



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE ODONTOLOGÍA**  
**DEPARTAMENTO DE PREGRADO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS**  
**ODONTOLÓGICAS**  
**ÁREA DE ANATOMÍA Y CENTRO DE ANÁLISIS CUANTITATIVO**  
**EN ANTROPOLOGÍA**

**“Estudio mediante análisis de elementos finitos de la diferencia en la respuesta mecánica craneofacial de individuos que difieren en la intensidad y en el tipo de carga masticatoria.”**

**Francisca Vidaurre Latorre**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**  
**REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE**  
**CIRUJANO-DENTISTA**

**TUTORA PRINCIPAL**  
**Prof. Viviana Toro-Ibacache**

**Adscrito a Proyecto FONDECYT 11150175**  
**Santiago – Chile**  
**2018**





**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE ODONTOLOGÍA**  
**DEPARTAMENTO DE PREGRADO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS**  
**ODONTOLÓGICAS**  
**ÁREA DE ANATOMÍA Y CENTRO DE ANÁLISIS CUANTITATIVO**  
**EN ANTROPOLOGÍA**

**“Estudio mediante análisis de elementos finitos de la diferencia en la respuesta mecánica craneofacial de individuos que difieren en la intensidad y en el tipo de carga masticatoria.”**

**Francisca Vidaurre Latorre**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**  
**REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE**  
**CIRUJANO-DENTISTA**

**TUTORA PRINCIPAL**  
**Prof. Viviana Toro-Ibacache**

**Adscrito a Proyecto FONDECYT 11150175**  
**Santiago – Chile**  
**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis papis, Francisca y Sergio, que sin su apoyo incondicional no habría logrado todo lo que me he propuesto. Por acompañarme con tanto amor, guiarme con tanta sabiduría y darme fuerzas de sobra para no rendirme nunca.*

*A mis hermanas, Anita y Colin, que siempre han sido un gran ejemplo para mí.*

*A mis amigos y amigas de la U, que han sido clave estos últimos siete años, aportando muchas risas, alegrías, buenos recuerdos y apoyándome en los buenos y malos momentos.*

*A mi tutora Viviana, que ha sido infinitamente paciente y cariñosa al momento de enseñar y guiar. Gracias por la dedicación y la entrega ¡Por lejos la mejor!*

*A todos los miembros del CA2 y los topes, en especial al profe German y a Andrea, por enseñarme una distinta perspectiva de la odontología, y como esta se puede relacionar a distintas áreas que ni imaginaba. Mención especial a la Cristi, que además de ser de mis grandísimas amigas, gracias a ella fui parte de este proyecto, y a la Trini y Carla que hicieron que este año fuera muchísimo más alegre y con carcajadas a diario.*

## Tabla de contenidos

<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>6</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>9</b>
3.1. DESARROLLO CRANEOFACIAL.....	9
3.2. ANATOMÍA .....	17
3.3. MÚSCULOS DE LA MASTICACIÓN: ANATOMÍA Y FORMA.....	21
3.4. MASTICACIÓN Y ALIMENTOS.....	24
3.5. COMO LA FUNCIÓN MODIFICA LA FORMA: MECANOTRANSDUCCIÓN.....	26
3.6. CUANTIFICANDO LA MICRODEFORMACIÓN ÓSEA: ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS .....	29
<b>4. HIPÓTESIS.....</b>	<b>34</b>
<b>5. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>34</b>
<b>6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>34</b>
<b>7. METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
7.1. MUESTRA .....	35
7.2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTOS DE DATOS.....	38
7.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DEL CRÁNEO .....	39
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
8.1. CARGA EN LOS INCISIVOS CENTRALES SUPERIORES.....	41
8.2. CARGA EN EL PRIMERO MOLAR SUPERIOR IZQUIERDO .....	44
<b>9. DISCUSIÓN .....</b>	<b>46</b>
<b>10. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>53</b>
<b>12. ANEXO.....</b>	<b>58</b>

