7\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 23\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \text{sen}(10^\circ) = 0,173RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,984RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,173RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,984RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 7) - (RPM * K * 23) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,304$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,304P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,173RPM = 0,173 * 0,304P = \mathbf{0,0525P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,984RPM + P = (0,984 * 0,304P) + P = \mathbf{1,299P}$$

En **conclusión**, estas reacciones horizontales y verticales, que son conocidas, puesto que P es dato, están representadas en el modelo 2D y tendrán la misma dirección y magnitud, pero distinto sentido en el atlas. Las fuerzas obtenidas tendrán que ser absorbidas por la unión atlas-axis para garantizar la posición de equilibrio del raquis cervical.

A continuación, se realizarán una serie de ensayos con modelos 2D diferentes para ver la evolución del equilibrio del raquis cervical en función de las reacciones articulares y del esfuerzo proporcionado por el recto posterior mayor, siendo un dato conocido el peso de la cabeza (P). Con esta serie de posiciones **se pretender obtener un estudio visual de la relación que tiene que haber entre el peso propio y el recto posterior mayor y así poder compararlas con la posición de equilibrio**. La manera de proceder será la misma que en el modelo 2D superior, teniendo las mismas variables en todo momento y siendo las incógnitas: la reacción vertical del punto de articulación ( $A_V$ ), la reacción horizontal ( $A_H$ ) y la fuerza producida por el recto posterior mayor (RPM). De la misma forma, como datos se tendrán: la distancia entre el peso propio y el punto de articulación ( $d_P$ ), la distancia entre la fuerza del recto posterior mayor y el punto de articulación ( $d_{RPM}$ ), el ángulo del recto posterior mayor con respecto de la vertical y el peso propio (P).



Posición 1:

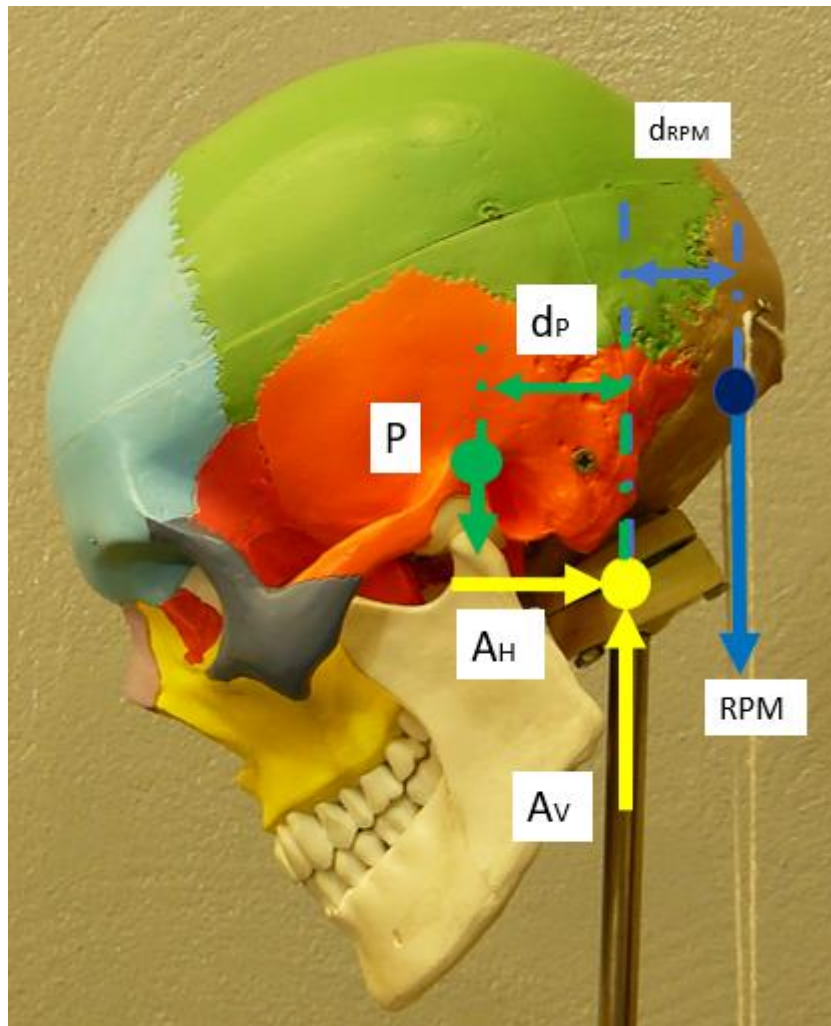


Figura 89. Modelo 2D. Posición 1, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K).

$$d_P = K * 19\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 15\text{mm}$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\sum F_H = 0 \rightarrow A_H = 0$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 19) - (RPM * K * 15) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 1,26$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 1,26P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = 0$$

$$A_V = RPM + P = 1,26P + P = 2,26P$$

Posición 2:

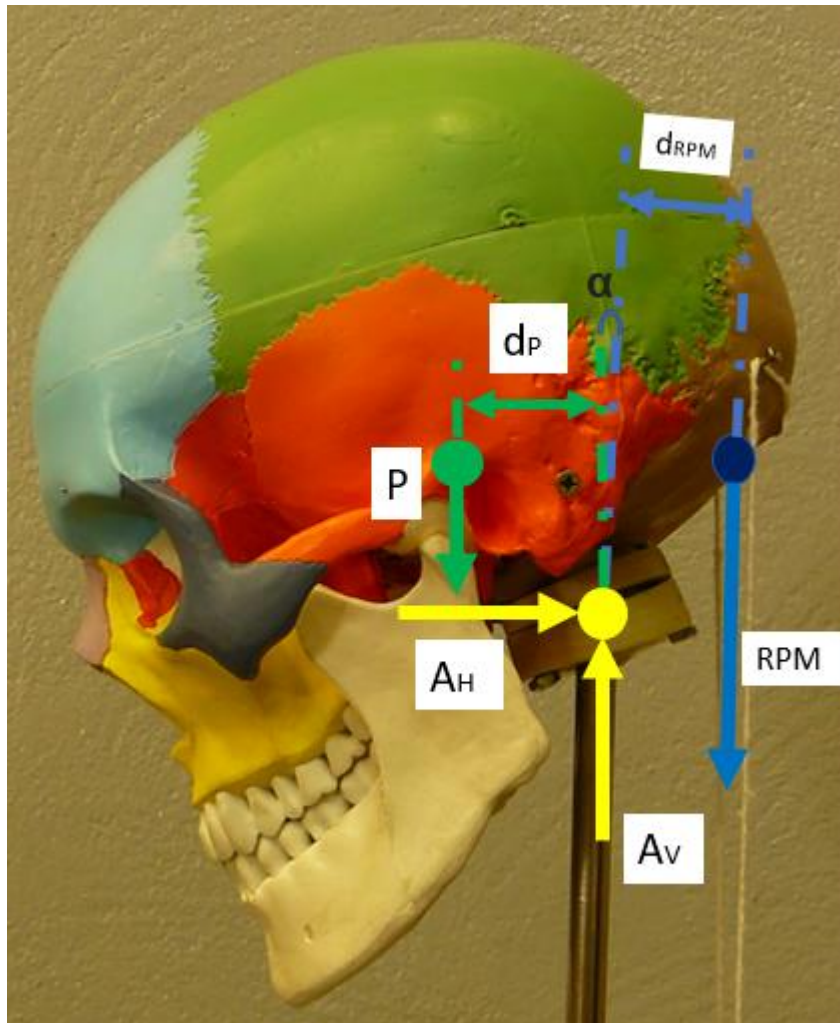


Figura 90. Modelo 2D. Posición 2, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 3^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(3^\circ) = 0,998 \text{ y } \sin(3^\circ) = 0,052$$

$$d_P = K * 18\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 16\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \text{sen}(5^\circ) = 0,052RPM$$

$$RPM_V = RPM * \text{cos}(10^\circ) = 0,998RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,052RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,998RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 18) - (RPM * K * 16) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 1,125$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 1,125P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,052RPM = 0,052 * 1,125P = \mathbf{0,0585P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,998RPM + P = (0,998 * 1,125P) + P = \mathbf{2,122P}$$

Posición 3:

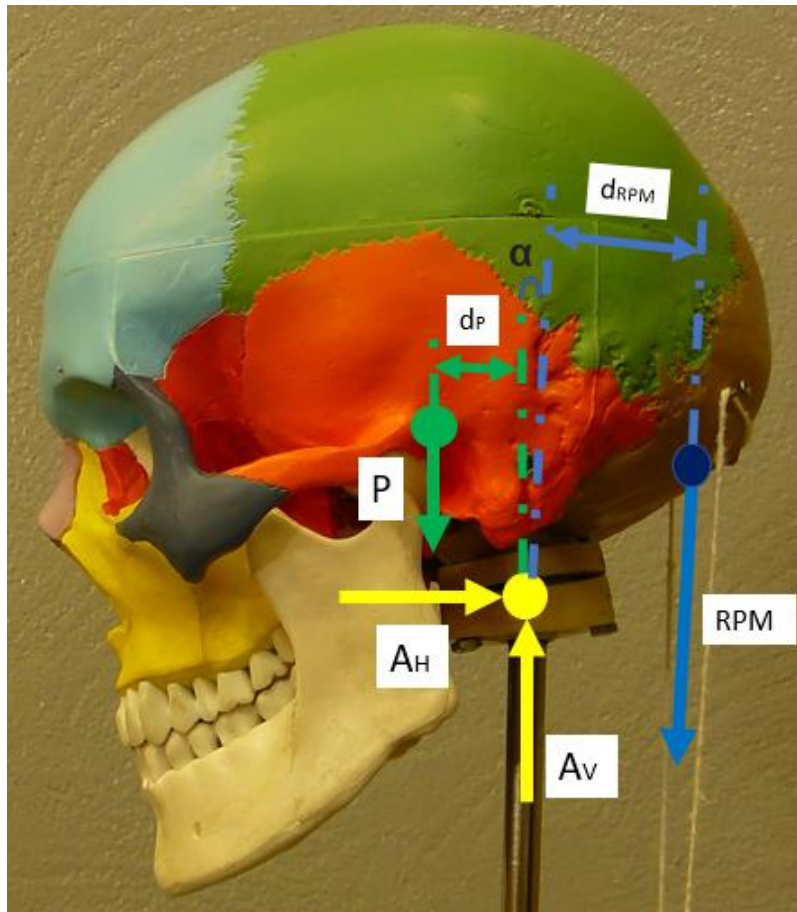


Figura 91. Modelo 2D. Posición 3, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 5^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(5^\circ) = 0,996 \text{ y } \sin(5^\circ) = 0,087$$

$$d_P = K * 15\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 21\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(5^\circ) = 0,087RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,996 RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\sum F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,087RPM$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,996 RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 15) - (RPM * K * 21) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,714$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,714P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,087RPM = 0,087 * 0,714P = \mathbf{0,062P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,996RPM + P = (0,996 * 0,714P) + P = \mathbf{1,711P}$$

Posición 4:

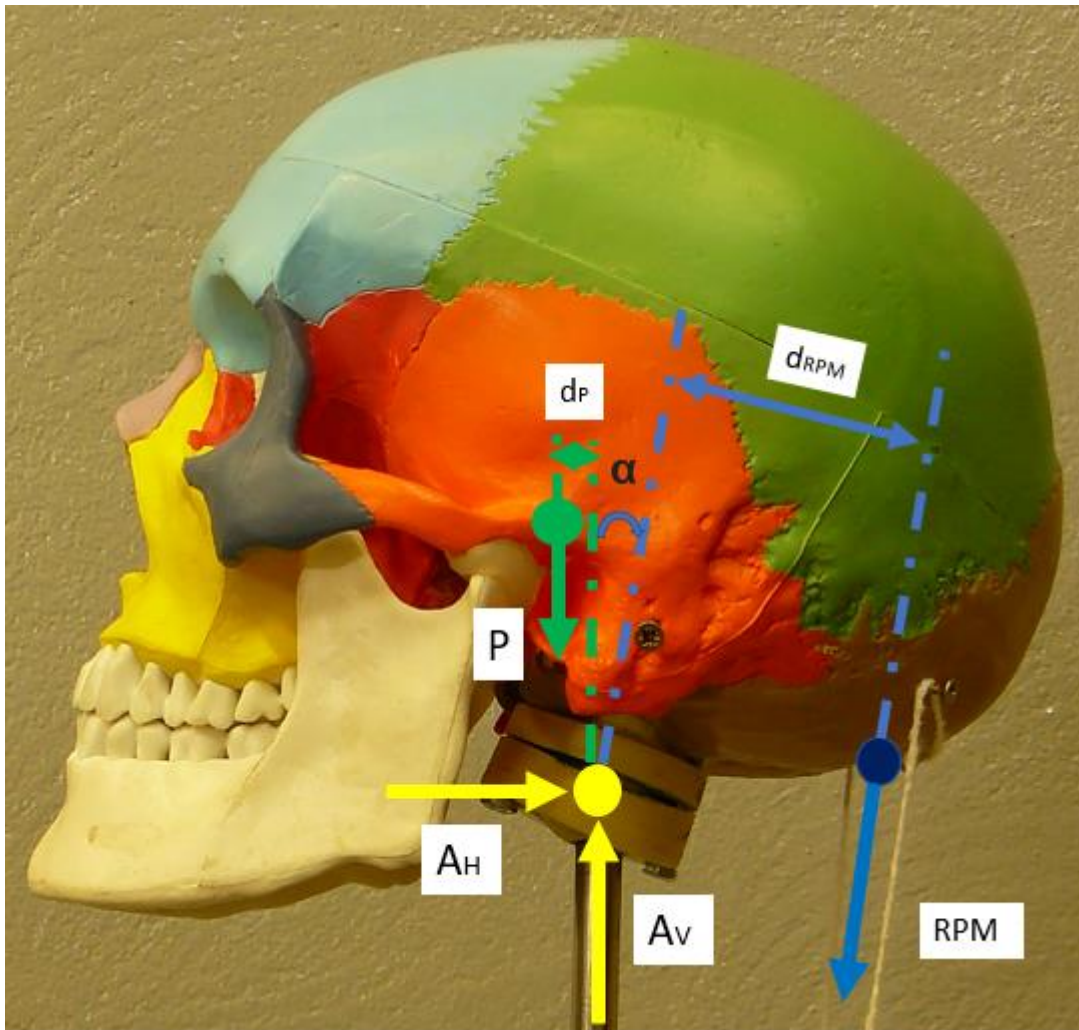


Figura 92. Modelo 2D. Posición 4, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 13^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(13^\circ) = 0,974 \text{ y } \sin(13^\circ) = 0,224$$

$$d_P = K * 5\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 34\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,224RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,974 RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\sum F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,224RPM$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,974 RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 5) - (RPM * K * 34) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,147$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,147P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,224RPM = 0,224 * 0,147P = \mathbf{0,0329P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,974 RPM + P = (0,974 * 0,147P) + P = \mathbf{1,143P}$$

Posición 5:

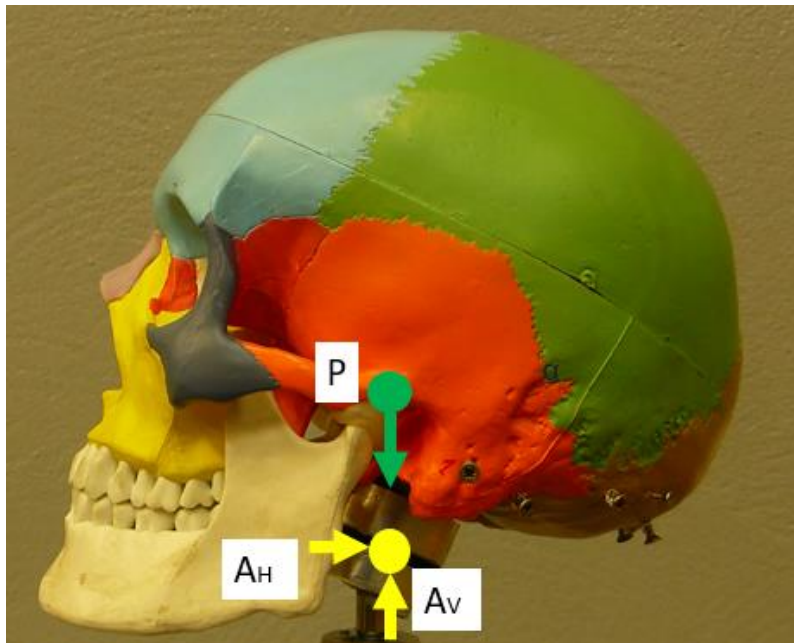


Figura 93. Modelo 2D. Posición 5, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.

En esta posición se ha suprimido el recto posterior mayor puesto que al encontrarse el peso propio en la perpendicular al punto de articulación (PA) este es nulo por equilibrio de momentos con respecto a PA.

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = 0$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = P$$

Por tanto, en conclusión:

$$A_H = 0$$

$$A_V = P$$

Para terminar esta secuencia de ensayos y poder observar la variación de la relación entre el peso propio y el recto posterior mayor, se van a elaborar una serie de gráficos para observar los cambios que se producen si se varía la posición de equilibrio de la cabeza. Se han ordenado según la secuencia de movimiento, siendo la *posición 1* la que permite la flexión máxima, seguida de la *posición 2*, *posición 3*, la siguiente sería la *posición de equilibrio* y por último la *posición 4* en la que se produce una extensión.

En base a la siguiente tabla, se han elaborado dos gráficos. Una primera para observar la variación de las reacciones del punto de equilibrio y del recto posterior mayor en función del peso propio y una segunda para ver la variación de las distancias y de la inclinación del recto posterior mayor.

|            | A <sub>H</sub> | A <sub>V</sub> | RPM   | d <sub>P</sub> | d <sub>RPM</sub> | α  |
|------------|----------------|----------------|-------|----------------|------------------|----|
| Posición 1 | 0              | 2,26           | 1,26  | 19             | 15               | 0  |
| Posición 2 | 0,0585         | 2,122          | 1,125 | 18             | 16               | 3  |
| Posición 3 | 0,062          | 1,711          | 0,714 | 15             | 21               | 5  |
| Equilibrio | 0,0525         | 1,299          | 0,304 | 7              | 23               | 10 |
| Posición 4 | 0,0329         | 1,143          | 0,147 | 5              | 34               | 13 |
| Posición 5 | 0              | 1              | 0     | 0              | 0                | 0  |

Tabla 2. Parámetros del equilibrio estático por actuación del recto posterior mayor. Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1:

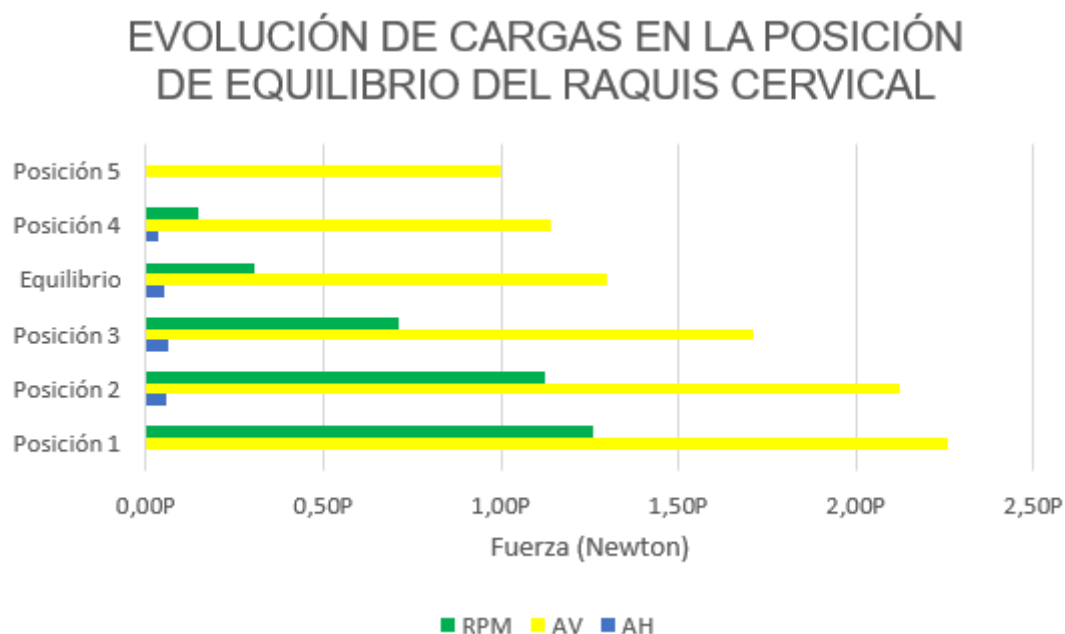


Gráfico 1. Evolución de cargas en la posición de equilibrio del raquis cervical (2). Fuente: Elaboración propia.