## 1. RESUMEN

Durante la evolución, el hombre ha sufrido diversos cambios morfológicos que le han permitido adaptarse a su entorno y requerimientos funcionales. Estos cambios se explican por varias razones, y una de las más aceptadas es por el cambio en la estrategia de supervivencia y por ende en el cambio en la consistencia y mecánica de procesamiento de los alimentos. Nuestro objetivo es evaluar el efecto de la intensidad de carga masticatoria y relación maxilomandibular en la respuesta mecánica craneal a la masticación, mediante la utilización de análisis de elementos finitos (AEF). Para poner a prueba esto se utilizó una muestra de cinco individuos, cada uno representando distinta intensidad y tipo de cargas masticatorias, relacionado con su economía de subsistencia y relación maxilomandibular. Dos de estos individuos son muestras arqueológicas (carga masticatoria intensa y moderada) y tres son muestras de poblaciones actuales: carga masticatoria leve y alterada tipos clase II (retrognasia mandibular) y III (prognatismo mandibular). A partir de tomografías computarizadas se construyeron modelos digitales tridimensionales, transformados en mallas de elementos finitos, y mediante mapas de contorno de colores, se analizó y comparó las zonas de mayor y menor microdeformación esquelética ante la carga masticatoria entre los distintos individuos. Los resultados obtenidos fue que la respuesta mecánica fue similar en todos los individuos en términos de distribución de microdeformaciones, pero no en magnitud. Como era de esperar, los individuos de carga masticatoria mayor fueron los que menos sufrieron microdeformaciones, y los de carga masticatoria alterada los que más, siendo el individuo con relación maxilomandibular clase III quien más difiere del resto. Conclusión: Los resultados sugieren que la respuesta mecánica no difiere en gran medida en individuos con distinto patrón de carga masticatoria, a menos que el mismo patrón genere una debilidad estructural, como es el caso del prognatismo mandibular.

Palabras claves: Análisis de elementos finitos, carga masticatoria, microdeformación

## 2. INTRODUCCIÓN

Durante la evolución, el hombre ha sufrido diversos cambios morfológicos que le han permitido adaptarse a su entorno y requerimientos funcionales. Entre estos cambios destaca la disminución en el tamaño de la cara, en sentido anteroposterior y en altura, la forma de las órbitas, la forma de neurocráneo, la flexión de la base de cráneo (Lieberman, 2008), disminución del tamaño de los dientes, especialmente el canino, disminución del tamaño de los músculos masticatorios, inclinación vertical de la cara, entre otros (Lieberman, 2011).

Estos cambios de la forma de la cara son atribuidos a diversos factores tales como mutaciones a nivel genético y cambios en el estilo de vida. Respecto de los cambios de estilo de vida durante la evolución, el ser humano fue modificando el tipo de alimentación. Inicialmente la comida solía ser cruda o poco procesada, requiriendo una gran demanda por parte de los músculos masticatorios para la trituración, a diferencia de hoy, en donde los alimentos son altamente procesados química y mecánicamente, lo que requiere de menos actividad masticatoria.

La reducción del estrés masticatorio sobre dientes, huesos y músculos sería responsable de la disminución del tamaño de los huesos (Lieberman, 2011; Teaford & Ungar, 2000). Esto no solo tiene repercusiones a nivel morfológico, sino que también se vería reflejado a nivel funcional, mediante la aparición de maloclusiones. Estas se consideran como una de las enfermedades de la civilización, encontrándose principalmente en poblaciones actuales urbanas (Corruccini, 1984), y por el contrario muy escasamente en fósiles humanos (Sarig et al., 2013).

El desarrollo y crecimiento de la cabeza es altamente complejo debido a que posee un comportamiento modular. La modularidad es una propiedad de las estructuras complejas en la que puede ser separada en varias partes (o módulos), los cuales están asociados a diferentes funciones, influyendo en el funcionamiento general de la estructura (Mitteroecker & Bookstein, 2008). Estos módulos se integran entre ellos durante el desarrollo del individuo, tanto pre como postnatal, determinado por distintos factores como genética, origen embrionario, ambiente y procesos fisiológicas como la masticación. A su vez, las distintas partes del cráneo

se pueden modificar de manera independiente durante la ontogenia, acomodando órganos y espacios funcionales en su interior permitiendo su evolución diferencial (Lieberman, 2011). Gracias a la integración de estos módulos hay una constante compensación entre las distintas partes de la estructura craneofacial, asegurando la mantención de las funciones vitales y desarrollo de la estructura morfológica (Martínez-Abadías, Paschetta, de Azevedo, Esparza, & González-José, 2009).