En el primer gráfico se puede observar como a medida que la cabeza se va inclinando hacia adelante partiendo de la posición de equilibrio, la reacción vertical que tiene que



ser absorbida por el raquis cervical aumenta, hasta llegar a un máximo en una posición completamente flexionada. De la misma forma, a medida que se produce esta flexión, el esfuerzo requerido por el recto posterior mayor incrementa para poder asegurar el equilibrio estático en cada posición. También se aprecia como las reacciones horizontales sobre el atlas son prácticamente despreciables frente a las otras cargas, llegando a hacerse nulas en la posición de completa flexión y extensión.

Gráfico 2:

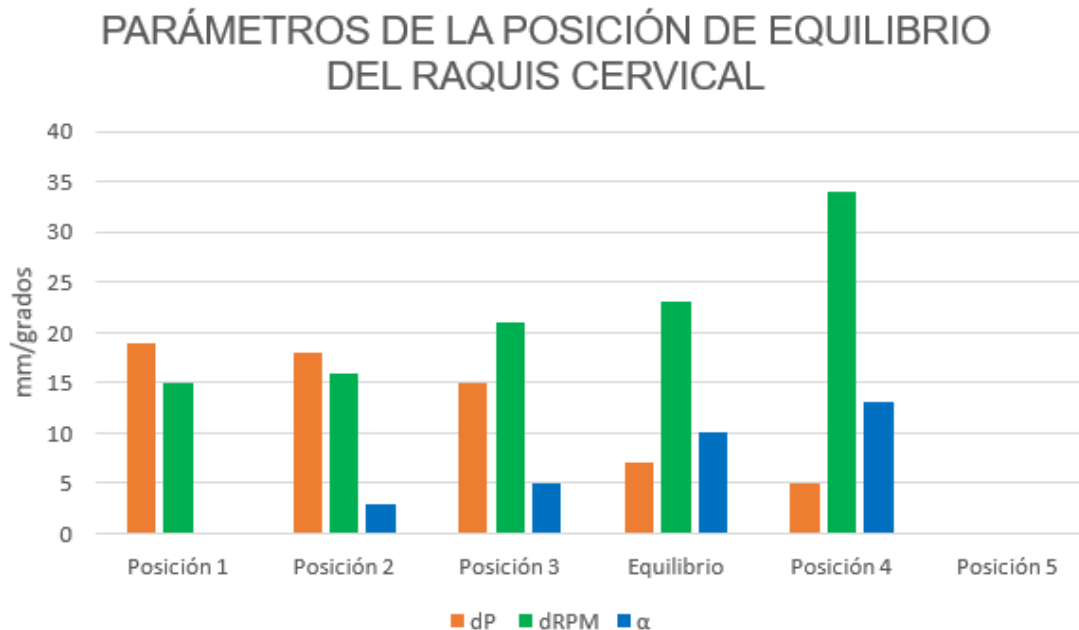


Gráfico 2. Parámetros de la posición de equilibrio del raquis cervical. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 2 se aprecia la tendencia que tiene la distancia entre la inserción el recto posterior mayor y el punto de articulación a disminuir conforme se produce la flexión de la cabeza y como el recto posterior mayor reduce una inclinación respecto de la vertical hasta posicionarse estrictamente en esta en una posición estricta de flexión para poder soportar las cargas producidas por el peso propio. También se observa como la distancia del centro de gravedad sigue una trayectoria contraria a la distancia del recto posterior mayor, disminuyendo conforme se produce el movimiento de flexión.

#### Flexión y extensión por acción de los músculos infrahioideos y el recto posterior mayor

En este ensayo realizado en el laboratorio se va a representar el movimiento de flexoextensión del raquis cervical superior.

Para realizar el movimiento de **flexión**, entra en funcionamiento la articulación atlóidoaxoidea. Las masas laterales del atlas ruedan sin deslizarse sobre las superficies superiores del axis, por tanto, el punto de contacto entre el atlas y el axis se desplazará hacia delante. Teniendo ahora en cuenta la articulación atlóidoontoidea, se observa que el punto de contacto entre el arco anterior del atlas y la carilla anterior del odontoides cambia, produciéndose un bostezo hacia arriba. En la imagen, se

observa este fenómeno, se ha rodeado en rojo el bostezo, el atlas al desplazarse hacia arriba, se separa del odontoides en la parte superior de la articulación atloidoontoidea. El punto de contacto entre atlas y axis pasa de estar en el punto A, al punto A', se adelanta.

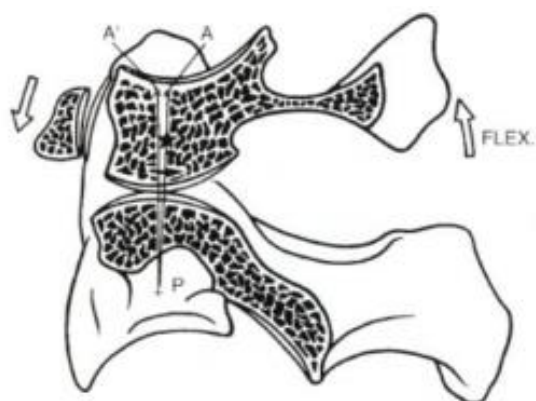


Figura 94. Movimiento relativo de flexión con desplazamiento en la articulación atloaxoidea y atloidoontoidea. [13]

El movimiento de extensión sigue el mismo procedimiento que la extensión, pero en sentido contrario. Suponiendo que no hay deslizamiento, las masas laterales del atlas ruedan sobre la superficie del axis, cambiando el punto de contacto, desde el punto B, hasta el punto B', como se observa en la imagen desplazándose hacia atrás. El bostezo en este caso entre el diente del axis y el atlas se produce hacia abajo.



Figura 95. Movimiento relativo de extensión con desplazamiento en la articulación atloaxoidea y atloidoontoidea. [13]

En el movimiento de flexoextensión, también se produce un desplazamiento relativo del occipital sobre el atlas. **Se produce un movimiento simultáneo de la articulación atloaxoidea y occipitoatloidea.** Se produce un deslizamiento de los cóndilos occipitales sobre las masas laterales del atlas.

Durante la **flexión**, los cóndilos occipitales retroceden sobre las masas laterales del atlas y la concha occipital (porción más ancha y delgada del cráneo que se encuentra tras el agujero magno en la parte posterior), se aleja del arco posterior del atlas. Como se está produciendo también un desplazamiento de la articulación atloaxoidea, el arco posterior del atlas también se aleja del arco posterior del axis como se observa en la figura, también se aprecia el movimiento relativo del occipital y del atlas, manteniéndose fijo el axis.

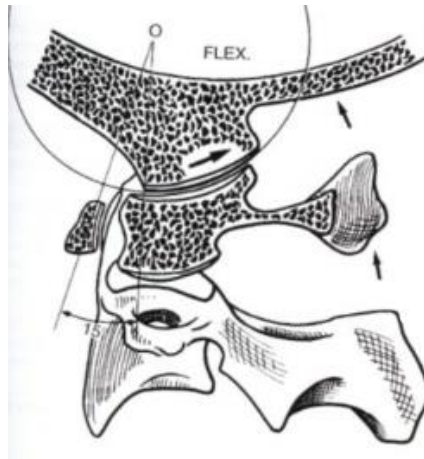


Figura 96. Movimiento de flexión con acción de las articulaciones occipitoatloidea y atloaxoidea. [13]

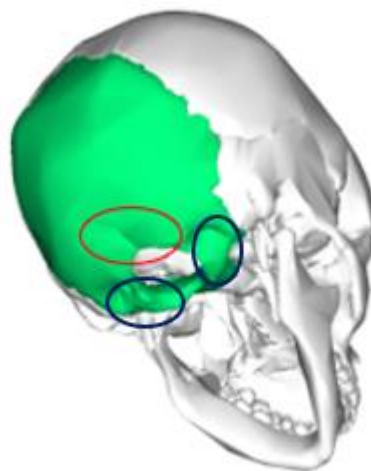


Figura 97. Cráneo (vista posterior e inferior) donde aparece representado en verde el hueso occipital y rodeado en rojo, la concha del occipital y en azul los cóndilos occipitales. [39]

En el movimiento de **extensión**, la articulación occipitoatloidea describirá el mismo movimiento, pero en sentido contrario. Los cóndilos occipitales se desplazarán hacia

la parte anterior, produciéndose por tanto un acercamiento de la concha del occipital al arco posterior del atlas. De la misma forma por acción de la articulación atloaxoidea, se produce un acercamiento del arco posterior del atlas al arco posterior del axis. Todo esto se ve ejemplificado en la siguiente figura.



*Figura 98. Movimiento de extensión por acción de las articulaciones occipitoatloidea y atloaxoidea. [13]*

En cuanto a los músculos, para la realización de este movimiento se ha decidido, dada la longitud y posición, escoger el omohioideo y el recto posterior mayor, estos músculos al contraerse producirán la fuerza suficiente para producir un desplazamiento en la articulación atloidoaxoidea y atloaxoidea.

Del **recto posterior mayor** no se va a comentar nada puesto que ya se comentó en el ensayo superior. El **omohioideo** es un músculo infrahiodeo del cuello. Es una banda de músculo plano formado por dos vientres superior e inferior que están unidos por un tendón intermedio. También, es simétrico, puesto que hay dos, uno a cada lado de la línea media. Su función es fijar la posición del del hueso hioides y deprimir la cabeza hacia delante. El origen de este músculo es el ligamento escapular transversal y borde superior de la escápula medial a la muesca supraescapular. Su inserción está en el borde lateral e inferior del hueso hioides. En la imagen se observa todo lo comentado en este párrafo, el músculo omohioideo con sus dos vientres, el superior e inferior y su inserción en el hueso hioides.

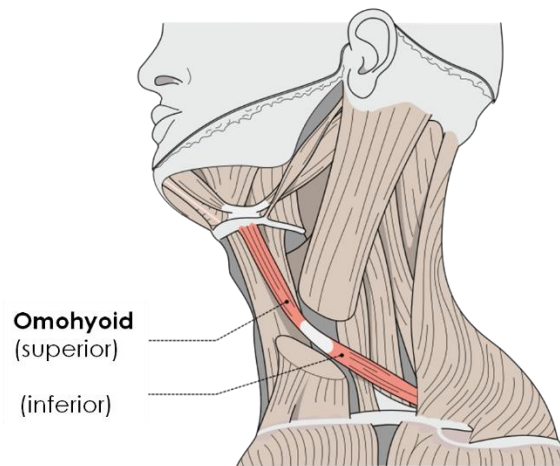


Figura 99. Origen e inserción del músculo omohioideo. [36]

Para realizar el ensayo, se ha ubicado el omohioideo en el punto número 4 y el recto posterior mayor en el número 3 del occipital con un ángulo que representa la manera más precisa posible la dirección de estos. En el ensayo se procedió a realizar una secuencia de un movimiento de inclinación, seguida de una flexión aplicando distintas cargas que como se explicó en la introducción, producían momentos, siempre estableciendo un equilibrio estático en cada posición. Los diferentes grupos musculares actuarán como músculos agonistas o antagonistas dependiendo del movimiento que se esté realizando en ese momento, así que en el modelo 3D se distinguirán dos casos, el de flexión y el de extensión.

En el **modelo 3D** adjuntado, se observa el **movimiento de flexión**, en una imagen del perfil izquierdo del cráneo. El omohioideo se contrae para producir una carga que establecerá un momento a derechas con respecto del punto de articulación (PA) para inclinar la cabeza hacia delante. El recto posterior mayor tiene la misión de establecer con su contracción bilateral unas cargas que produzcan un momento respecto del punto de articulación hacia la izquierda para de esta forma asegurar la vuelta de la cabeza al punto de equilibrio. En esta posición, el omohioideo será el músculo agonista (azul) y el recto posterior mayor el antagonista (rojo). En el modelo 3D se representa también el peso propio con una flecha en color verde situada en el CDG. Y el punto de articulación en amarillo.

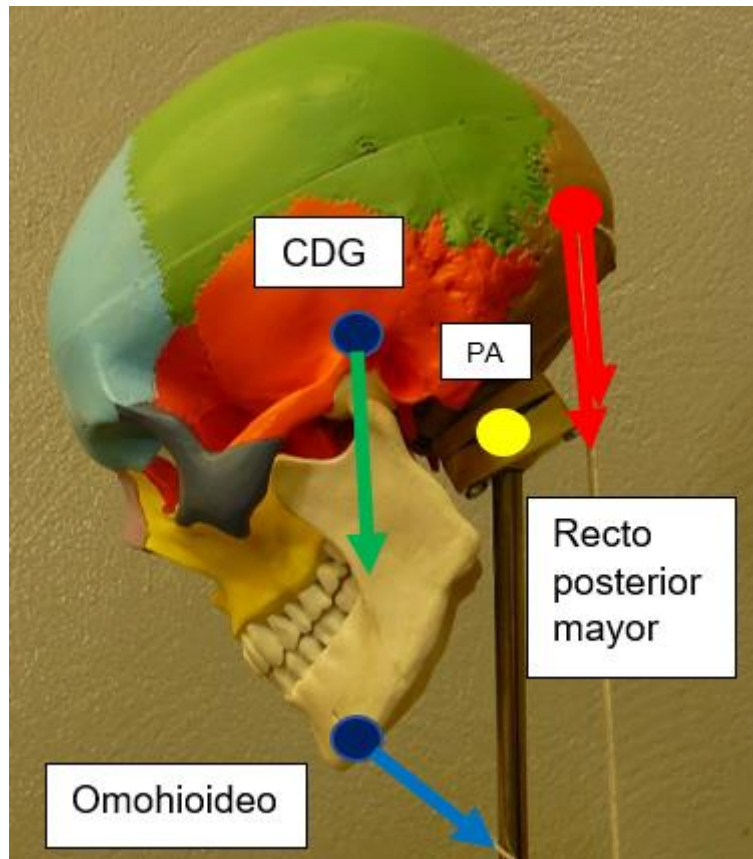


Figura 100. Modelo 3D del movimiento de flexión con representación de las fuerzas producidas por la contracción del omohioideo (azul), el recto posterior mayor (rojo) y la fuerza ejercida por la gravedad (verde). Fuente: elaboración propia.

A continuación, se adjunta una imagen del **modelo 3D** con la simulación de una **extensión de la cabeza**. El mecanismo que se sigue es el mismo que en flexión, pero cambiándose los papeles los músculos. En este caso, el recto posterior mayor pasa a ser el músculo agonista produciendo mediante su contracción bilateral un momento respecto al punto de articulación que provocará la flexión de la cabeza y el omohioideo será el músculo antagonista que provocará un momento respecto al mismo punto en sentido contrario para asegurar la vuelta a la posición de equilibrio. De la misma forma en el modelo se representa el peso propio de la cabeza y el punto de articulación.

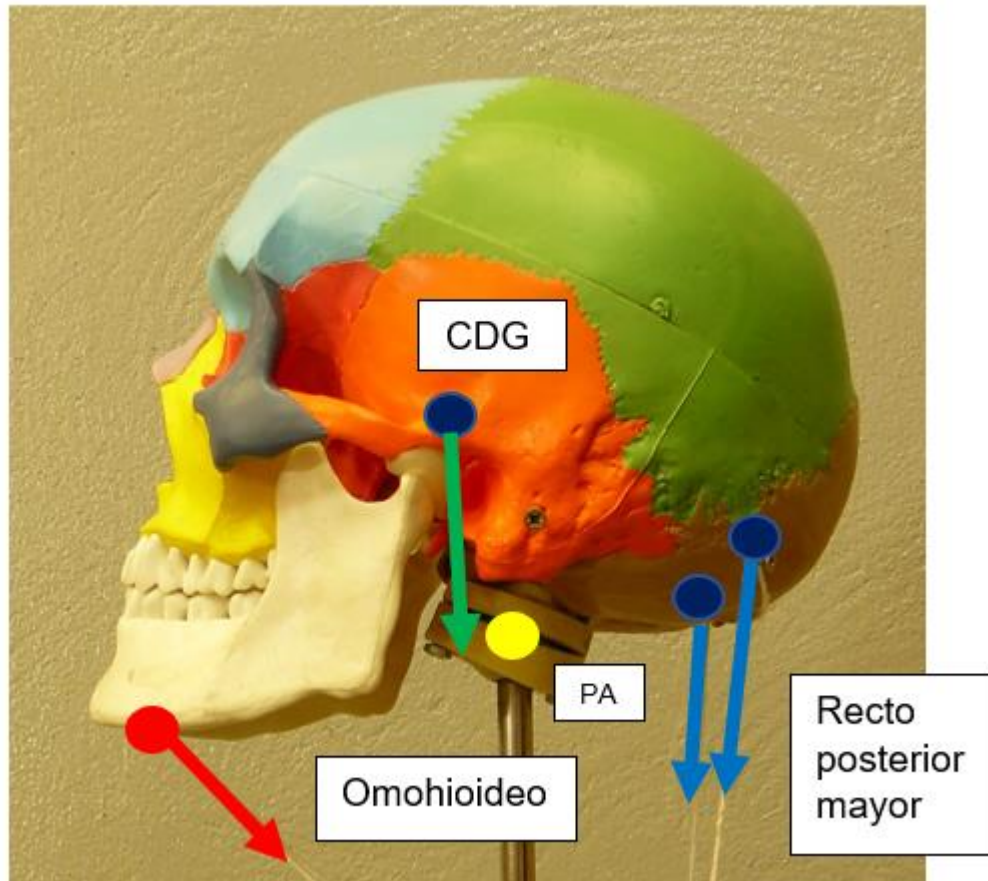


Figura 101. Modelo 3D del movimiento de extensión con representación de las fuerzas producidas por la contracción del recto posterior (azul), del omohioideo (rojo) y la fuerza ejercida por la gravedad (verde).  
Fuente: Elaboración propia.

Se desarrollará ahora un **modelo 2D** de cada uno de los movimientos. Para la realización del modelo se realizará una simplificación del recto posterior mayor, estableciendo la resultante de la fuerza ejercida por ambos, ya que esta es bilateral simétrica y por tanto tiene el mismo sentido y magnitud.

De nuevo, lo que se pretende mediante el modelo 2D es calcular las reacciones que produce cada movimiento sobre el atlas para de esta forma conocer las fuerzas que tiene que absorber el raquis cervical. Por tanto, en cada modelo aparecerán la resultante de las fuerzas producidas por el recto posterior mayor (RPM), las cargas establecidas por el omohioideo (O), el peso propio (P), la reacción vertical del punto de articulación ( $A_v$ ) y la reacción horizontal ( $A_h$ ), la distancia entre el peso propio y el punto de articulación ( $d_P$ ), la distancia entre la fuerza del recto posterior mayor y el punto de articulación ( $d_{RPM}$ ), la distancia entre el omohioideo y el punto de articulación ( $d_o$ ), el ángulo del recto posterior mayor con respecto de la vertical ( $\alpha$ ) y el ángulo del omohioideo respecto de la vertical ( $\beta$ ).

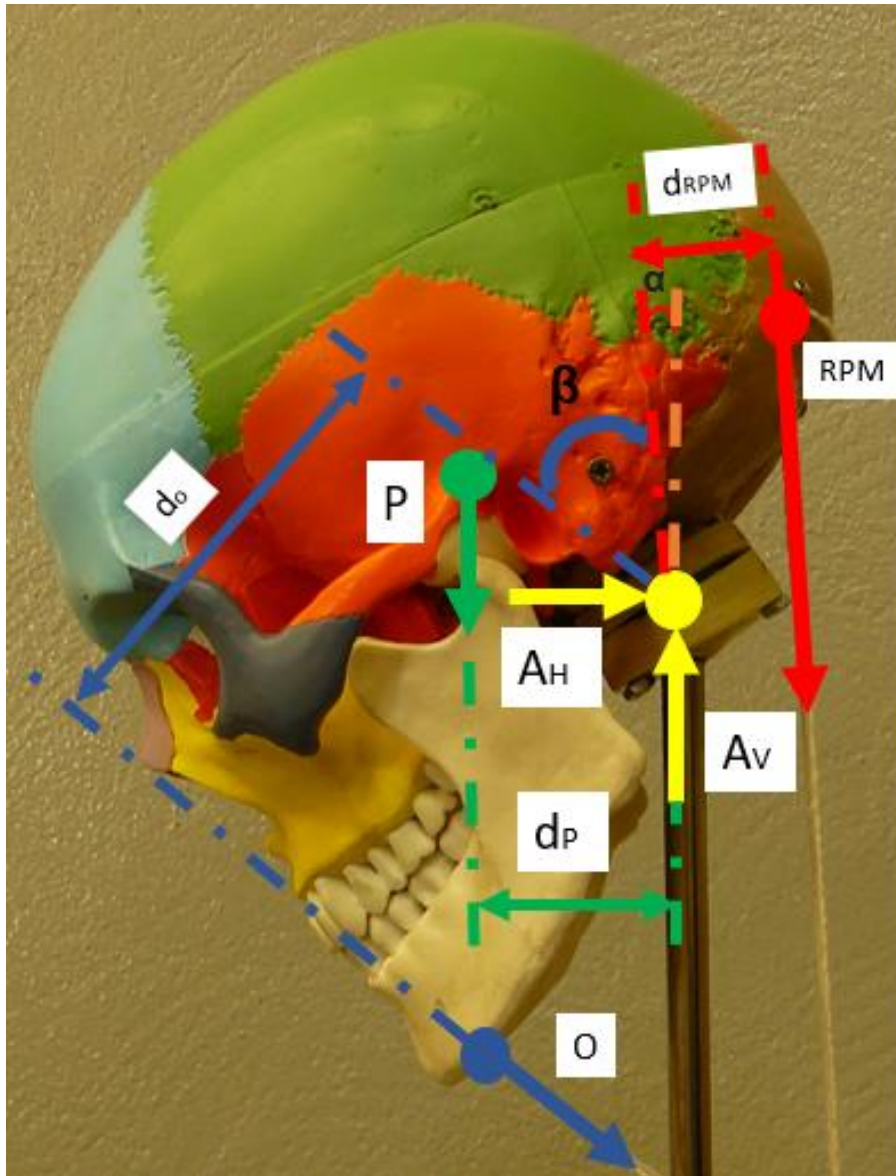


Figura 102. Modelo 2D del movimiento de flexión. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 6^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(6^\circ) = 0,994 \text{ y } \sin(6^\circ) = 0,104$$

$$\beta = 52^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(52^\circ) = 0,615 \text{ y } \sin(52^\circ) = 0,788$$

$$d_P = K * 24\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 16\text{mm}$$

$$d_o = K * 52\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(6^\circ) = 0,104RPM$$



$$RPM_V = RPM * \cos(6^\circ) = 0,994RPM$$

$$O_H = O * \sin(52^\circ) = 0,788O$$

$$O_V = O * \cos(52^\circ) = 0,615O$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H + O_H = RPM_H \rightarrow A_H = 0,104RPM - 0,788O$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P + O_V = 0,996RPM + P + 0,615O$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(O * d_o) + (P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0$$

$$(O * K * 52) + (P * K * 24) - (RPM * K * 16) = 0$$

En **conclusión**, a estas ecuaciones obtenidas por equilibrio estático, se obtiene un **sistema hiperestático** puesto que hay tres ecuaciones y cuatro incógnitas, siendo por tanto un problema no determinista. Las incógnitas son: las reacciones vertical y horizontal del occipital sobre el atlas ( $A_H$ ;  $A_V$ ), el esfuerzo producido por el recto posterior mayor (RPM) y el producido por el omohioideo (O).

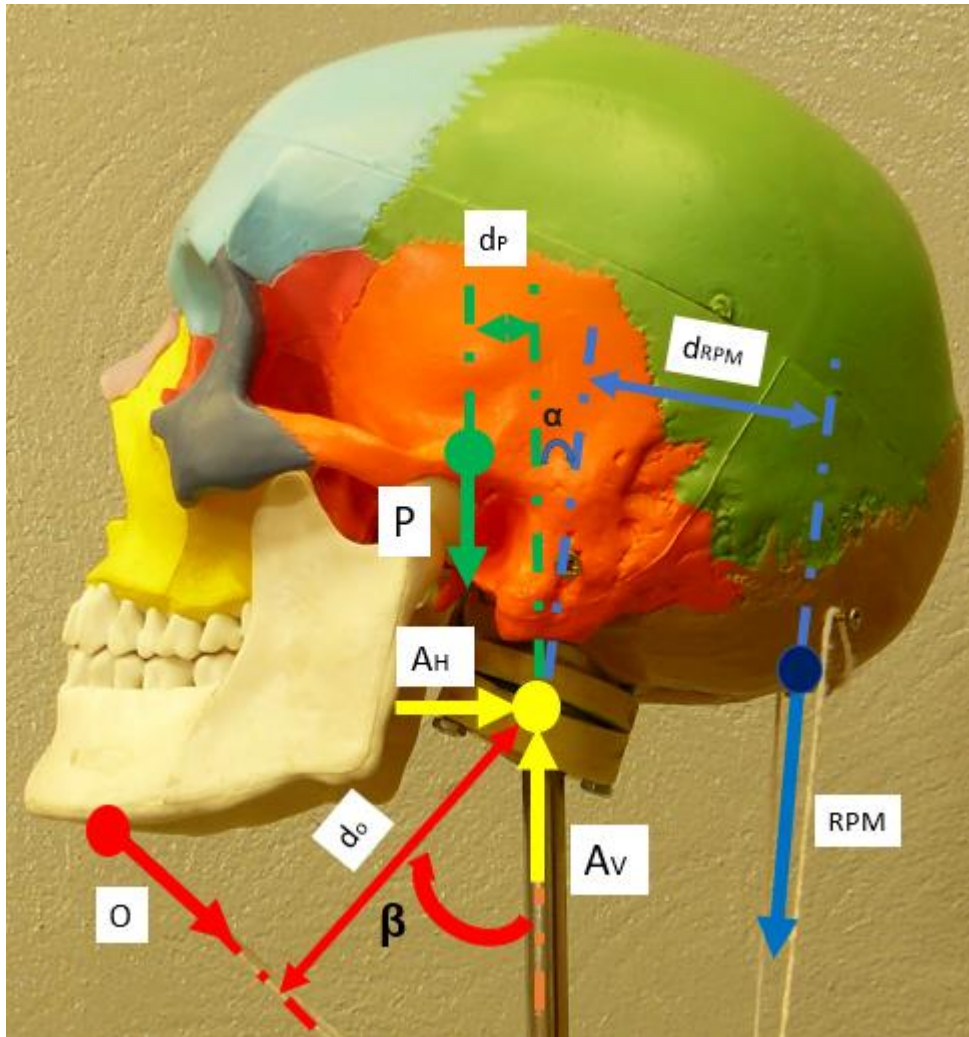


Figura 103. Modelo 2D del movimiento de extensión. Fuente: Elaboración propia.

. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 8^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(8^\circ) = 0,990 \text{ y } \sin(8^\circ) = 0,139$$

$$\beta = 45^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(45^\circ) = 0,707 \text{ y } \sin(45^\circ) = 0,707$$

$$d_P = K * 8\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 28\text{mm}$$

$$d_o = K * 44\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(8^\circ) = 0,139RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(8^\circ) = 0,990RPM$$

$$O_H = O * \cos(45^\circ) = 0,707O$$

$$O_V = O * \sin(45^\circ) = 0,707O$$

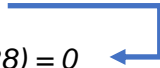
Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H=0 \longrightarrow A_H + O_H = RPM_H \longrightarrow A_H = 0,139RPM - 0,707O$$

$$\Sigma F_V=0 \longrightarrow A_V = RPM_V + P + O_V = 0,990RPM + P + 0,707O$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(O * d_o) + (P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0$$

$$(O * K * 44) + (P * K * 8) - (RPM * K * 28) = 0$$


La **conclusión** que se obtiene a estas ecuaciones de equilibrio es la misma, que para flexión y es que resulta del equilibrio, un **problema hiperestático**, en el que hay cuatro incógnitas y tres ecuaciones. Las incógnitas son: las reacciones vertical y horizontal del occipital sobre el atlas ( $A_H$ ;  $A_V$ ), el esfuerzo producido por el recto posterior mayor (RPM) y el producido por el omohioideo (O).

#### Rotación por acción del oblicuo menor de la cabeza y del complejo mayor

En este modelo se simulará el movimiento de rotación del raquis cervical que se produce mediante el movimiento de giro del atlas sobre el diente del axis. Este giro arrastra al hueso occipital produciendo la rotación de la cabeza.

Para que se produzca la rotación es necesaria la actuación de la **articulación atloidoondontoidea**, la cual está formada por una superficie cilíndrica maciza (apófisis odontoides) y un cilindro hueco (formado por el arco anterior y las masas laterales del atlas). Para fijar esta articulación, en las masas laterales del atlas se fija un potente ligamento que se extiende transversalmente llamado ligamento transverso. Por tanto, la odontoides está incrustada en el interior de un anillo osteoligamentoso formado por el atlas y el ligamento transverso. Para que se produzca el movimiento de rotación, la odontoides permanece fija, mientras que el anillo osteoligamentoso gira en el sentido de la rotación. Simultáneamente se produce un desplazamiento de las **articulaciones atloidoaxoideas** que están mecánicamente unidas.

Se va a explicar la rotación de la **articulación occipitoatloidea**, en ella intervienen el occipital, el atlas, el axis y el ligamento occipitodontoideo lateral. Se adjunta la siguiente figura para entender el movimiento. Con la letra A se identifica la sección del occipital y con la letra B, las masas laterales del atlas. El axis se encuentra en la parte inferior de la imagen. En este caso, se está produciendo una rotación en sentido antihorario y en torno al eje de rotación que atraviesa el centro del odontoides. La rotación no es ideal, puesto que viene acompañada de otros movimientos debido a la presencia de ligamentos que son tensionados durante el movimiento. El más importante es el ligamento occipitodontoideo lateral, que conforme avanza la rotación se enrolla alrededor del odontoides y se tensa, produciendo por tanto un desplazamiento del cóndilo del occipital. Por tanto, debido a estas tensiones, no se produce una rotación pura, sino que viene acompañada de una ligera traslación e inclinación.



Figura 104. Movimiento de rotación con acción de la articulación occipitoatloidea. [13]

A continuación, se desarrollarán los músculos que originan las fuerzas necesarias para producir los desplazamientos en las articulaciones mencionadas. El oblicuo menor se encargará de la rotación y el complejo mayor de la estabilidad del raquis cervical.

El **oblicuo menor** de la cabeza tiene su origen en la masa lateral del atlas (C1) y su inserción se encuentra en la línea nuczal del hueso occipital. Se aprecia en la imagen izquierda señalado con una flecha desde la parte posterior de la cabeza. En la imagen de la derecha se ha resaltado en color amarillo el oblicuo menor de la cabeza. Es importante esta imagen para apreciar el gran ángulo con respecto de la vertical con el que está ubicado, se ve perfectamente su origen que se encuentra en la apófisis transversa del atlas y como se desarrolla hasta la línea nuczal del occipital. El oblicuo menor es simétrico con respecto de la línea media y cuando se produce una contracción unilateral, gracias al ángulo que tiene, la fuerza que produce resulta en un momento que, rota la cabeza, mediante el giro del atlas sobre el diente del axis.

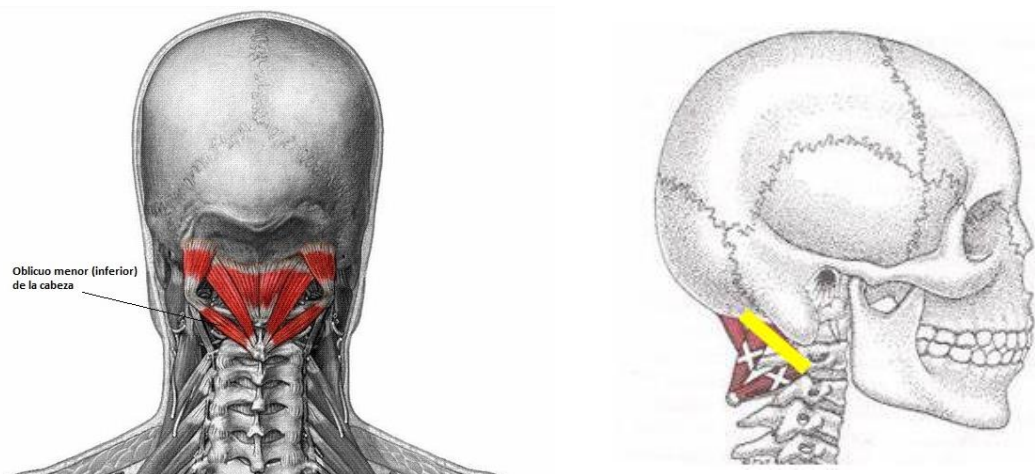


Figura 105. Origen e inserción del oblicuo menor. [37]

El **complejo mayor**, también denominado semiespinoso cervical, como se observa en la imagen, tiene su origen en las apófisis transversas de las 6 primeras vertebrales dorsales y C4-C7. Su inserción se encuentra en las caras laterales de las líneas curvas del occipital. Cuando se produce una contracción bilateral simétrica de ambos músculos, se produce extensión y rectificación cervical. La función que nos interesa en este caso es la segunda puesto que para que se produzca el movimiento de rotación, es necesario primero un equilibrio estático de la cabeza, rectificando la lordosis cervical, para que posteriormente se produzca el giro.



*Figura 106. Origen e inserción del complejo mayor. [38]*

Para realizar el ensayo de rotación se ha representado el complejo mayor en el punto número 2 y el oblicuo menor de la cabeza en el punto número 6.

En el **modelo 3D** se desarrolla una rotación completa de lado a lado. Se explicará el procedimiento seguido para que esto se produzca con ayuda de la imagen de la modelo adjuntada. Lo primero de todo, es necesario un equilibrio del raquis cervical, para que la cabeza no tienda a irse hacia delante por acción del peso propio representado en color verde en este modelo. Para contrarrestar el peso propio, actúa simétricamente el complejo mayor, en color morado, produciendo de esta forma el equilibrio estático necesario. Una vez asegurado este equilibrio, actúa de forma unilateral el oblicuo menor. Dependiendo de que oblicuo menor se contraiga, se producirá una contracción hacia un lado u hacia el otro, de esta forma, en la figura adjunta, se está produciendo un giro hacia la izquierda, por tanto, el músculo que se está contrayendo es el oblicuo menor izquierdo, siendo este el agonista (azul). Por tanto, el oblicuo menor derecho es el músculo antagonista (rojo) que asegurará la vuelta de la cabeza a la posición de equilibrio. También se destaca en amarillo, el punto de articulación (PA).

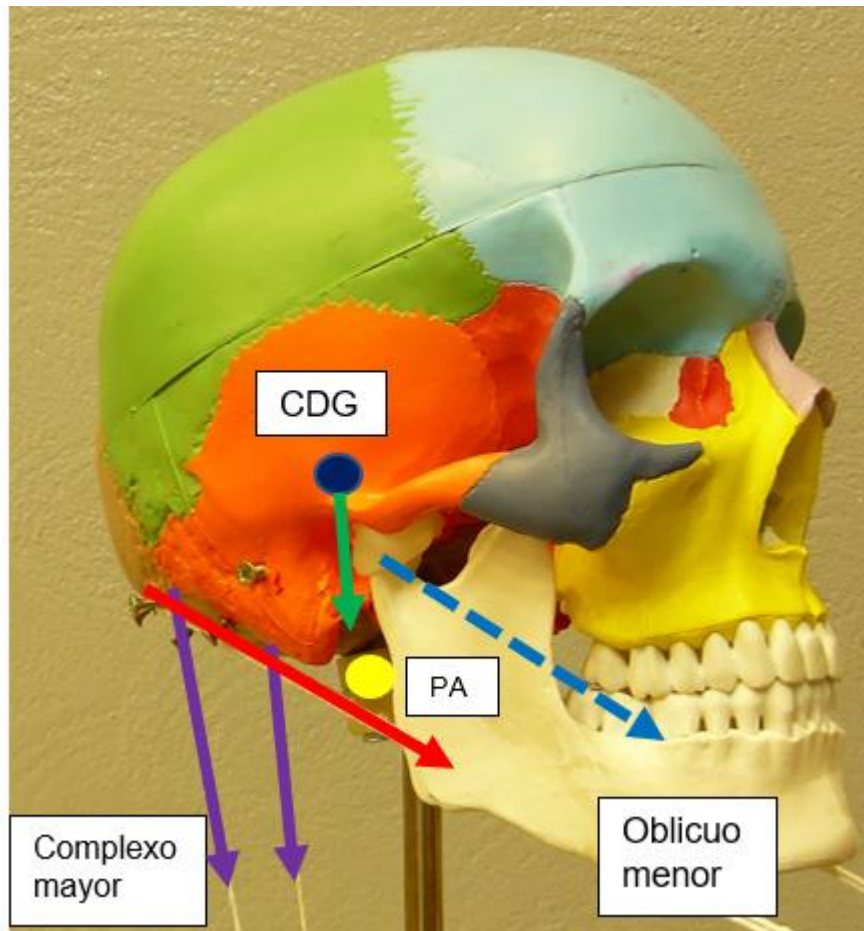


Figura 107. Modelo 3D del movimiento de rotación.

A continuación, se adjunta el **modelo 2D** del movimiento de rotación para poder realizar el equilibrio estático de este. Se realiza la simplificación de que el oblicuo menor ( $O_m$ ) al contraerse está provocando el mismo esfuerzo en ambos lados y puesto que su inserción es simétrica con respecto de la línea media de la cabeza, se aplicará la resultante de ambos en color azul. De la misma manera se realiza la misma simplificación con el complejo mayor (CM) en color morado. También se representa la reacción vertical de la articulación en amarillo ( $A_v$ ) y la horizontal ( $A_h$ ), el peso propio de la cabeza en color verde (P), la distancia entre el peso propio y el punto de articulación ( $d_p$ ), la distancia entre la fuerza del oblicuo menor y el punto de articulación ( $d_{om}$ ), la distancia entre el complejo mayor y el punto de articulación ( $d_{cm}$ ), el ángulo del oblicuo menor con respecto de la vertical ( $\alpha$ ) y el ángulo del complejo mayor respecto de la vertical ( $\beta$ ). Para realizar este modelo se toma una foto de perfil del movimiento de rotación.