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de la intensidad de carga masticatoria y relación maxilomandibular en la respuesta mecánica craneal a la masticación, mediante la utilización de análisis de elementos finitos (AEF). Para esto se utilizará una muestra de cinco individuos, cada uno representando un tipo e intensidad de cargas masticatorias relacionado a su dieta y economía de subsistencia. Dos de estos individuos son muestras arqueológicas (carga masticatoria intensa y moderada) y tres son muestras de poblaciones actuales, las cuales difieren en la relación máxilomandibular (Clase I, II y III esqueletal). Estas muestras no serán manipuladas directamente, si no que a través de tomografías computarizadas (TCs), mediante las cuales se construirán modelos digitales tridimensionales que posteriormente serán segmentadas. Estos modelos segmentados serán transformados en mallas de elementos finitos, y mediante mapas de contorno de colores, se analizará y comparará las zonas de mayor y menor microdeformación esqueletal ante la carga masticatoria entre los distintos individuos.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Desarrollo craneofacial**

El desarrollo de la cabeza y del cuello comienza en las etapas iniciales de la vida embrionaria y continúa hasta el cese del crecimiento posnatal, al final de la adolescencia (Carlson, 2005). El desarrollo, en la etapa prenatal, comienza específicamente en la cuarta y quinta semana, en donde se forman los arcos faríngeos, como pliegues en la zona del cuello del embrión. A partir del plegamiento del embrión trilaminar, se forma el tubo neural por la fusión de las crestas neurales quedando bajo la superficie del ectodermo y la parte anterior del tubo neural se expande para formar el prosencéfalo, mesencéfalo y el romboencéfalo (Sadler, 2011). El romboencéfalo formará una serie de 8 protuberancias: los rombómeros, y las migraciones de las células de la cresta neural provenientes de los dos primeros rombómeros, provee el tejido conjuntivo embrionario necesario para el desarrollo craneofacial (Meruane, Smok, & Rojas, 2012), que en conjunto con el proceso frontonasal (formada a partir del prosencéfalo), darán origen a la mayor parte de las estructuras de la cara.

Los arcos faríngeos están formados por un núcleo central de tejido mesenquimatoso (derivado del mesodermo paraxial y lateral) que se encuentra cubierto por epitelio ectodérmico y revestido internamente por epitelio endodérmico. Adicional a esto, durante la cuarta semana de desarrollo intrauterino, células provenientes de la cresta neural, migran a los arcos asociándose al epitelio mesodérmico para comenzar su diferenciación, específicamente a los componentes esqueléticos de la cara. El mesodermo original de los arcos formará los músculos, de tal manera que cada arco consta de sus propios componentes musculares asociados a su nervio craneal y componente nervioso y arterial (Sadler, 2011).

El desarrollo embrionario de la región maxilofacial, es un proceso complejo que involucra un crecimiento y fusión tridimensional de múltiples procesos (Carlson, 2005; Meruane et al., 2012). A la cuarta semana, en el día 24, el estomodeo se encuentra limitado cranealmente por la prominencia frontal, lateralmente por los procesos maxilares y ventralmente por el proceso mandibular (ambos procesos

derivados del primer arco). Durante la quinta semana, a partir de las placodas olfatorias (dos engrosamientos que se desarrollan en el ectoderma de la prominencia frontal por delante del estomodeo), por una proliferación del mesénquima subyacente, se desplaza la eminencia, formando una cresta en forma de herradura. Lateral a esta herradura se forma el proceso nasal lateral y por medial el proceso nasal medio. El proceso maxilar crece hacia el centro y empuja a los procesos nasales medios hacia la línea media, donde se fusiona con su contraparte, formando la porción del maxilar que posee a los incisivos, paladar primario y parte del labio (Carlson, 2005; Sadler, 2011)(Figura 1).