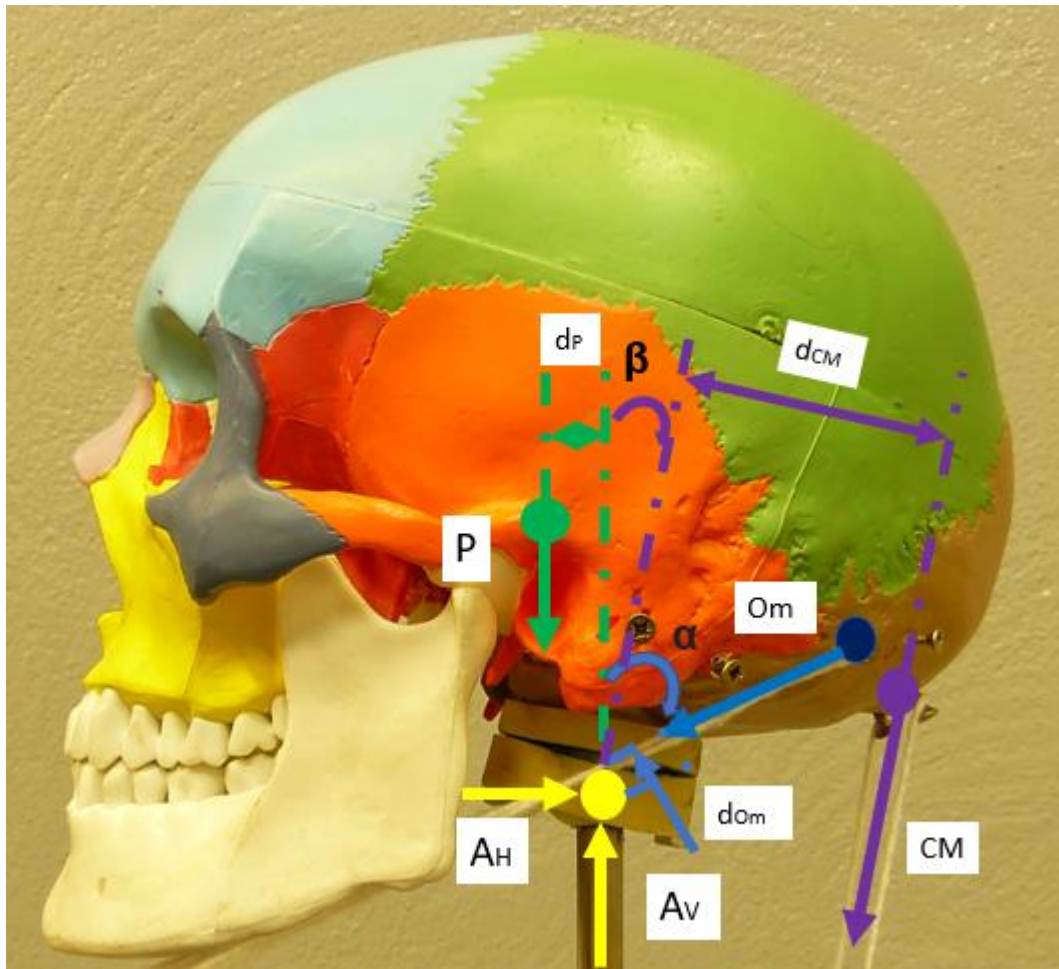


Figura 108. Modelo 2D del movimiento de rotación. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 57^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(57^\circ) = 0,544 \text{ y } \text{sen}(57^\circ) = 0,838$$

$$\beta = 11^\circ, \text{ Por tanto, } \cos(11^\circ) = 0,981 \text{ y } \text{sen}(11^\circ) = 0,190$$

$$d_P = K * 8 \text{ mm}$$

$$d_{CM} = K * 35 \text{ mm}$$

$$d_{om} = K * 5 \text{ mm}$$

Sabiendo que:

$$Om_H = Om * \text{sen}(57^\circ) = 0,838Om$$

$$Om_V = Om * \cos(57^\circ) = 0,544Om$$

$$CM_H = CM * \text{sen}(11^\circ) = 0,190CM$$

$$CM_V = CM * \cos(11^\circ) = 0,981CM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H=0 \longrightarrow A_H = CM_H + Om_H \longrightarrow A_H = 0,190CM + 0,838Om$$

$$\Sigma F_V=0 \longrightarrow A_V = CM_V + P + Om_V = 0,981CM + P + 0,544Om$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(O * d_{Om}) + (P * d_P) - (RPM * d_{CM}) = 0$$

$$(O * K * 5) + (P * K * 8) - (RPM * K * 35) = 0$$

En **conclusión**, a estas ecuaciones obtenidas por equilibrio estático, se obtiene un sistema hiperestático puesto que hay tres ecuaciones y cuatro incógnitas, siendo por tanto un problema no determinista. Las incógnitas son: las reacciones vertical y horizontal del occipital sobre el atlas ( $A_H$ ;  $A_V$ ), el esfuerzo producido por el oblicuo menor ( $Om$ ) y el producido por el complejo mayor ( $CM$ ). Siendo el peso propio de la cabeza dato.

### 3.2.2.3 Movimientos del raquis cervical inferior

En este apartado se van a desarrollar los movimientos en los que interviene el raquis cervical, que se extiende desde la meseta inferior del axis, hasta la meseta superior de la primera vértebra dorsal. Las articulaciones del raquis cervical inferior poseen dos tipos de movimiento: movimiento de flexoextensión y movimientos mixtos de inclinación-rotación.

Este apartado de ensayos sí que se tendrán en cuenta el movimiento de las articulaciones del resto de las cervicales (de la C3 hasta la C7), junto con el atlas, el axis y el occipital.

Los cuerpos vertebrales, están unidos por un disco vertebral el cual está formado exteriormente por un anillo fibroso compuesto por numerosas laminillas e interiormente por un núcleo pulposo.

#### Equilibrio

Se va a desarrollar un primer ensayo para describir las fuerzas necesarias para establecer un equilibrio estático que sea capaz de mantener el raquis cervical en su posición de equilibrio.

En esta posición, los cuerpos vertebrales se encuentran en una posición estable, es decir no se produce ningún desplazamiento del núcleo pulposo y todas las laminillas se encuentran sometidas a la misma tensión. Se observa esto en la figura siguiente. En gris queda representada la vértebra suprayacente y en blanco, la vértebra inmediatamente inferior.



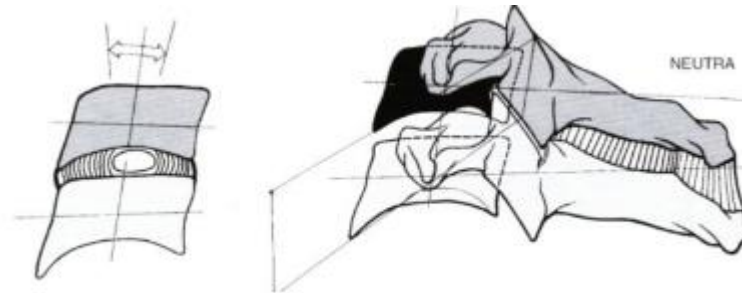


Figura 109. Posición neutra entre vértebras contiguas. [13]

Para representar establecer la posición de equilibrio en el modelo, serán necesarias las cargas producidas por la contracción del recto posterior mayor que producirán equilibrio estático. En la siguiente figura se representa el modelo 3D de la posición, representados en rojo la dirección y sentido de la carga producida por el músculo, el peso propio de la cabeza en el centro de gravedad y el punto de articulación entre el occipital y el atlas. También quedan representadas todas las vértebras cervicales en un tono grisáceo.

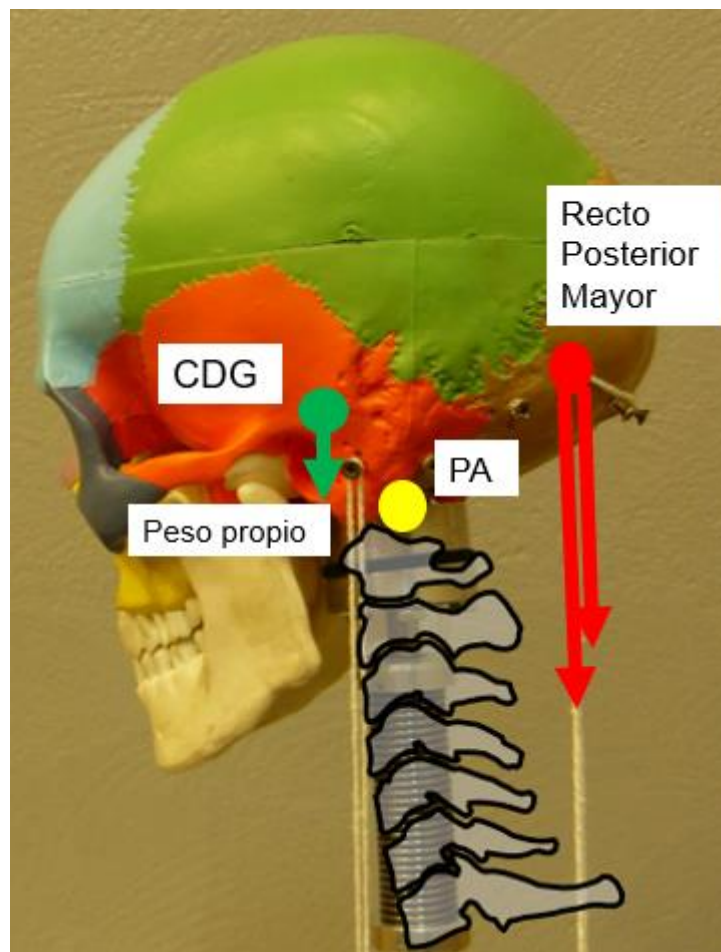


Figura 110. Modelo 3D del equilibrio estático del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se va a desarrollar un estudio sobre las cargas que recibe cada punto de articulación entre dos cervicales, siendo un problema isostático y dejando los resultados en función del peso propio del cráneo. Para la realización de los equilibrios estáticos se va a recurrir a modelos 2D obtenidos a partir del modelo 3D anterior, realizando las simplificaciones necesarias. Estas son, que el recto posterior mayor al ser un músculo simétrico, se pondrá la resultante de este.

*Reacciones entre el occipital y C1:*

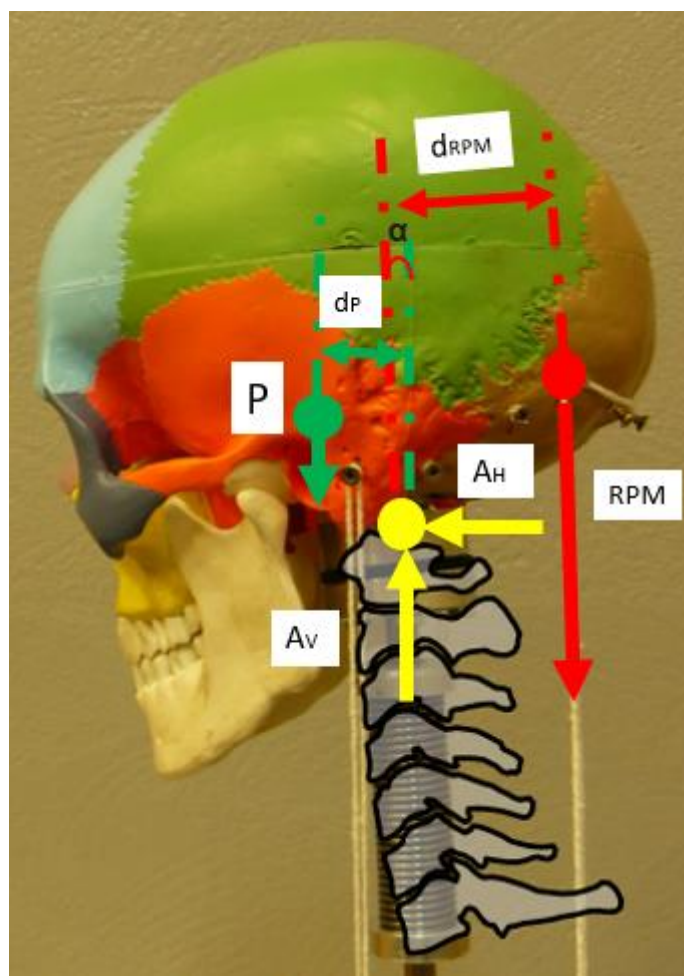


Figura 111. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre el occipital y C1. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 12\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 22\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\sum F_H=0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\sum F_V=0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 12) - (RPM * K * 22) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,54$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,54P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,54P = \mathbf{0,03726P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P = (0,997 * 0,54P) + P = \mathbf{1,538P}$$

Reacciones entre C1 y C2:

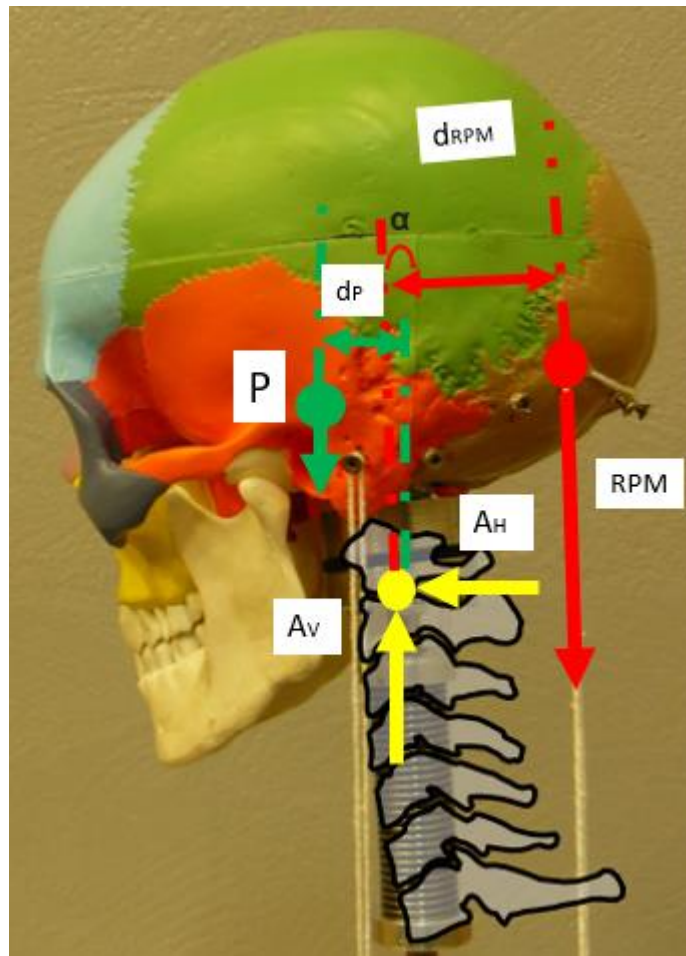


Figura 112. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C1 y C2. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 13\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 21\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \longrightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \longrightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \longrightarrow (P * K * 13) - (RPM * K * 21) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,61$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,61P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,61P = \mathbf{0,042P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P = (0,997 * 0,61P) + P = \mathbf{1,608P}$$

Reacciones entre C2 y C3:

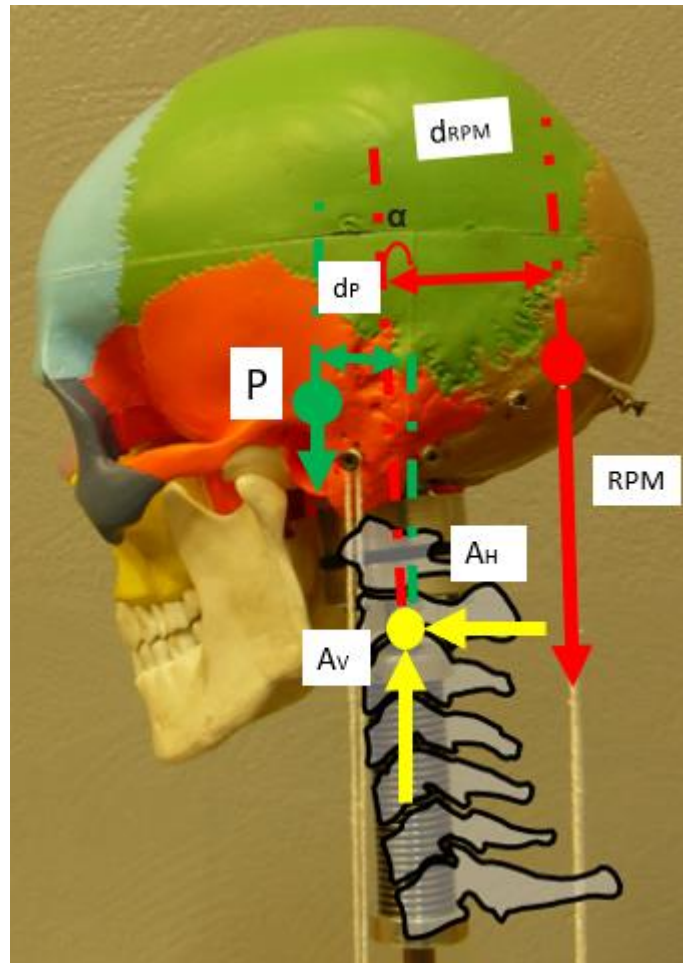


Figura 113. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C2 y C3. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 14\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 20\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\sum F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 14) - (RPM * K * 20) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,7$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,7P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,7P = \mathbf{0,0483P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P = (0,997 * 0,7P) + P = \mathbf{1,6979P}$$

Reacciones entre C3 y C4:

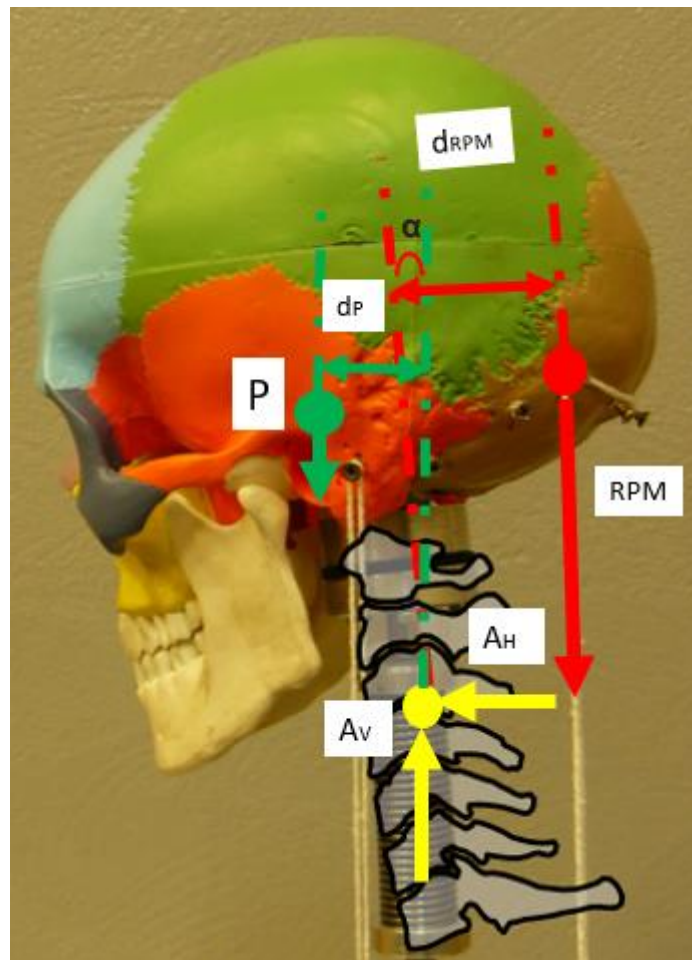


Figura 114. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C3 y C4. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 14,5\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 19,5\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \text{sen}(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \text{cos}(10^\circ) = 0,997 RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 14,5) - (RPM * K * 19,5) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,7$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,743P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,743P = \mathbf{0,0512P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P = (0,997 * 0,743P) + P = \mathbf{1,740P}$$

Reacciones entre C4 y C5:

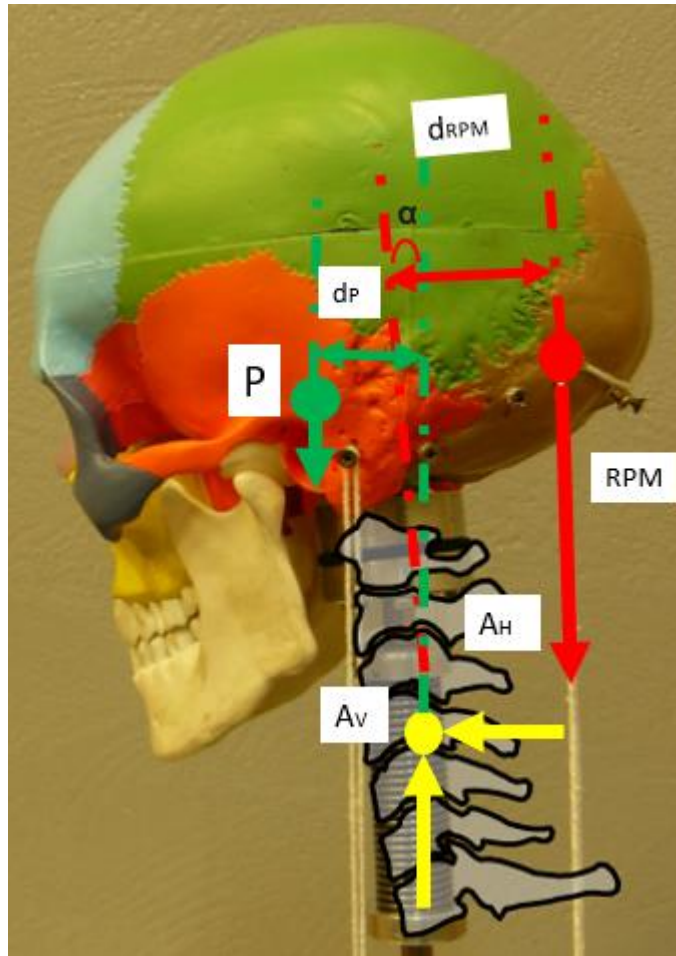


Figura 115. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C4 y C5. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 15\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 19\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 15) - (RPM * K * 19) = 0$$



$$\frac{RPM}{P} = 0,7$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,789P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,789P = \mathbf{0,0544P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P = (0,997 * 0,789P) + P = \mathbf{1,786P}$$

Reacciones entre C5 y C6:

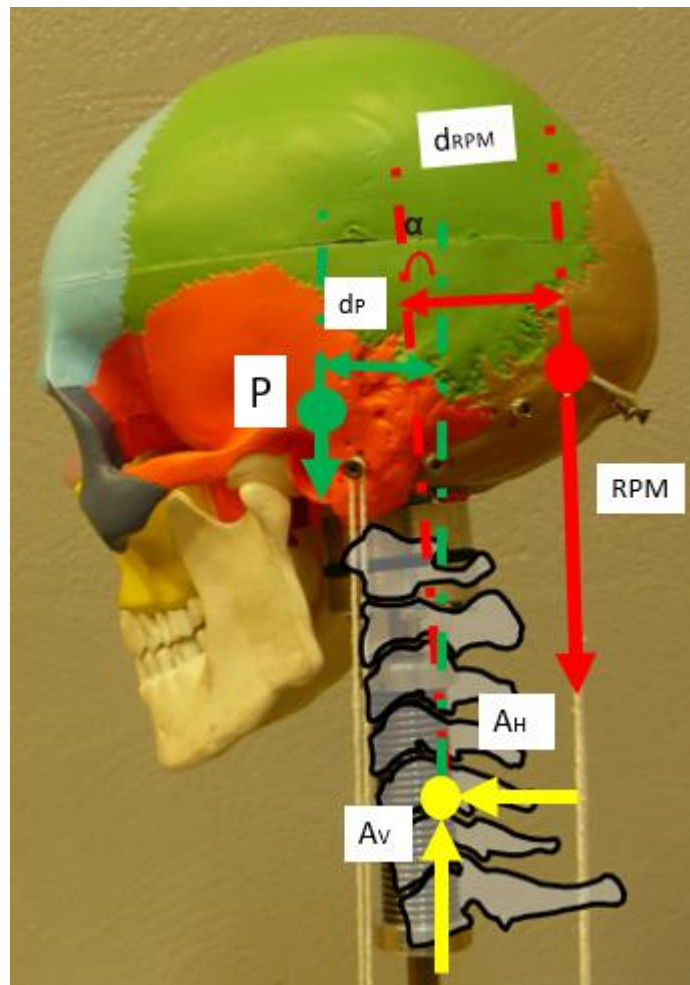


Figura 116. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C5 y C6. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 15,5mm$$

$$d_{RPM} = K * 18,5mm$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \text{sen}(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \text{cos}(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 15,5) - (RPM * K * 18,5) = 0$$
$$\frac{RPM}{P} = 0,7$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,835P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,835P = \mathbf{0,0576P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P = (0,997 * 0,835P) + P = \mathbf{1,832P}$$

Reacciones entre C6 y C7:

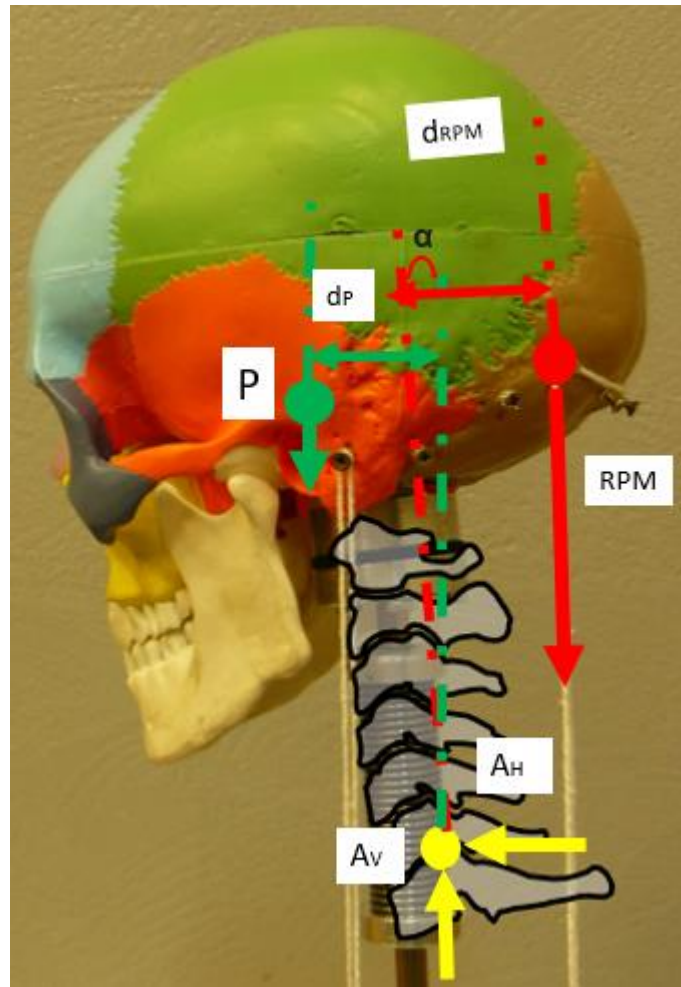


Figura 117. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C6 y C7. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias han sido tomadas en mm y son multiplicadas por una constante que representa el factor de escala (K). Los ángulos se han medido en grados. Se adjuntan las medidas:

$$\alpha = 4^\circ, \text{ Por lo tanto: } \cos(4^\circ) = 0,997 \text{ y } \sin(4^\circ) = 0,069$$

$$d_P = K * 16,5\text{mm}$$

$$d_{RPM} = K * 17,5\text{mm}$$

Sabiendo que:

$$RPM_H = RPM * \sin(10^\circ) = 0,069RPM$$

$$RPM_V = RPM * \cos(10^\circ) = 0,997RPM$$

Realizando un equilibrio estático:

$$\Sigma F_H = 0 \rightarrow A_H = RPM_H = 0,069RPM$$

$$\Sigma F_V = 0 \rightarrow A_V = RPM_V + P = 0,997RPM + P$$

Equilibrio de momentos entorno a PA:

$$(P * d_P) - (RPM * d_{RPM}) = 0 \rightarrow (P * K * 16,5) - (RPM * K * 17,5) = 0$$

$$\frac{RPM}{P} = 0,7$$

Por tanto, dejando la fuerza ejercida por recto posterior mayor en función del peso propio de la cabeza, puesto que es un valor conocido:  **$RPM = 0,942P$**

Aplicando la relación obtenida en el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales para obtener las reacciones en el punto de articulación:

$$A_H = RPM_H = 0,069RPM = 0,069 * 0,942P = \mathbf{0,0649P}$$

$$A_V = RPM_V + P = 0,997 RPM + P = (0,997 * 0,942P) + P = \mathbf{1,939P}$$

Para sacar conclusiones acerca de los equilibrios realizados, se van a elaborar una serie de gráficos que ayudarán a obtener la información de una manera más visual.

Se van a partir de estos resultados para elaborar las gráficas:

|              | $A_H$   | $A_V$  | RPM   | $d_P$ | $d_{RPM}$ | $\alpha$ |
|--------------|---------|--------|-------|-------|-----------|----------|
| Occipital-C1 | 0,03726 | 1,538  | 0,54  | 12    | 22        | 4        |
| C1-C2        | 0,042   | 1,608  | 0,61  | 13    | 21        | 4        |
| C2-C3        | 0,0483  | 1,6979 | 0,7   | 14    | 20        | 4        |
| C3-C4        | 0,0512  | 1,74   | 0,743 | 14,5  | 19,5      | 4        |
| C4-C5        | 0,0544  | 1,786  | 0,789 | 15    | 19        | 4        |
| C5-C6        | 0,0576  | 1,832  | 0,835 | 15,5  | 18,5      | 4        |
| C6-C7        | 0,0649  | 1,939  | 0,942 | 16,5  | 17,5      | 4        |

Tabla 3. Resultados del equilibrio del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.

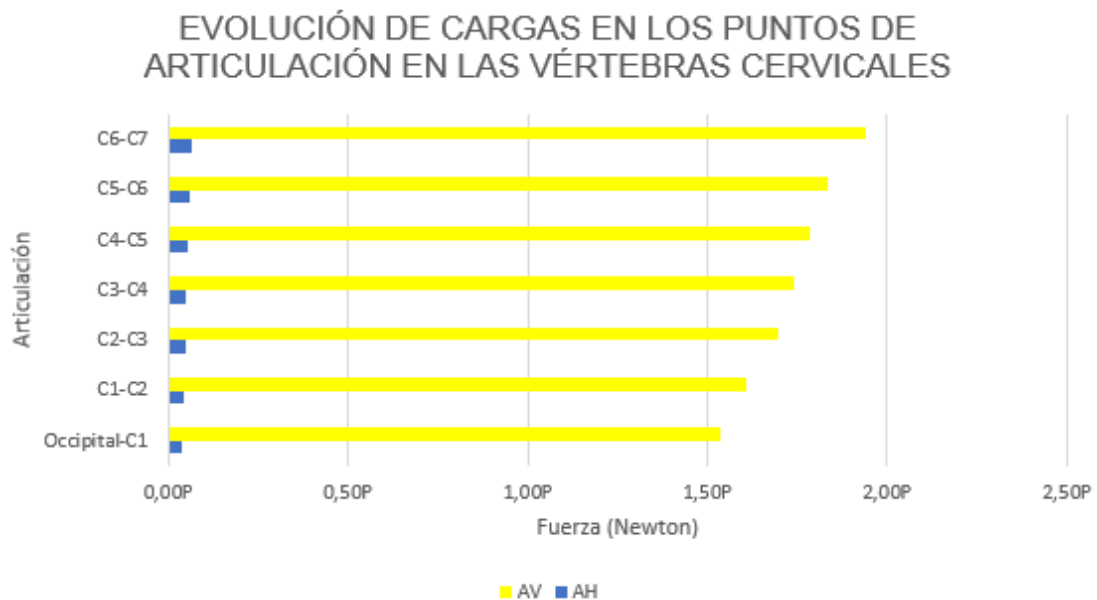


Gráfico 3. Evolución de cargas en los puntos de articulación en las vértebras cervicales. Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión del gráfico adjunto se tiene que la reacción vertical va aumentando conforme se desciende en las vértebras cervicales, llegando al valor máximo en la

articulación entre C6 y C7. La reacción horizontal permanece constante en cada articulación.

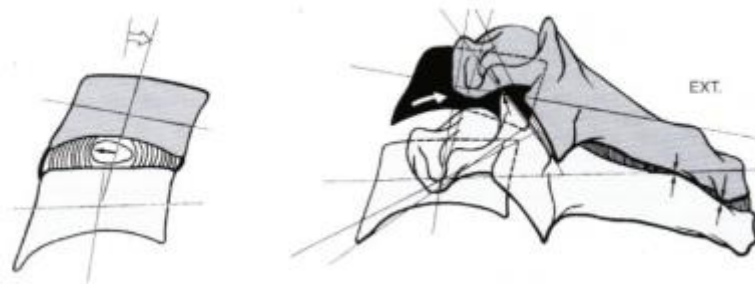
### Movimiento de flexoextensión

En este apartado se desarrollarán los modelos para el estudio del movimiento de flexoextensión del raquis cervical inferior. Para ello los músculos que trabajarán y que por tanto al contraerse aplicarán una carga serán: el recto posterior mayor en el número 3, el esternohioideo en el número 4, el esternocleidomastoideo en el número 1 y el oblicuo menor en el número 6.

Se comenzará la explicación de los modelos con la fisiología de los movimientos.

Para desarrollar el **movimiento de flexión**, la vértebra suprayacente se desplazará hacia delante, produciendo una disminución del grosor del hueso entre las vértebras en la parte anterior. Esta disminución del grosor en la parte anterior obliga al núcleo pulposo a desplazarse hacia atrás, quedando por tanto tensadas las fibras de la parte posterior. La carilla posterior de la vértebra suprayacente se desplaza hacia arriba y hacia delante. Este movimiento de flexión está limitado por las tensiones ligamentosas.

El **movimiento de extensión** produce los mismos efectos que el de flexión, pero en sentido contrario, eso sí, este está limitado no solamente por las tensiones producidas por los ligamentos, si no también, por el contacto que se produce entre los arcos posteriores de las vértebras. Se produce un desplazamiento hacia atrás de la vértebra suprayacente, disminuyendo por tanto el grosor en la parte posterior. Esto hace que el núcleo pulposo se desplace hacia delante, tensando por tanto las fibras de la parte posterior.



*Figura 118. Movimiento de extensión. Deslizamiento de la vértebra suprayacente hacia atrás sobre la vértebra contigua. [13]*

El recto posterior mayor y el oblicuo menor ya han sido desarrollados en modelos anteriores. Se detallarán a continuación el esternocleidomastoideo y el esternohioideo.

El **esternocleidomastoideo** está ubicado en la zonal anterior y lateral del cuello. Es de apariencia larga y robusta. Este músculo forma parte del grupo de los músculos inspiratorios y puede realizar las acciones de rotación de la cabeza hacia el lado contrario e inclinación cuando se produce una contracción unilateral y flexión y extensión cervical cuando la contracción es bilateral. Como se aprecia en la imagen, su origen se encuentra en la apófisis mastoideas del temporal y en su inserción, el

esternocleidomastoideo se divide en dos vientres. Una se inserta en el manubrio esternal y el otro en la clavícula.



Figura 119. Origen e inserción del esternocleidomastoideo. Fuente: [47].

El **esternohioideo**, también llamado músculo esternocleidohioideo pertenece al grupo de los infrahioideos. Es una banda de músculos plana y pareada que sirve para deprimir y fijar el hueso hioides en la deglución. En la imagen se observa la inserción del músculo en el borde inferior del hueso hioides y su origen en la superficie posterior del manubrio esternal (tipo de unión que se forma entre dos partes del esternón, con el objetivo de crear una estructura firme que soporte los impactos que contactan contra el tórax, tiene funciones relacionadas con la seguridad del corazón, pulmones y la aorta).

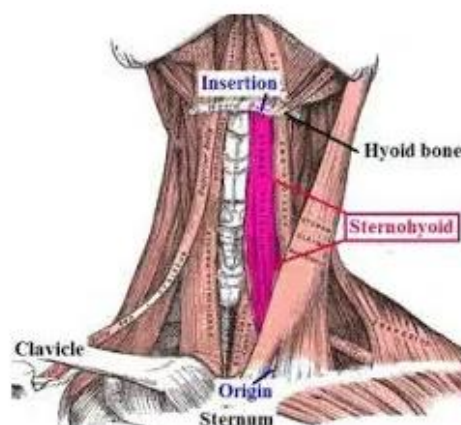


Figura 120. Origen e inserción del músculo esternohioideo. Fuente: [48].

En el modelo 3D del **movimiento de extensión**, el esternohioideo será el músculo flexor, es decir el músculo agonista y el antagonista será el recto posterior mayor, no trabajando el esternocleidomastoideo ni el oblicuo menor. Estos últimos quedan representados en el modelo, pero tanto en flexión como en extensión, se encuentran en estado de reposo.

En la imagen se aprecia el modelo 3D con la representación con flechas de las cargas que intervienen en el movimiento, en color azul el recto posterior mayor, músculo agonista encargado de producir el momento necesario para provocar la extensión del raquis cervical. En color rojo el esternohioideo, músculo antagonista, encargado de garantizar el retorno de la cabeza a la posición de equilibrio. Por último, en color verde el peso propio de la cabeza. También quedan representadas en un color grisáceo las vértebras cervicales y su desplazamiento relativo para poder realizar el movimiento.

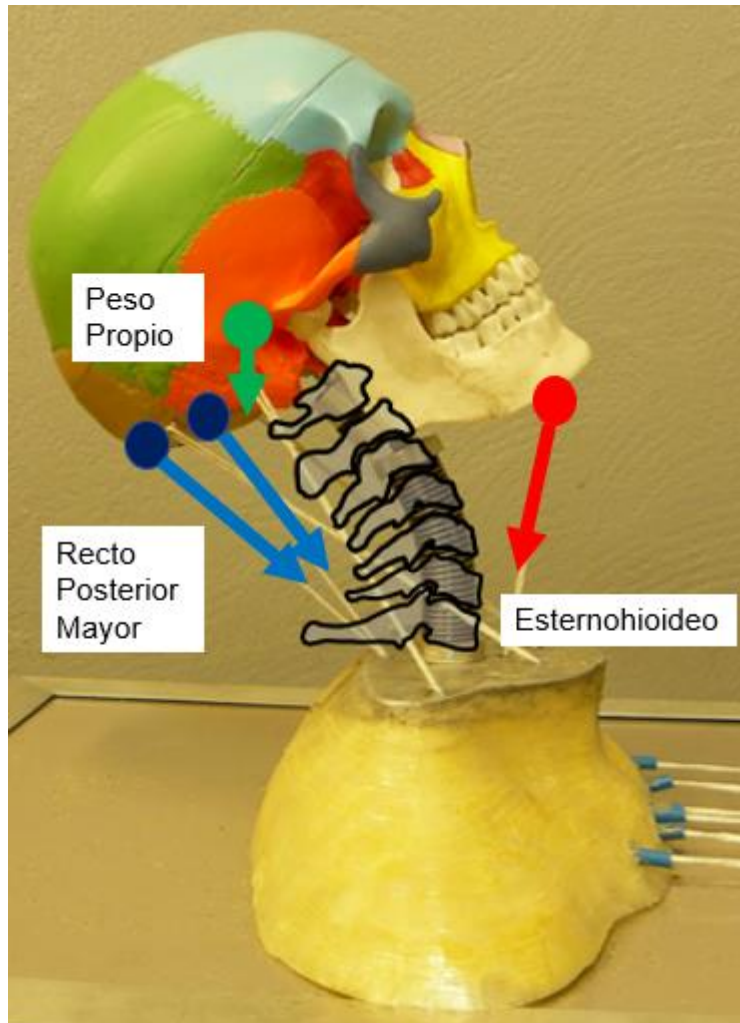


Figura 121. Modelo 3D del movimiento de extensión del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se va a relatar el **movimiento de flexión**, donde la mecánica utilizada para la elaboración del modelo 3D es la misma que para la extensión, pero cambiando la función de los músculos agonista y antagonista. En este caso como se aprecia en la imagen del modelo 3D adjunto, el músculo agonista encargado de producir con su carga al contraerse un movimiento que genere la flexión de la cabeza hacia delante es el esternohioideo. El músculo antagonista representado en color rojo será el recto posterior mayor, y estos producirán un momento que será necesario para garantizar la vuelta al punto de equilibrio de la cabeza. En verde queda representado el peso propio

de la cabeza, cuyo momento también habrá de ser compensado con el momento producido por los músculos antagonistas.

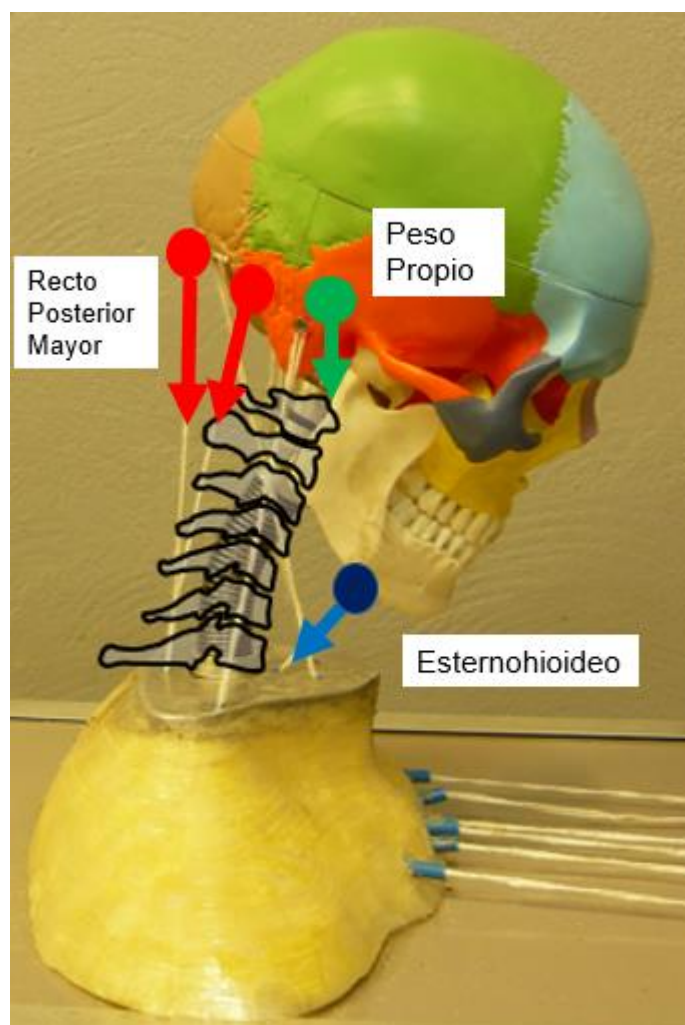


Figura 122. Modelo 3D del movimiento de flexión del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.