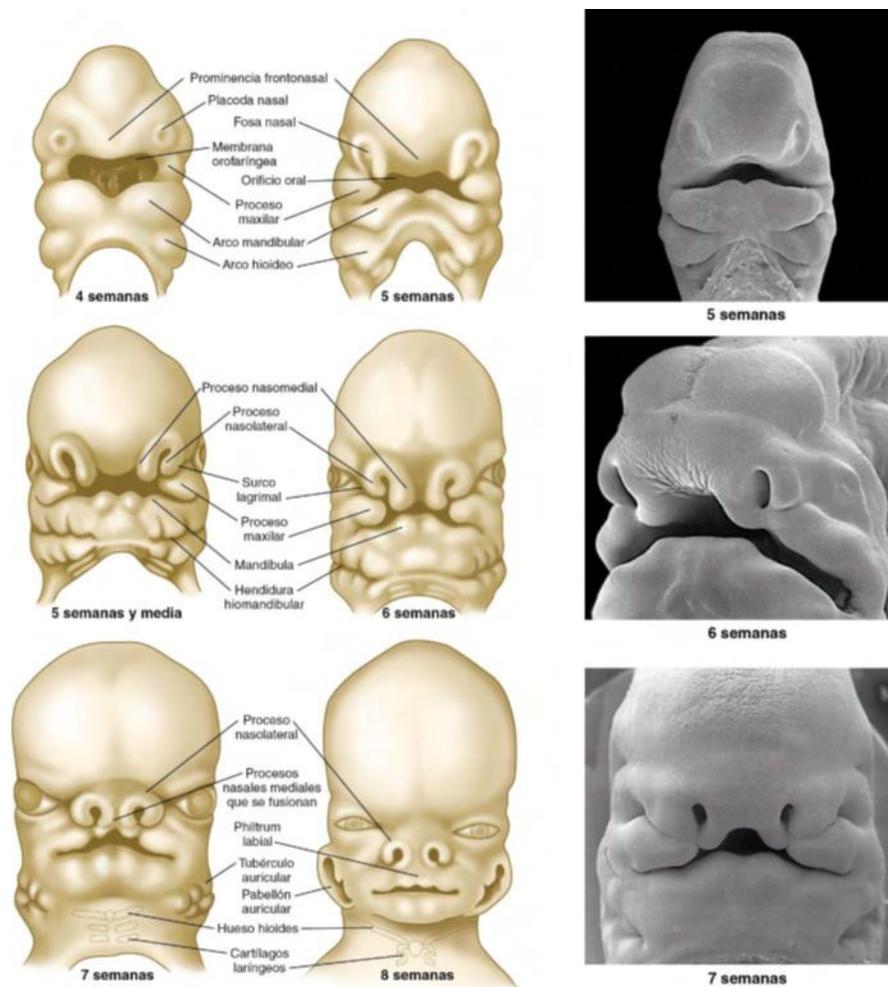


Figura 1: vistas frontales de cabezas de embriones humanos entre la cuarta y octava semana intrauterina (Carlson, 2005).

Durante la sexta semana de vida intrauterina, el embrión posee una cavidad oronasal única que se encuentra ocupada en su mayoría por la lengua que está sumamente desarrollada, limitada lateralmente por los procesos palatinos laterales (extendidos del proceso maxilar) y ventralmente por el proceso palatino medio (invaginación de los procesos nasomediales recientemente fusionados) (Carlson, 2005; Meruane et al., 2012). El proceso palatino medio a medida que va creciendo forma una estructura triangular, el paladar primario o premaxila. Los procesos palatinos laterales crecen en sentido vertical y posteriormente se horizontalizan formando el paladar secundario haciendo que la lengua descienda y se ubique debajo de estos procesos. Estos tres procesos crecen y se fusionan, separando finalmente la cavidad oral primitiva en dos cavidades: la cavidad oral y nasal. El tabique nasal (crecimiento por la línea media del proceso frontonasal) llega a los procesos palatinos ya fusionados para formar el paladar secundario definitivo, y en dirección anterior, se continúa con el paladar primario (Meruane et al., 2012) (Figura 2).

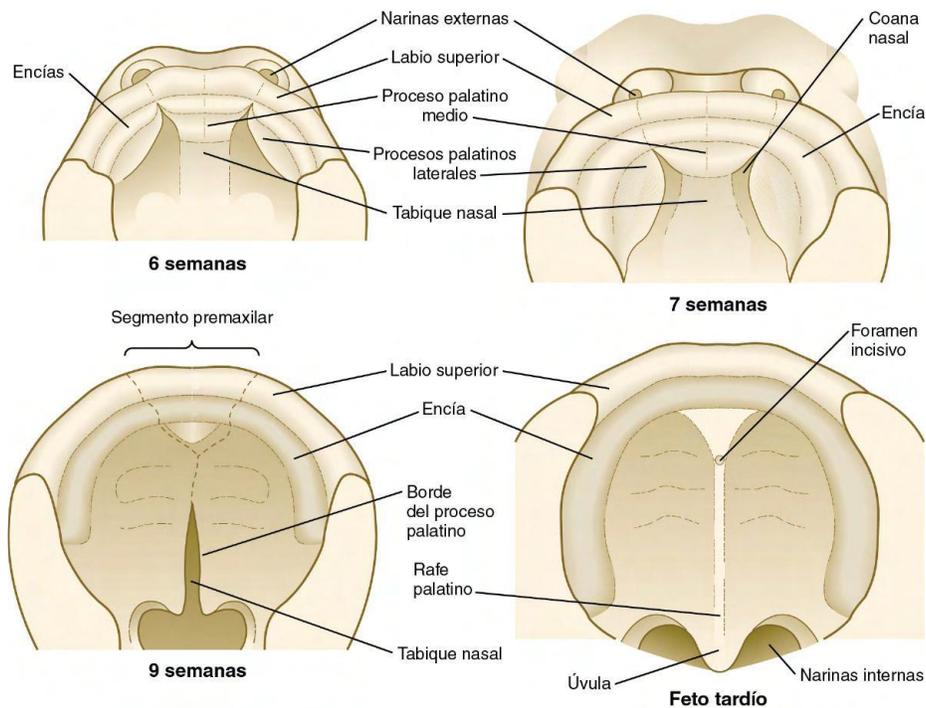


Figura 2: formación del paladar vista desde inferior (Carlson, 2005).

El epitelio odontogénico se forma a partir de la unión del borde inferior del proceso maxilar y el lado superior del proceso mandibular, en el borde lateral del estomodeo y en la zona lateral del proceso nasal medio. El epitelio comienza a proliferar y a engrosarse y posteriormente los procesos se fusionan y queda como una placa única de engrosamiento epitelial, llamada lámina epitelial primitiva o primaria (Sadler, 2011).

A esta altura tenemos un embrión con regiones precursoras que están listas para diferenciarse en los diferentes órganos y tejidos de la región maxilofacial. Con el fin de simplificar la comprensión del desarrollo embriológico de los componentes esqueléticos, se dividirá el cráneo en: a) neurocráneo (que rodea y da soporte al encéfalo) y b) viscerocráneo (que constituye al esqueleto facial). A su vez, el neurocráneo puede ser dividido en dos partes: la porción cartilaginosa o condrocráneo y la porción membranosa (Sadler, 2011).

El neurocráneo cartilaginoso (base de cráneo), es la primera región en desarrollarse y está conformado inicialmente por varios cartílagos los cuales se fusionan y osifican mediante el proceso de *osificación endocondral* (Sperber, Sperber, Guttmann, Sperber, & Gutterman, 2001). Estos cartílagos se forman a partir de placas mesenquimáticas provenientes de distintos orígenes embrionarios, limitados por la notocorda, y por lo tanto se comportan de manera diferente. Las células mesenquimáticas prenotocordales derivan del mesodermo paraxial y las células postnotocordales derivan de la cresta neural (Lieberman, 2011). Es importante destacar que la base de cráneo se forma en relación al cerebro y múltiples arterias y nervios, por lo que la osificación a partir de los cartílagos está determinada por la presencia de estas estructuras.