### Movimientos de inclinación-rotación

Para desarrollar el complejo modelo que represente el movimiento de inclinación-rotación se comenzará con el desarrollo de la fisiología del raquis cervical inferior, para continuar con los músculos que intervienen y terminar con la explicación del modelo 3D.

Los movimientos de inclinación y de rotación en el raquis cervical inferior están determinados por la orientación de las carillas de las apófisis por articulares, no permitiendo un movimiento de rotación pura ni tampoco de inclinación pura.

Se va a desarrollar esta idea considerando una vértebra de la situación media, como por ejemplo la quinta cervical (C5). Esta vértebra queda representada en la siguiente



figura y se observan sus carillas articulares superiores planas, incluidas en el plano P que es oblicuo hacia abajo y hacia atrás.

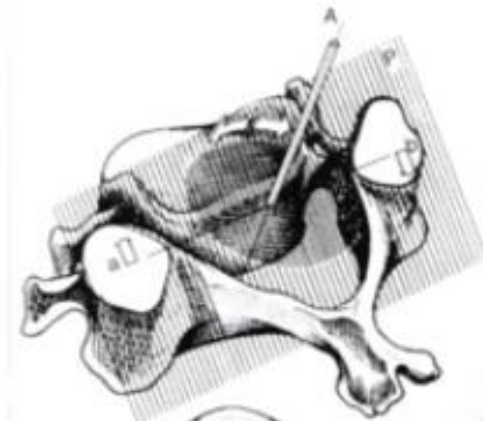


Figura 123. Quinta vértebra cervical (C5), con representación de las carillas articulares en el plano P. [13]

Teniendo en cuenta lo explicado en el párrafo anterior, todo deslizamiento de la cuarta cervical que la sobrepasa sólo va a poder ser de dos tipos:

- *Deslizamiento global hacia arriba* (de ambas carillas articulares) produciendo una **flexión** o *deslizamiento global hacia abajo*, en el caso de la **extensión**.
- *Deslizamiento desigual*, una de las carillas inferiores de la cuarta vértebra (C4), por ejemplo, la carilla izquierda, se eleva hacia arriba y hacia delante con el sentido de la flecha a (figura 66). Por otro lado, la carilla derecha, desciende hacia abajo y hacia atrás, representado por la flecha b. Con este movimiento de las carillas, se está produciendo una rotación entorno al eje A (oblicuo), que es perpendicular al plano P. Este eje está situado en el plano sagital y por tanto en la mediatriz de la línea que une las carillas articulares de la quinta vértebra cervical (C5). A la vez que se produce este movimiento de rotación, se produce un movimiento de inclinación hacia la derecha. Se trata por tanto de un **movimiento mixto de rotación-inclinación**.

En la siguiente figura, se hace una radiografía de perfil del raquis cervical, donde se traza la dirección del plano de las carillas articulares. Todos los planos, a, b, c, d, e, f son oblicuos respecto de la vertical, pero además esta oblicuidad es creciente de abajo a arriba. Como se aprecia en la imagen, la interlínea entre la C7 y la D1 (plano que corta las carillas articulares superiores de C7), tiene un ángulo de  $10^\circ$  con respecto de la horizontal. Mientras que la interlínea C2-C3 (plano que corta las carillas articulares superiores de C3), tiene un grado con respecto de la horizontal de  $40^\circ$  a  $45^\circ$ . Por tanto, existe una diferencia de entre  $30^\circ$  y  $35^\circ$  entre la interlínea inferior f y la superior a.

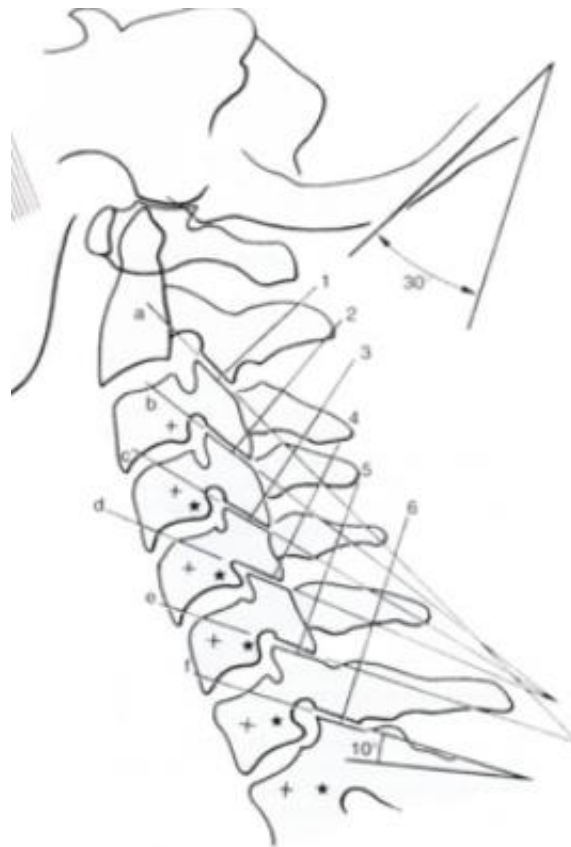


Figura 124. Radiografía de perfil de las vértebras cervicales incluyendo los planos que cortan las carillas articulares. [13]

En consecuencia, a todo lo explicado anteriormente, si se traza una mediatriz en cada carilla articular. Está representa la proyección en el plano sagital del eje de rotación mixta. La oblicuidad de estos ejes, 1, 2, 3, 4, 5 y 6, que están representados en la figura 67, también es creciente de abajo arriba. El eje 6, el inferior de todos es casi vertical, lo que implica una rotación casi pura, mientras que el más elevado, el 1, está inclinado de 40 a 45° sobre la vertical, lo que implica una igualdad entre la inclinación y la rotación.

Hasta ahora se han considerado los movimientos de rotación-inclinación de los ejes individualmente, pero si se considera el raquis inferior en su totalidad, desde C2 hasta D1, a los movimientos de rotación-inclinación, se le añade el de flexión. Esta flexión se acentuará de abajo a arriba. Se adjunta una imagen con los movimientos que se desarrollan. El movimiento tiene los siguientes componentes:

- En el plano frontal (F), inclinación.
- En el plano sagital (S), extensión.
- En el plano transversal u horizontal (H), el componente de rotación.



Figura 125. Movimientos de inclinación-rotación y flexión en el raquis cervical inferior. [13]

Para poder ejemplificar todo lo explicado en los anteriores párrafos, va a ser necesaria una sinergia entre grupos musculares. Lo primero que tiene que producirse para dar lugar a la inclinación-rotación es la rectificación del raquis cervical, y esto se producirá por la contracción del recto posterior mayor. Una vez producida la rigidez necesaria, la contracción unilateral del esternocleidomastoideo producirá la carga necesaria para comenzar la inclinación de la cabeza acompañada de la rotación explicada anteriormente.

En la secuencia de imágenes adjunta queda representado el **modelo 3D** con los músculos mencionados. En color morado queda representado el recto posterior mayor, encargado de la rectificación del raquis cervical. En color azul, el esternocleidomastoideo derecho que actúa como músculo agonista puesto que produce una inclinación hacia la derecha de la cabeza y una rotación en el sentido contrario, el izquierdo. En color rojo se aprecia el esternocleidomastoideo izquierdo, que actuará como músculo antagonista y será encargado de garantizar la vuelta al punto de equilibrio de la cabeza.

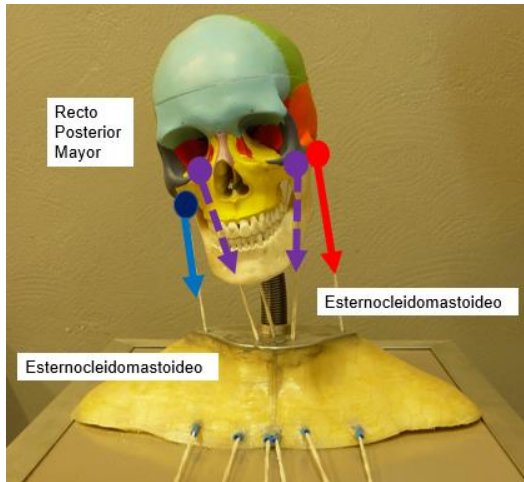


Figura 127. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 1. Fuente: Elaboración propia.

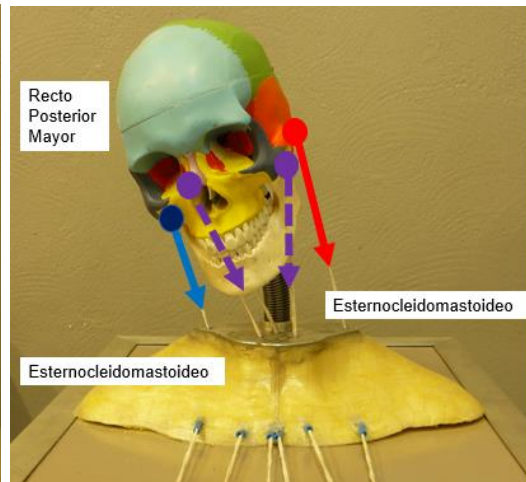


Figura 126. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 2. Fuente: Elaboración propia.

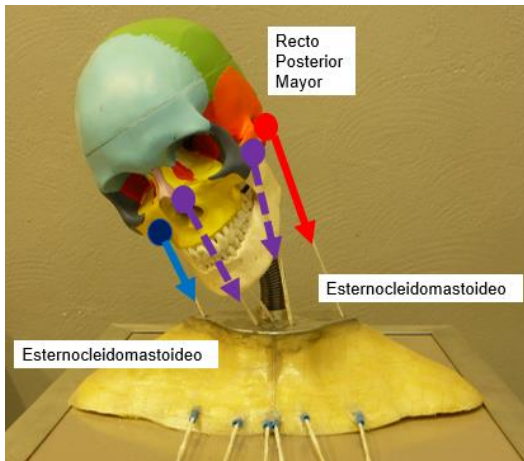


Figura 129. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 3. Fuente: Elaboración propia.

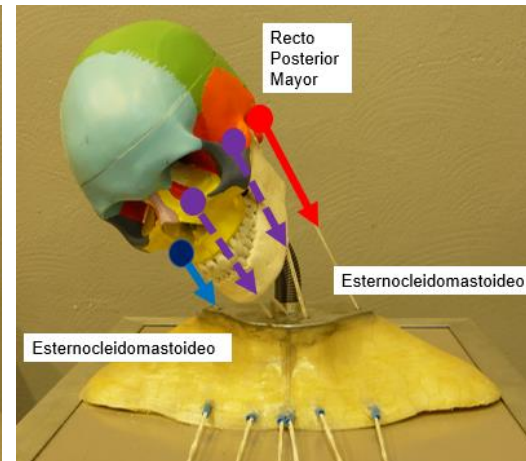


Figura 128. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 4. Fuente: Elaboración propia.

En esta secuencia de imágenes se aprecia la evolución de la dirección de las cargas aportadas por cada músculo a medida que la inclinación-rotación derecha se desarrolla.

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como **conclusiones** se van a destacar los siguientes puntos:

- ❖ Se ha diseñado y puesto a punto un modelo físico biomecánico de cráneo y raquis cervical apto para estudio de movimientos y fuerzas musculares.
- ❖ Se ha utilizado un cráneo sintético comercial adaptándole elementos y útiles para reproducir la cinemática del raquis.
- ❖ Se han realizado estudios cuantitativos de fuerzas y reacciones articulares en casos isostáticos de equilibrio del peso del cráneo.
- ❖ Se ha hecho un análisis cualitativo de movimientos complejos del raquis superior e inferior.

En este proyecto se ha diseñado un preciso modelo físico biomecánico de cráneo y raquis cervical apto para el estudio de movimientos fuerzas musculares. Este modelo, con fines educativos forma parte de una línea de trabajo sobre biomecánica que el laboratorio mantiene desde hace años con el servicio de traumatología del Hospital Clínico San Carlos de Madrid.

El proyecto trata de cubrir una parte del modelado médico no tratada hasta hora debido a la limitación de los modelos actuales. Por tanto, se ha desarrollado un modelo novedoso que permite realizar todo tipo de movimientos producidos a lo largo del raquis cervical (rotación, inclinación, flexión y extensión) identificando que grupo muscular trabaja, los esfuerzos en los puntos de articulación y la relación entre los músculos agonistas y antagonistas.

El funcionamiento del modelo es el siguiente; se selecciona el movimiento que se quiere realizar y para ello se eligen los músculos que van a producir los esfuerzos y momentos necesarios para ello. Una vez identificada la inserción de estos músculos en el cráneo, se establecen los hilos que van a representarlos y se aplica una fuerza de tracción que varía en función del movimiento que se desea realizar. Esta fuerza representará la carga aportada por estos músculos cuando estos se contraen para la realización del movimiento.

Una vez elaborado el modelo físico biomecánico, se han diseñado una serie de ensayos para verificar la valía de este. Estos ensayos han sido evaluados mediante equilibrios estáticos para comprender la relación entre los músculos que trabajaban en cada movimiento y comprender de forma mecánica el funcionamiento del raquis cervical. En los ensayos en los que solo intervenía un grupo muscular se han podido obtener resultados cuantitativos puesto que el problema era isostático y se han podido analizar las variaciones de las cargas a lo largo de distintas posiciones. Sin embargo, en los ensayos en los que intervenían más de un grupo muscular, no se han podido obtener conclusiones cuantitativas puesto que una vez planteado el equilibrio isostático se llegaba a un problema hiperestático donde había más incógnitas que ecuaciones y resultando por tanto un problema sin solución única.

En cuanto a **líneas futuras** se van a destacar diferentes aplicaciones y mejoras realizables al modelo.

Una primera aplicación para la que podría utilizarse este modelo es en futuras operaciones en las que el doctor necesite saber que músculo debe de contraer y que

magnitud debe de tener esta contracción para mover la cabeza en una dirección determinada cuando el paciente este sedado.

Otra aplicación podría ser la enseñanza a médicos, puesto que este modelo es una fusión de medicina con ingeniería y de esta forma, los médicos podrían comprender el funcionamiento mecánico del cuello y las relaciones que se establecen entre cargas y momentos que son necesarias para el equilibrio estático de la cabeza en cada posición.

A parte de para la enseñanza, se podría aplicar para la investigación trasladando este concepto a modelos de cráneo con deformaciones o con efectos de operaciones de traumatología. Lo destacable, es que el fundamento del modelo realizado se puede aplicar para otros campos.

A nivel tecnológico, se podría instrumentar el modelo con células de cargas para medir la fuerza en cada hilo. La célula de carga iría situada tras la inserción del músculo en el cráneo evitando así el rozamiento producido en los conductos. Se podría aplicar también extensiométrica eléctrica si se quisieran medir deformaciones en zonas puntuales del cráneo.

## CAPÍTULO 5: PRESUPUESTOS Y PLANIFICACIÓN TEMPORAL

### 5.1 Presupuestos

Se procede en este apartado a la estimación y evaluación de un presupuesto asociado a este proyecto. Se van a dividir los costes totales del proyecto en las siguientes categorías:

- **Costes directos:** costes asociados de manera directa al proyecto, se divide en:
  - ❖ **Coste del personal del proyecto:** este proyecto lo conforman el alumno, el tutor asociado y el técnico de taller cualificado. Para poder elaborar el presupuesto necesario debido al coste del personal, los datos se obtienen del Boletín Oficial del Estado (BOE) número 251 (anexo [1]) donde se recogen los salarios anuales del 2020 para la profesión de ingeniería. Para licenciados y titulados de 2º y 3º ciclo universitario (máster, doctor) el salario anual es de 26.323,57€; para diplomados y titulados de 1º ciclo universitario (graduado) el salario anual es de 20.424,25€ y para delineante-proyectista, jefe de 2º y programador de máquinas auxiliares es de 18.328.73€. Según el artículo 22 del BOE 251 (anexo [2]), la jornada máxima de trabajo efectivo anual es de 1792 horas. Por tanto, el coste unitario por horas es de 14,68€/h para licenciados, de 11,39€/h para diplomados y de 10,22€/h para delineantes.
  - ❖ **Coste de amortización de equipos:** en este apartado se detallará el coste ligado a la amortización del material utilizado a lo largo del proyecto. Se han incluido aquellos elementos que han requerido de una gran inversión para su adquisición y los cuales habrá que amortizar para su posterior reemplazo al finalizar su vida útil.
  - ❖ **Coste de adquisición de material:** se incluye en este apartado
- **Costes indirectos:** se incluye aquí los costes relacionados con el transporte al laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad politécnica de Madrid, ya sea combustible o abono del transporte público. También se añaden los costes del consumo de electricidad en el laboratorio. Dado que la electricidad es conjunta a todo el complejo universitario, se desprecian estos costes con respecto al presupuesto total del proyecto.

En la siguiente tabla se adjunta el del material amortizado a lo largo del proyecto:

| Coste de amortización de equipos            |                    |                  |                     |                       |                 |
|---|--------------------|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| Concepto                                    | Coste unitario (€) | Vida útil (años) | Utilización (meses) | Amortización (€/años) | Coste final (€) |
| Ordenador                                   | 860                | 5                | 6                   | 172                   | 86              |
| Microsoft Office 365                        | 84                 | 1                | 6                   | 84                    | 42              |
| Cráneo clásico didáctico (3B SMART ANATOMY) | 310                | 10               | 6                   | 31,00                 | 15,50           |
| Cámara fotográfica                          | 535                | 5                | 6                   | 107,00                | 53,50           |
| Total                                       |                    |                  |                     |                       | 197             |

Tabla 4. Coste de amortización de equipos. Fuente: Elaboración propia.

Se adjunta la tabla con el coste del personal, el coste de amortización de los equipos y el coste de adquisición del material para obtener el presupuesto final del proyecto:

| Costes totales del proyecto       |  |        |          |                         |           |
|-----------------------------------|--|--------|----------|-------------------------|-----------|
| Categoría                         | Concepto   | Uds    | Cantidad | Coste unitario (€/uds.) | Coste (€) |
| Costes del personal               | Tiempo del alumno                                      | horas  | 360      | 11,39                   | 4100,40   |
|                                   | Tiempo del tutor                                       | horas  | 70       | 14,68                   | 1027,60   |
|                                   | Tiempo de operario del taller                          | horas  | 30       | 10,22                   | 306,60    |
| Costes de amortización de equipos | Ordenador  | unidad | 1        | 86                      | 86        |
|                                   | Modelo cráneo clásico                                  | unidad | 1        | 15,5                    | 15,5      |
|                                   | Licencia Microsoft Office 365                          | unidad | 1        | 42                      | 42        |
|                                   | Cámara fotográfica                                     | unidad | 1        | 53,5                    | 53,5      |
| Coste de material                 | Bobina de hilo PP trenzado                             | unidad | 1        | 3,55                    | 3,55      |
|                                   | Resina de poliuretano blanco                           | unidad | 1        | 25,56                   | 25,56     |
|                                   | Varilla metálica RS PRO                                | unidad | 1        | 26,44                   | 26,44     |
|                                   | Anillos de aluminio                                    | unidad | 4        | 11,29                   | 45,16     |
|                                   | Junta de caucho  | unidad | 1        | 4,79                    | 4,79      |
|                                   | Muelle de acero  | unidad | 1        | 25,3                    | 25,3      |
|                                   | Barra de plástico                                      | unidad | 6        | 1,2                     | 7,2       |
|                                   | Placa de aluminio                                      | unidad | 1        | 53,23                   | 53,23     |
|                                   | Plancha de conglomerado                                | unidad | 1        | 1,5                     | 1,5       |
|                                   | Marco de aluminio                                      | unidad | 1        | 34                      | 34        |
|                                   | Fleje de   | unidad | 1        | 7                       | 7         |
|                                   | M10 tornillos hexagonales de acero de alta resistencia | unidad | 3        | 0,6                     | 1,8       |
|                                   | Espárrago acero inoxidable                             | unidad | 2        | 20,59                   | 41,18     |
|                                   | Tuerca hexagonal de acero inoxidable                   | unidad | 4        | 0,88                    | 3,52      |
|                                   | Pieza impresión 3D (PLA)                               | unidad |          | 17,75                   | 17,75     |
|                                   | Trípode fotográfico                                    | unidad | 1        | 40                      | 40        |
| Tornillos de estrella             | unidad   | 11     | 0,13     | 1,43                    |           |
| Total                             |  |        |          |                         | 5971,01   |

Tabla 5. Presupuesto final del proyecto. Fuente: Elaboración propia.