El neurocráneo membranoso (bóveda craneana) comienza a desarrollarse posterior a la formación de la base de cráneo y se forma a partir de una *osificación membranosa*. A partir del mesénquima (proveniente de células de la cresta neural y mesodermo paraxial), se forman diversos huesos que poseen espículas óseas que se irradian progresivamente desde los centros de osificación primarias hacia la periferia (Lieberman, 2011). En el momento de nacimiento, los ángulos de los

huesos de la bóveda no están formados, y los huesos se encuentran separados por espacios en donde el cráneo todavía es membranoso: las fontanelas (Rouvière, Delmas, & Delmas, 1987). Durante el crecimiento en la vida fetal y postnatal, los huesos membranosos aumentan de volumen por aposición de nuevas capas sobre su superficie externa y por resorción osteoclástica simultánea desde el interior, determinada por el desarrollo del cerebro. Estos a su vez, deben ser capaz de conectarse e integrarse con la base de cráneo y la cara (Lieberman, 2011; Sadler, 2011)

El desarrollo del viscerocráneo es sumamente complejo y variable. Esta estructura posee alrededor de 20 huesos los que deben desarrollarse entorno al cerebro, base de cráneo, ojos, lengua, faringe, dientes, etc. La porción superior de la cara se forma a partir del proceso frontonasal y la porción media e inferior, a partir del primer arco faríngeo. Al momento del nacimiento, el neurocráneo es considerablemente más grande que el viscerocráneo, pero a medida que van apareciendo los dientes, los senos paranasales aumentan su tamaño y el viscerocráneo crece progresivamente en las distintas dimensiones, a diferencia del neurocráneo que disminuye su tasa de crecimiento postnatal, se va obteniendo una proporción más armónica entre ellos (Enlow, 1966; Lieberman, 2011; Sadler, 2011). El crecimiento del neurocráneo membranoso y cartilaginoso está determinado principalmente por la expansión del cerebro y ocurre durante la ontogenia y los periodos prenatal y neonatal, mientras que la cara se desarrolla una vez que el cerebro ya terminó su crecimiento. La cara crece durante un periodo más extenso, madurando de forma tardía (Sperber et al., 2001).

Posterior al nacimiento, hay tres mecanismos que explican el crecimiento del neurocráneo: el crecimiento dentro de las suturas; rotaciones y desplazamientos que ocurren por deriva; y el engrosamiento de los huesos de la bóveda (Lieberman, 2011) (Figura 3). El aumento continuo en el tamaño del esqueleto facial con la edad no implica simplemente una deposición generalizada de hueso nuevo en todas las superficies externas. Por el contrario, son una serie compleja de cambios de

remodelación que tienen lugar en todas las partes de los diversos huesos faciales a medida que aumentan en tamaño total (Enlow, 1966).

El crecimiento sutural consiste en el cambio de tamaño y forma de la bóveda a través de las suturas o fontanelas (ambas derivadas de células mesenquimales). Las fontanelas permiten la expansión de la bóveda cuando el cerebro crece a una mayor velocidad que la producción ósea. Las células mesenquimales interactúan con el cerebro a través de las membranas meníngeas, especialmente la duramadre. Se cree que el estímulo dominante para el crecimiento sutural es la presión intracraneana resultante de la expansión cerebral y/o fluidos cerebrales dentro de la cavidad craneal, los cuales activan o inhiben los osteoblastos presentes en las suturas (Lieberman, 2011; Moss & Young, 1960; Opperman, 2000; Wilkie & Morriss-Kay, 2001).

La deriva o corrimiento cortical es cuando los huesos se forman a través de la neoformación ósea en dirección del crecimiento y una reabsorción del tejido en el lado opuesto, la cual es liderada por la actividad de osteoclastos. Esta actividad de reabsorción y aposición produce el desplazamiento del hueso y si la proporción de reabsorción y aposición no es equivalente, además de haber desplazamiento óseo, también habrá cambios en el tamaño y grosor. Por otro lado, el desplazamiento se caracteriza por ser un movimiento en masa. Existe dos tipos: el primario y el secundario. El desplazamiento primario es cuando el hueso crece en uno de sus extremos y por lo tanto el otro extremo se aleja, y el desplazamiento secundario es cuando el hueso se desplaza por acción de fuerzas ajenas como la de los tejidos blandos adyacentes. Por último, la rotación es la combinación de la deriva o corrimiento cortical y el desplazamiento, en donde la aposición y reabsorción se produce de forma cruzada (Figura 3).