## **5.2 Planificación**

El proyecto se realizó entre los meses de julio y diciembre del año 2020.

Se adjunta una tabla dividida en tres fases en las que se ha dividido el proyecto. Cada fase tiene unas tareas asignadas y en cada tarea se ha adjuntado la fecha de comienzo y fin, así como la duración. Para la posterior elaboración del diagrama de Gantt se ha asignado a cada tarea una letra, en el recuadro de actividad.

|                                      | Tarea  | Comienzo   |          | Final      |          | Día de inicio | Día final | Duración | A ct. |
|--------------------------------------|--|------------|----------|------------|----------|---------------|-----------|----------|-------|
| <b>Fase 1: Introducción teórica.</b> | Investigación y estudio acerca de la anatomía del sistema musculoesquelético                                     | 14/07/2020 | 14/07/20 | 29/07/2020 | 29/07/20 | 0             | 15        | 15       | A     |
|                                      | Estudio de la fisiología del raquis cervical.  | 29/07/2020 | 29/07/20 | 15/08/2020 | 15/08/20 | 15            | 32        | 17       | B     |
|                                      | Desarrollo escrito del capítulo 2 en base a la fisiología y anatomía del raquis cervical.                        | 23/07/2020 | 23/07/20 | 22/08/2020 | 22/08/20 | 9             | 39        | 30       | C     |
|                                      | Investigación acerca de modelos biomecánicos previos y desarrollo escrito.                                       | 22/08/2020 | 22/08/20 | 02/09/2020 | 02/09/20 | 39            | 50        | 11       | D     |
| <b>Fase 2: Parte práctica</b>        | Elaboración de la metodología seguida a seguir en los ensayos aplicando los conocimientos teóricos de la fase 1. | 02/09/2020 | 02/09/20 | 07/11/2020 | 07/11/20 | 50            | 116       | 66       | E     |
|                                      | Fabricación del modelo biomecánico del cráneo y raquis cervical a emplear en los ensayos.                        | 04/09/2020 | 04/09/20 | 13/11/2020 | 13/11/20 | 52            | 122       | 70       | F     |
|                                      | Realización de ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales.   | 15/09/2020 | 15/09/20 | 17/11/2020 | 17/11/20 | 63            | 126       | 63       | G     |
|                                      | Desarrollo escrito del capítulo 3 en base a los ensayos realizados y al modelo empleado.                         | 09/09/2020 | 09/09/20 | 24/11/2020 | 24/11/20 | 57            | 133       | 76       | H     |
| <b>Fase 3: Elementos formales.</b>   | Desarrollo escrito del capítulo 1, 4 y 5.  | 24/11/2020 | 24/11/20 | 09/12/2020 | 09/12/20 | 133           | 148       | 15       | I     |
|                                      | Corrección y revisión del proyecto.  | 09/12/2020 | 09/12/20 | 22/12/2020 | 22/12/20 | 148           | 161       | 13       | J     |

Tabla 6. Planificación temporal. Fuente: Elaboración propia.

En base a las actividades de la tabla anterior, se ha elaborado un diagrama de Gantt.

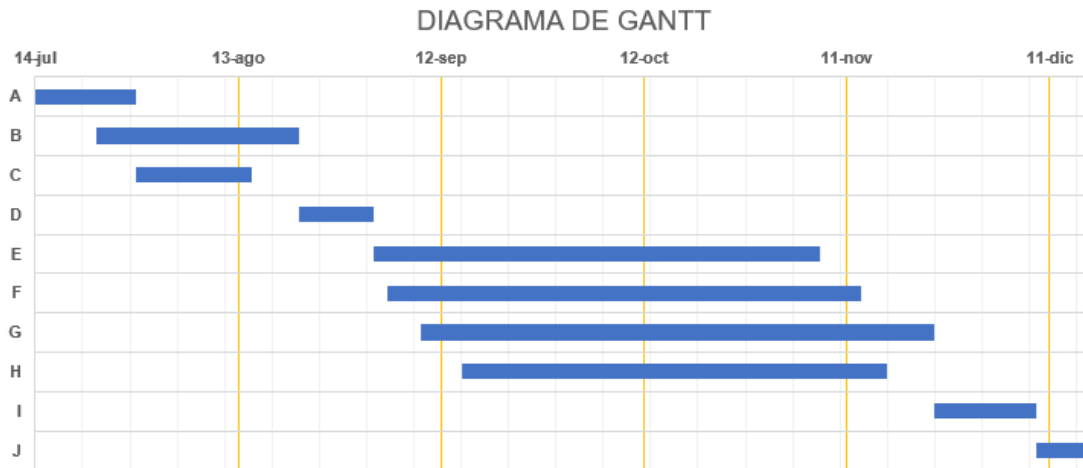


Tabla 7. Diagrama de Gantt. Fuente: Elaboración propia.

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Planos anatómicos [1] .....</i>  | <i>9</i>  |
| <i>Figura 2. Vértebra cervical tipo. [2].....</i>   | <i>11</i> |
| <i>Figura 3. Primera vértebra cervical, atlas [3].....</i>  | <i>12</i> |
| <i>Figura 4. Comparación entre atlas (C1) y axis (C2). [5] .....</i>  | <i>13</i> |
| <i>Figura 5. Comparación entre atlas y axis. [4].....</i>   | <i>13</i> |
| <i>Figura 6. Vértebra torácica. [12] .....</i>  | <i>13</i> |
| <i>Figura 7. Vértebra lumbar. [12].....</i>   | <i>13</i> |
| <i>Figura 8. Hueso occipital de la cabeza. [6] .....</i>  | <i>14</i> |
| <i>Figura 9. Articulación sinovial. [12] .....</i>  | <i>14</i> |
| <i>Figura 10. Articulación sólida. [12].....</i>  | <i>15</i> |
| <i>Figura 11. Sínfisis entre cuerpos vertebrales, se aprecia el cuerpo y el disco intervertebral. [12].....</i>   | <i>15</i> |
| <i>Figura 12. Ligamento nuchal con origen en la protuberancia externa del occipital. [7] 16</i>   |           |
| <i>Figura 13. Triángulo anterior del cuello, donde se aprecia el esternocleidomastoideo, la mandíbula y la línea media del cuello. [8] .....</i>  | <i>17</i> |
| <i>Figura 14. Hueso hioides. [9].....</i>   | <i>17</i> |
| <i>Figura 15. Triángulo posterior del cuello. [10].....</i>   | <i>18</i> |
| <i>Figura 16. Esplenio de la cabeza y esplenico del cuello en la parte posterior del cuello. [11].....</i>  | <i>19</i> |
| <i>Figura 17. Cráneo junto con vértebras cervicales divididas en raquis cervical inferior y superior. [13] .....</i>  | <i>21</i> |
| <i>Figura 18. Movimiento relativo de flexión entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13] .....</i>   | <i>22</i> |
| <i>Figura 19. Movimiento relativo de extensión entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13] ..</i>  | <i>23</i> |
| <i>Figura 20. Movimiento relativo de rotación entre el atlas (C1) y el axis (C2). [13].....</i>   | <i>24</i> |
| <i>Figura 21. Inclinación lateral producida por el movimiento relativo del atlas (C1) y el axis (C2). [13].....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Figura 22. Flexión del hueso occipital sobre el atlas (C1). [13].....</i>  | <i>26</i> |
| <i>Figura 23. Extensión del hueso occipital sobre el atlas (C1). [13].....</i>  | <i>27</i> |
| <i>Figura 24. Posición neutral de las vértebras cervicales. [13] .....</i>  | <i>27</i> |
| <i>Figura 25. En la parte de la derecha, se representa el movimiento relativo de extensión entre las vértebras cervicales. A la izquierda se observa el desplazamiento del núcleo pulposo hacia la parte anterior debido a la extensión. [13] .....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 26. Desplazamiento del núcleo pulposo hacia la parte posterior debido al movimiento de flexión. [13].....</i>   | <i>29</i> |

*Figura 27. En la parte de la izquierda se representan dos vértebras cervicales en la posición de equilibrio. En la derecha se reproduce un movimiento de inclinación hacia el lado izquierdo con un desplazamiento del núcleo pulposo hacia la derecha. [13]. 30*

*Figura 28. Representación del largo del cuello con la abreviatura de lc. [13]..... 31*

*Figura 29. Representación del raquis cervical y del cráneo donde se aprecian el recto lateral (rl), el largo del cuello (lc), el recto anterior (ra) y el recto anterior mayor (ram). [13]..... 33*

*Figura 30. Representación del recto lateral (rl), el largo del cuello (lc), el recto anterior (ra) y el recto anterior mayor (ram), escaleno anterior (ea), escaleno medio (em) y escaleno posterior (ep). [13]..... 34*

*Figura 31. Músculos de la nuca. [13]..... 36*

*Figura 32. Parte posterior de la cabeza y del cuello con representación del sacrolumbar (11), del complejo mayor (7) y del complejo menor (8). [13]..... 38*

*Figura 33. Parte posterior del cuello con representación del esplenio de la cabeza (9), esplenio del cuello (10) y angular del omóplato (12). [13]..... 39*

*Figura 34. Esternocleidomastoideo (ECOM) y trapecio (Tr). [13]..... 40*

*Figura 35. Músculos suboccipitales. [13]..... 41*

*Figura 36. Movimiento de inclinación, por acción del oblicuo mayor. [13]..... 42*

*Figura 37. Parte posterior del cráneo y tres primeras vértebras cervicales, con representación del recto posterior mayor (1), oblicuo posterior menor (2), oblicuo mayor (3), oblicuo menor (4). [13]..... 43*

*Figura 38. Flexión provocada por la contracción simultánea y bilateral de los Músculos posteriores suboccipitales. [13]..... 44*

*Figura 39. Movimiento de rotación por acción de la articulación atloidoaxoidea. [13]45*

*Figura 40. Movimiento de rotación por acción de la articulación occipitoatloidea. [13]..... 45*

*Figura 41. Perfil del cráneo y del cuello con representación del plano masticador (PM), centro de gravedad (G), punto de apoyo (O), plano auricunasal (AN). [13]..... 46*

*Figura 42. Modelo de atlas y axis (3B SCIENTIFIC) (Precio: 85€). [40]..... 47*

*Figura 43. Modelo de columna cervical (3B SCIENTIFIC) (Precio: 110€). [40]..... 48*

*Figura 44. Modelo de vértebras cervicales C5-C6 (SOWBONES) (Precio: 37€). [41]48*

*Figura 45. Modelo del raquis cervical, terminaciones nerviosas, cerebelo y músculos (SOWBONES) (Precio: 153€). [41]..... 49*

*Figura 46. Modelo de cráneo clásico rígido (3B SCIENTIFIC) (Precio: 310€). [40] ... 49*

*Figura 47. Simulación de las tensiones producidas por los músculos de la mandíbula mediante dinamómetros aplicados a cadenas de ortodoncia. Fuente: Margarita Pérez Martín. .... 50*

*Figura 48. Montaje para el estudio de las deformaciones de la mandíbula mediante la técnica de extensimetría eléctrica. Vista frontal. Fuente: Margarita Pérez Martín. .. 51*

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figura 49. Montaje para el estudio de las deformaciones de la mandíbula mediante la técnica de extensimetría eléctrica. Vista lateral. Fuente: Margarita Pérez Martín. ..</i>                    | <i>51</i> |
| <i>Figura 50. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista angular. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Figura 51. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista anterior. Fuente: Elaboración propia. ....</i>   | <i>52</i> |
| <i>Figura 52. Modelo del raquis cervical en OpenSim. Vista posterior. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Figura 53. Modelo biomecánico del cráneo separado en base y bóveda. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Figura 54. Modelo biomecánico del cráneo. Fuente: Elaboración propia. ....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Figura 55. Soporte del modelo. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>54</i> |
| <i>Figura 56. Anillo superior ubicado en la base del cráneo. Fuente: Elaboración propia. ....</i>   | <i>55</i> |
| <i>Figura 57. Fleje de la articulación occipitoatloidea ubicado en el agujero magno del cráneo. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>55</i> |
| <i>Figura 58. Anillo inferior y rótula. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>56</i> |
| <i>Figura 59. Anillo inferior y rótula. Vista superior. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>56</i> |
| <i>Figura 60. Rótula, anillo inferior, tornillos y junta de caucho. Vista superior. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>56</i> |
| <i>Figura 61. Rótula, anillo inferior, tornillos y junta de caucho. Imagen de perfil. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>56</i> |
| <i>Figura 62. Parte inferior del cráneo con articulación occipitoatloidea. Fuente. Elaboración propia.....</i>  | <i>57</i> |
| <i>Figura 63. Representación de la articulación occipitoatloidea. Fuente: Elaboración propia. ....</i>  | <i>57</i> |
| <i>Figura 64. Articulación de las vértebras cervicales mediante un muelle. Vista de perfil. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>58</i> |
| <i>Figura 65. Articulación de las vértebras cervicales mediante un muelle. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>58</i> |
| <i>Figura 66. Base del modelo que representa la parte superior del torso. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>59</i> |
| <i>Figura 67. Vista superior del modelo completo. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>59</i> |
| <i>Figura 68. Vista frontal del modelo completo. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>60</i> |
| <i>Figura 69. Numeración de las inserciones musculares. Fuente: Elaboración propia.</i>   | <i>62</i> |
| <i>Figura 70. Posición de equilibrio del raquis cervical con representación del centro de gravedad (CDG), punto de articulación (PA) y músculos agonistas (MA). Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura71. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>64</i> |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 72. Movimiento de flexión con representación de las fuerzas producidas por los músculos agonistas (MA), antagonistas (MAN) y el peso propio de la cabeza. Se representa también el punto de articulación (PA) y el centro de gravedad (CDG). Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>65</i> |
| <i>Figura 73. Movimiento de extensión con representación de las fuerzas producidas por los músculos agonistas (MA), antagonistas (MAN) y el peso propio de la cabeza. Se representa también el punto de articulación (PA) y el centro de gravedad (CDG). Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 74. Movimiento de flexión. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | <i>67</i> |
| <i>Figura 75. Contracción y relajación de bíceps y tríceps. Fuente: [52].....</i>  | <i>68</i> |
| <i>Figura 76. Reacción entre la actina y miosina para la contracción muscular. Fuente: [52].....</i>   | <i>69</i> |
| <i>Figura 77. Contracción isotónica e isométrica del codo. Fuente: [52].....</i>   | <i>69</i> |
| <i>Figura 78. Contracción concéntrica, excéntrica e isométrica del codo. Fuente: [52].</i>   | <i>70</i> |
| <i>Figura 79. Relación Fuerza-Longitud entre músculo agonista y antagonista. Fuente: [52]......</i>  | <i>70</i> |
| <i>Figura 80. Representación del ligamento transverso del atlas. Fuente: [13] y elaboración propia.....</i>  | <i>72</i> |
| <i>Figura 81. Representación de la articulación atloaxoidea. Fuente: [13] y elaboración propia.....</i>  | <i>73</i> |
| <i>Figura 82. Representación del ligamento atloaxoideo anterior. Fuente: [13] y elaboración propia.....</i>  | <i>73</i> |
| <i>Figura 83. Representación del ligamento atloaxoideo posterior. Fuente: [13] y elaboración propia.....</i>   | <i>74</i> |
| <i>Figura 84. Articulación atloodontoidea y atloidoaxoidea. Unión del atlas (C1) con el axis (C2) y fijación mediante el ligamento transverso. [34].....</i>   | <i>75</i> |
| <i>Figura 85. Construcción explosionada de la articulación occipitoatloidea. [33].....</i>   | <i>76</i> |
| <i>Figura 86. Inserción y origen del recto posterior mayor. [34].....</i>  | <i>77</i> |
| <i>Figura 87. Modelo 3D. Posición de equilibrio con representación de las fuerzas ejercidas por el recto posterior mayor (azul) y el peso propio (verde). Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>78</i> |
| <i>Figura 88. Modelo 2D de la posición de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>79</i> |
| <i>Figura 89. Modelo 2D. Posición 1, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>81</i> |
| <i>Figura 90. Modelo 2D. Posición 2, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>82</i> |
| <i>Figura 91. Modelo 2D. Posición 3, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>84</i> |
| <i>Figura 92. Modelo 2D. Posición 4, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | <i>86</i> |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Figura 93. Modelo 2D. Posición 5, comparación de equilibrio. Fuente: Elaboración propia.</i>   | 87  |
| <i>Figura 94. Movimiento relativo de flexión con desplazamiento en la articulación atloaxoidea y atloidooodontoidea. [13].</i>  | 90  |
| <i>Figura 95. Movimiento relativo de extensión con desplazamiento en la articulación atloaxoidea y atloidooodontoidea. [13].</i>  | 90  |
| <i>Figura 96. Movimiento de flexión con acción de las articulaciones occipitoatloidea y atloaxoidea. [13].</i>  | 91  |
| <i>Figura 97. Cráneo (vista posterior e inferior) donde aparece representado en verde el hueso occipital y rodeado en rojo, la concha del occipital y en azul los cóndilos occipitales. [39].</i>   | 91  |
| <i>Figura 98. Movimiento de extensión por acción de las articulaciones occipitoatloidea y atloaxoidea. [13].</i>  | 92  |
| <i>Figura 99. Origen e inserción del músculo omohioideo. [36].</i>  | 93  |
| <i>Figura 100. Modelo 3D del movimiento de flexión con representación de las fuerzas producidas por la contracción del omohioideo (azul), el recto posterior mayor (rojo) y la fuerza ejercida por la gravedad (verde). Fuente: elaboración propia.</i> | 94  |
| <i>Figura 101. Modelo 3D del movimiento de extensión con representación de las fuerzas producidas por la contracción del recto posterior (azul), del omohioideo (rojo) y la fuerza ejercida por la gravedad (verde). Fuente: Elaboración propia.</i>    | 95  |
| <i>Figura 102. Modelo 2D del movimiento de flexión. Fuente: Elaboración propia.</i>   | 96  |
| <i>Figura 103. Modelo 2D del movimiento de extensión. Fuente: Elaboración propia.</i>   | 98  |
| <i>Figura 104. Movimiento de rotación con acción de la articulación occipitoatloidea. [13]</i>  | 100 |
| <i>Figura 105. Origen e inserción del oblicuo menor. [37].</i>  | 100 |
| <i>Figura 106. Origen e inserción del complejo mayor. [38]</i>  | 101 |
| <i>Figura 107. Modelo 3D del movimiento de rotación.</i>  | 102 |
| <i>Figura 108. Modelo 2D del movimiento de rotación. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 103 |
| <i>Figura 109. Posición neutra entre vértebras contiguas. [13]</i>  | 105 |
| <i>Figura 110. Modelo 3D del equilibrio estático del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 105 |
| <i>Figura 111. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre el occipital y C1. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 106 |
| <i>Figura 112. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C1 y C2. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 107 |
| <i>Figura 113. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C2 y C3. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 109 |
| <i>Figura 114. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C3 y C4. Fuente: Elaboración propia.</i>  | 110 |



|   |     |
|---|-----|
| <i>Figura 115. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C4 y C5. Fuente: Elaboración propia.</i>                                    | 112 |
| <i>Figura 116. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C5 y C6. Fuente: Elaboración propia.</i>                                    | 113 |
| <i>Figura 117. Modelo 2D para cálculo de reacciones entre C6 y C7. Fuente: Elaboración propia.</i>                                    | 115 |
| <i>Figura 118. Movimiento de extensión. Deslizamiento de la vértebra suprayacente hacia atrás sobre la vértebra contigua. [13].</i>   | 117 |
| <i>Figura 119. Origen e inserción del esternocleidomastoideo. Fuente: [47].</i>   | 118 |
| <i>Figura 120. Origen e inserción del músculo esternohioideo. Fuente: [48].</i>   | 118 |
| <i>Figura 121. Modelo 3D del movimiento de extensión del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.</i>                    | 119 |
| <i>Figura 122. Modelo 3D del movimiento de flexión del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.</i>                      | 120 |
| <i>Figura 123. Quinta vértebra cervical (C5), con representación de las carillas articulares en el plano P. [13].</i>                 | 121 |
| <i>Figura 124. Radiografía de perfil de las vértebras cervicales incluyendo los planos que cortan las carillas articulares. [13].</i> | 122 |
| <i>Figura 125. Movimientos de inclinación-rotación y flexión en el raquis cervical inferior. [13].</i>                                | 123 |
| <i>Figura 126. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 2. Fuente: Elaboración propia.</i>                          | 124 |
| <i>Figura 127. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 1. Fuente: Elaboración propia.</i>                          | 124 |
| <i>Figura 128. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 4. Fuente: Elaboración propia.</i>                          | 124 |
| <i>Figura 129. Modelo 3D del movimiento de inclinación-rotación. Posición 2. Fuente: Elaboración propia.</i>                          | 124 |
| <i>Figura 130. Artículo 22 del BOE 251. Jornada máxima de trabajo efectivo. Fuente: [51].</i>   | 144 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS Y TABLAS

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| <i>Gráfico 1. Evolución de cargas en la posición de equilibrio del raquis cervical (1). Fuente: Elaboración propia.....</i>      | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <i>Gráfico 2. Parámetros de la posición de equilibrio del raquis cervical. Fuente: Elaboración propia.....</i>                   | 89                                   |
| <i>Gráfico 3. Evolución de cargas en los puntos de articulación en las vértebras cervicales. Fuente: Elaboración propia.....</i> | 116                                  |
| <br>   |                                      |
| <i>Tabla 1. Identificación de los músculos en el cráneo mediante puntos. Fuente: Elaboración propia.....</i>                     | 61                                   |
| <i>Tabla 2. Parámetros del equilibrio estático por actuación del recto posterior mayor. Fuente: Elaboración propia.....</i>      | 88                                   |
| <i>Tabla 3. Resultados del equilibrio del raquis cervical inferior. Fuente: Elaboración propia.....</i>                          | 116                                  |
| <i>Tabla 4. Coste de amortización de equipos. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | 127                                  |
| <i>Tabla 5. Presupuesto final del proyecto. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | 125                                  |
| <i>Tabla 6. Planificación temporal. Fuente: Elaboración propia.....</i>  | 130                                  |
| <i>Tabla 7. Diagrama de Gantt. Fuente: Elaboración propia.....</i>   | 131                                  |
| <i>Tabla 8. Tabla salarial y plus de convenio para el año 2020. Fuente: [51].....</i>  | 144                                  |

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] "3.1.- Los planos anatómicos. | APB01.- La organización del cuerpo humano.", *Ikastaroak.birt.eus*, 2020. [Online]. Available: [https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/EME/APB/APB01/es\\_EME\\_APB01\\_Contenidos/website\\_31\\_los\\_planos\\_anatmicos.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/EME/APB/APB01/es_EME_APB01_Contenidos/website_31_los_planos_anatmicos.html). [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [2] *Anatomiatopografica.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.anatomiatopografica.com/huesos/vertebras-cervicales/>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [3] "Proyecciones Columna Cervical y Generalidades", *Es.slideshare.net*, 2020. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/JerryCorleonedoDuran/proyecciones-columna-cervical-y-generalidades>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [4] M. Keith Bridwell, "Columna vertebral", *SpineUniverse*, 2020. [Online]. Available: <https://www.spineuniverse.com/espanol/anatomia/columna-vertebral>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [5] "Test de seguridad cervical", *eFisioterapia*, 2020. [Online]. Available: <https://www.efisioterapia.net/articulos/test-seguridad-cervical>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [6] Á. Ramos, "ANATOMÍA: Hueso Occipital - Rehabilitación Premium Madrid", *Rehabilitación Premium Madrid*, 2020. [Online]. Available: <https://rehabilitacionpremiummadrid.com/blog/angel-ramos/anatomia-hueso-occipital/>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [7] 2020. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-antioquia/movimiento-y-postura/apuntes/columnavertebral/2658693/view>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [8] *Anatomiatopografica.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.anatomiatopografica.com/areas-anatomicas/triangulo-anterior-del-cuello/>. [Accessed: 16- Sep- 2020].
- [9] *4.bp.blogspot.com*, 2020. [Online]. Available: [http://4.bp.blogspot.com/-SUhcgZIfP1E/U1VK\\_mXdR-I/AAAAAAAAAAg/LLBh4ZYHTyA/s1600/Hyoid+and+Auditory+Ossicles.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-SUhcgZIfP1E/U1VK_mXdR-I/AAAAAAAAAAg/LLBh4ZYHTyA/s1600/Hyoid+and+Auditory+Ossicles.jpg). [Accessed: 17- Sep- 2020].
- [10] Guayaquil, "Triangulo Posterior Y Venas Del Cuello", *Slideshare.net*, 2020. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/andresclementebravoamores/triangulo-posterior-y-venas-del-cuello>. [Accessed: 17- Sep- 2020].
- [11] "Esplenio del cuello y de la cabeza.", *Facebook.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/instagram.natalieifbbelitepro/photos/pcb.3033943343331774/3033938156665626/?type=3&theater>. [Accessed: 17- Sep- 2020].

- [12] R. Drake, W. Vogl and A. Mitchell, *Gray. Anatomía para estudiantes*, 1st ed. ELSEVIER, 2005.
- [13] A. Kapandji, *Fisiología articular*. [Place of publication not identified]: Editorial Medica Panameri, 2010.
- [14] "Oblicuo Menor de la Cabeza", *MÚSCULO A MÚSCULO*, 2020. [Online]. Available: <https://musculoamusculo.wordpress.com/anatomia-muscular/cabeza-y-cuello/oblicuo-menor-de-la-cabeza/>. [Accessed: 06- Oct- 2020].
- [15] "Músculo Semiespinoso Cervical o Complejo Mayor", *Músculos.org: Guía anatómica de los músculos del cuerpo.*, 2020. [Online]. Available: <https://www.musculos.org/musculo-semiespinoso-cervical-o-complejo-mayor.html>. [Accessed: 04- Oct- 2020].
- [16] C. DOLOR et al., "Músculo recto posterior mayor.", *Dolopedia*, 2020. [Online]. Available: [https://dolopedia.com/articulo/musculo-recto-posterior-mayor#.X4RP\\_UBuLIU](https://dolopedia.com/articulo/musculo-recto-posterior-mayor#.X4RP_UBuLIU). [Accessed: 08- Oct- 2020].
- [17] *Anatomiatopografica.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.anatomiatopografica.com/musculos/musculo-omohioideo/>. [Accessed: 02- Oct- 2020].
- [18] "Introducción a la biología del sistema musculoesquelético - Trastornos de los huesos, articulaciones y músculos - Manual MSD versión para público general", *Manual MSD versión para público general*, 2020. [Online]. Available: <https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-de-los-huesos,-articulaciones-y-m%C3%BAsculos/biolog%C3%ADa-del-sistema-musculoesquel%C3%A9tico/introducci%C3%B3n-a-la-biolog%C3%ADa-del-sistema-musculoesquel%C3%A9tico>. [Accessed: 20- Aug- 2020].
- [19] "Diccionario de cáncer del NCI", *Instituto Nacional del Cáncer*, 2020. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/tejido-conjuntivo> <https://concepto.de/tejido-conjuntivo/>. [Accessed: 22- Aug- 2020].
- [20] 2020. [Online]. Available: <https://www.ilerna.es/blog/aprende-con-ilerna-online/sanidad/el-sistema-oseo-funciones-y-clasificacion-de-los-huesos/>  
<http://www.conganat.org/iicongreso/conf/018/intro.htm>  
<https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-de-los-huesos,-articulaciones-y-m%C3%BAsculos/biolog%C3%ADa-del-sistema-musculoesquel%C3%A9tico/huesos>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [21] *Elsevier Connect*, 2020. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/es-es/connect/medicina/anatomia-vertebras-clasificacion-funcion-y-morfologia>. [Accessed: 17- Sep- 2020].
- [22] "Definición de Ligamento", *Definición ABC*, 2020. [Online]. Available: <https://www.definicionabc.com/ciencia/ligamento.php>. [Accessed: 01- Sep- 2020].

- [23] "Definición de Posición anatómica", *Definición ABC*, 2020. [Online]. Available: <https://www.definicionabc.com/ciencia/posicion-anatomica.php>. [Accessed: 18- Aug- 2020].
- [24] "Músculos.org: Guía anatómica de los músculos del cuerpo. - Guía de todos los músculos del cuerpo humano.", *Músculos.org: Guía anatómica de los músculos del cuerpo.*, 2020. [Online]. Available: <https://www.musculos.org/>. [Accessed: 05- Oct- 2020].
- [25] 2020. [Online]. Available: <https://definicion.de/raquis/>. [Accessed: 06- Oct- 2020].
- [26] "Articulación trocoide", *IMAIOS*, 2020. [Online]. Available: <https://www.imaios.com/es/e-Anatomy/Estructuras-anatomicas/Articulacion-trocoide>. [Accessed: 03- Sep- 2020].
- [27] "LIGAMENTOS OCCIPITOATLOIDEOS12 - Capitulo XI", *Med.se-todo.com*, 2020. [Online]. Available: <https://med.se-todo.com/pravo/11615/index.html?page=6>. [Accessed: 28- Aug- 2020].
- [28] Ú. Alcañas, "PLANOS ANATÓMICOS", *Resonancia Magnética, los protocolos y su práctica.*, 2020. [Online]. Available: <http://protocolosresonanciamagnetica.org/2015/01/25/planos-anatomicos/>. [Accessed: 17- Oct- 2020].
- [29] "Hiperlordosis", *Fisioterapia-online.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/hiperlordosis>. [Accessed: 11- Oct- 2020].
- [30] 2020. [Online]. Available: <https://definicion.de/sinergia/>. [Accessed: 17- Oct- 2020].
- [31] "Articulaciones cigapofisarias", *Es.wikipedia.org*, 2020. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Articulaciones\\_cigapofisarias](https://es.wikipedia.org/wiki/Articulaciones_cigapofisarias). [Accessed: 17- Sep- 2020].
- [32] F. Suárez, "Músculo agonista y antagonista | EFTIC Condición Física", *Contenidos.educarex.es*, 2020. [Online]. Available: [http://contenidos.educarex.es/varios/efiticf/modules/scorm/modulo-teorico-1/website\\_msculo\\_agonista\\_y\\_antagonista.html#:~:text=Los%20m%C3%BAsculos%20que%20realizan%20la,e%20movimiento%20son%20los%20antagonistas](http://contenidos.educarex.es/varios/efiticf/modules/scorm/modulo-teorico-1/website_msculo_agonista_y_antagonista.html#:~:text=Los%20m%C3%BAsculos%20que%20realizan%20la,e%20movimiento%20son%20los%20antagonistas). [Accessed: 17- Sep- 2020].
- [33] *Mirandafisioterapia.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.mirandafisioterapia.com/post/2018/01/09/articulaciones-de-la-columna-vertebral>. [Accessed: 18- Oct- 2020].
- [34] A. Atlantoaxoidea, A. Atlantoaxoidea and V. perfil, "Articulación Atlantoaxoidea", *Articulacionatlantoaxoidea.blogspot.com*, 2020. [Online]. Available: <https://articulacionatlantoaxoidea.blogspot.com/>. [Accessed: 18- Oct- 2020].
- [35] "Musculos del cuello Charleny Rosario", *Slideshare.net*, 2020. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/charlenysrosariohernandez/musculos-del-cuello-charleny-rosario>. [Accessed: 18- Oct- 2020].

- [36] 2020. [Online]. Available: <https://www.chegg.com/flashcards/ch-4-part-5-7c198359-dc6b-4246-93bc-d3bb8d0e5e80/deck?referrer=https://www.studyblue.com>. [Accessed: 08- Oct- 2020].
- [37] "Oblicuo Menor de la Cabeza (Musculatura Cabeza y Cuello)", *TAFAD y Cursos*, 2020. [Online]. Available: [http://www.tafadycursos.com/load/musculos/cabeza\\_y\\_cuello/oblicuo\\_menor/187-1-0-1179](http://www.tafadycursos.com/load/musculos/cabeza_y_cuello/oblicuo_menor/187-1-0-1179). [Accessed: 03- Oct- 2020].
- [38] "Músculo Semiespinoso Cervical o Complejo Mayor", *Músculos.org: Guía anatómica de los músculos del cuerpo.*, 2020. [Online]. Available: <https://www.musculos.org/musculo-semiespinoso-cervical-o-complejo-mayor.html>. [Accessed: 07- Oct- 2020].
- [39] 2020. [Online]. Available: <https://www.studyblue.com/notes/note/n/head-neck-anatomy/deck/12080364>. [Accessed: 02- Oct- 2020].
- [40] "Simulación y Entrenamiento de Habilidades Clínicas para la Educación Médica - 3B Scientific", *3bscientific.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.3bscientific.com/cl/index.html>. [Accessed: 21- Oct- 2020].
- [41] 2020. [Online]. Available: <https://www.sawbones.com/>. [Accessed: 21- Oct- 2020].
- [42] "Traumatismo", *Es.wikipedia.org*, 2020. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Traumatismo>. [Accessed: 25- Oct- 2020].
- [43] J. Valdivia, "Ligamentos | Centro Quiropráctica Girona", *Centro Quiropráctica Girona*, 2020. [Online]. Available: <https://www.quiropacticagirona.com/mas/libro-manual-basico-ao/anatomia/ligamentos.html>. [Accessed: 25- Oct- 2020].
- [44] "Ligamento amarillo", *Fisioterapia-online.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/ligamento-amarillo>. [Accessed: 25- Oct- 2020].
- [45] "¿Qué significa la palabra ligamento accesorio? - BioDic", *BioDic*, 2020. [Online]. Available: <https://www.biodic.net/palabra/ligamento-accesorio/>. [Accessed: 25- Oct- 2020].
- [46] 2020. [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/M%C3%BAsculo\\_esternocleidomastoideo](https://www.ecured.cu/M%C3%BAsculo_esternocleidomastoideo). [Accessed: 22- Nov- 2020].
- [47] "Esternocleidomastoideo", *MÚSCULO A MÚSCULO*, 2020. [Online]. Available: <https://musculoamusculo.wordpress.com/anatomia-muscular/cabeza-y-cuello/esternocleidomastoideo/>. [Accessed: 22- Nov- 2020].
- [48] "Músculo esternohioideo (origen, inserción, inervación, acción)", *Anatomía Topográfica*, 2020. [Online]. Available: <https://www.anatomiatopografica.com/musculos/musculo-esternohioideo/>. [Accessed: 22- Nov- 2020].

[49] "Articulación manubrioesternal", *Fisioterapia-online.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/articulacion-manubrioesternal>. [Accessed: 22- Nov- 2020].

[50] "OpenSim - See The Work", *Opensim.stanford.edu*, 2020. [Online]. Available: <https://opensim.stanford.edu/work/index.html>. [Accessed: 24- Nov- 2020].

[51] *Boe.es*, 2020. [Online]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2019/10/18/pdfs/BOE-A-2019-14977.pdf>. [Accessed: 26- Nov- 2020].

[52] "El músculo que no sabía relajarse | Power Explosive", *Power Explosive*, 2020. [Online]. Available: <https://powerexplosive.com/el-musculo-que-no-sabia-relajarse/>. [Accessed: 30- Dec- 2020].

# ANEXOS

[1]

Año 2020

|   | Niveles   | Tabla salarial según art. 33 |           | Plus convenio anual según art. 38 convenio | Total anual |
|---|---|------------------------------|-----------|--|-------------|
|   |   | Mes x 14                     | Anual     |  |             |
| 1 | LICENCIADOS Y TITULADOS 2.º Y 3.º CICLO UNIVERSITARIO Y ANALISTA  | 1.712,42                     | 23.973,88 | 2.349,69                                   | 26.323,57   |
| 2 | DIPLOMADOS Y TITULADOS 1.º CICLO UNIVERSITARIO. JEFE SUPERIOR   | 1.291,04                     | 18.074,56 | 2.349,69                                   | 20.424,25   |
| 3 | TÉCNICO DE CÁLCULO O DISEÑO, JEFE DE 1.ª Y PROGRAMADOR DE ORDENADOR                                       | 1.244,93                     | 17.429,02 | 2.349,69                                   | 19.778,71   |
| 4 | DELINEANTE-PROYECTISTA, JEFE DE 2.ª Y PROGRAMADOR DE MAQ. AUXILIARES                                      | 1.141,36                     | 15.979,04 | 2.349,69                                   | 18.328,73   |
| 5 | DELINEANTE, TÉCNICO DE 1.ª, OFICIAL 1.ª ADMTVO. Y OPERADOR DE ORDENADOR                                   | 1.019,82                     | 14.277,48 | 2.349,69                                   | 16.627,17   |
| 6 | DIBUJANTE, TÉCNICO DE 2.ª, OFICIAL 2.ª ADMTVO., PERFORISTA, GRABADOR Y CONSERJE                           | 878,63                       | 12.300,82 | 2.349,69                                   | 14.650,51   |
| 7 | TELEFONISTA-RECEPCIONISTA, OFICIAL 1.ª OFICIOS VARIOS Y VIGILANTE   | 849,16                       | 11.888,24 | 2.349,69                                   | 14.237,93   |
| 8 | AUXILIAR TÉCNICO, AUX. ADMTVO., TELEFONISTA, ORDENANZA, PERSONAL DE LIMPIEZA Y OFICIAL 2.ª OFICIOS VARIOS | 790,36                       | 11.065,04 | 2.349,69                                   | 13.414,73   |
| 9 | AYUDANTE OFICIOS VARIOS   | 757,29                       | 10.602,06 | 2.349,69                                   | 12.951,75   |

Tabla 8. Tabla salarial y plus de convenio para el año 2020. Fuente: [51]

[2]

## Artículo 22. Jornada laboral.

1. A partir del 1 de enero de 2019 la jornada ordinaria máxima de trabajo efectivo, en cómputo anual, será de mil setecientos noventa y dos (1.792) horas. La distribución semanal de la jornada ordinaria anual podrá pactarse con los representantes de los trabajadores en la empresa, teniendo en cuenta que, en ningún caso, se podrán realizar más de nueve horas ordinarias diarias de trabajo efectivo. De acuerdo con lo establecido en el artículo 37.2 del texto refundido de la Ley del Estatuto de los Trabajadores, ninguna fiesta laboral será recuperable.

2. Las empresas que tengan establecida jornada intensiva durante el verano no podrán rebasar las 36 horas semanales durante el período en que la tengan implantada.

3. En las empresas en que se realice jornada continuada, las condiciones de temporada más beneficiosa se mantendrán tal y como actualmente se realizan en cada empresa.

4. Toda persona trabajadora desplazada a otra empresa u obras por razón de servicio, se atenderá al horario del centro del trabajo de destino, si bien, en cuanto al cómputo de las horas trabajadas durante el tiempo de su desplazamiento, se respetarán las existentes en su empresa de origen.

5. Las jornadas laborales de los días 24 y 31 de diciembre no serán laborables ni recuperables. En el cómputo anual máximo establecido en el anterior apartado 1, ya se ha tenido en cuenta lo pactado en este apartado.

6. En las empresas que no la tengan establecida, podrá pactarse una jornada flexible en las entradas y salidas, respetándose un número de horas de presencia común obligada atendiendo a las necesidades de cada empresa.

Figura 130. Artículo 22 del BOE 251. Jornada máxima de trabajo efectivo. Fuente: [51].