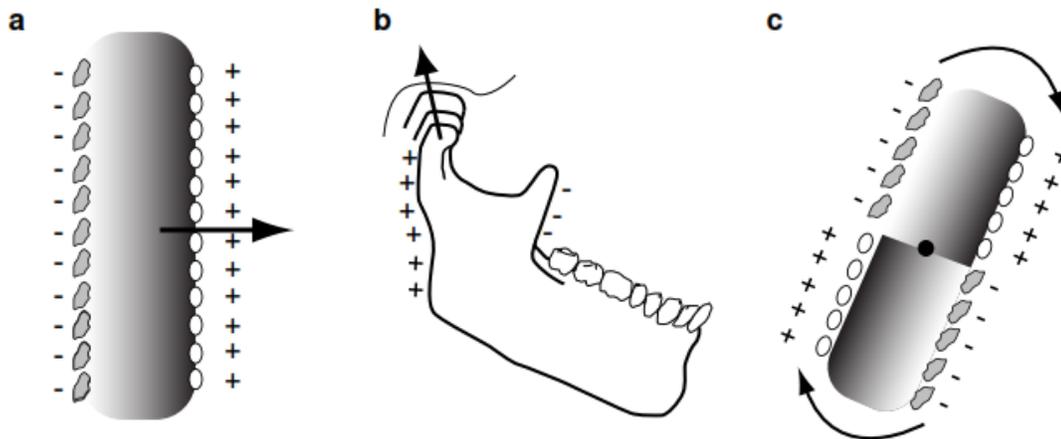


Figura 3: Tipos de remodelación ósea. a) Deriva, b) Desplazamiento del proceso condilar y una deriva en la rama. c) Rotación (editado de Lieberman, 2011).

Entonces, el patrón de crecimiento facial está determinado por estos tres mecanismos de crecimiento y por el crecimiento de los tejidos blandos y del cerebro. El crecimiento del lobo frontal del cerebro lleva a que la base de cráneo crezca hacia anterior y lateral, lo que lleva a un desplazamiento hacia anterior e inferior de las estructuras faciales superiores. Es bien sabido que la cara neonatal es característicamente pequeña en relación con el cráneo. Sin embargo, la cara sufre una ampliación posnatal progresiva y sus diversas proporciones cambian notablemente con la edad. Las dimensiones generales verticales y horizontales de la cara llegan a eludir, en tasas de crecimiento diferenciales, la disminución del crecimiento posnatal de la base craneal y la bóveda craneal (Enlow, 1966). En etapas tempranas del crecimiento, destacan los procesos de aposición ósea en el área superior (región supraorbitaria) y media del rostro (región orbital y nasal) y campos de reabsorción ósea en el área inferior del rostro (región nasomaxilar). Por lo tanto, la cara superior y la cara media crecen en dirección lateral y hacia delante, mientras que la región cigomática crece lateralmente y se reubica posteriormente, de acuerdo con las superficies de reabsorción presentes en los bordes de la órbita. La cara inferior muestra un gran campo de resorción ósea relacionado con la

formación de la fosa canina. La reabsorción en la región nasomaxilar ocurre simultáneamente con la formación de hueso en la región posterior de la cara (específicamente en las suturas craneofaciales) y en el piso y el paladar de la cavidad nasal. En consecuencia, la cara inferior muestra un crecimiento hacia abajo o vertical relacionado con la formación de la fosa canina y el aumento de la altura de la cavidad nasal (Martinez-Maza, Rosas, & Nieto-Díaz, 2013). En resumen las estructuras superiores del resto tienden a desplazarse hacia anterior, mientras las inferiores se retraen (Enlow, 1966; Eyquem, 2018) (Figura 4).

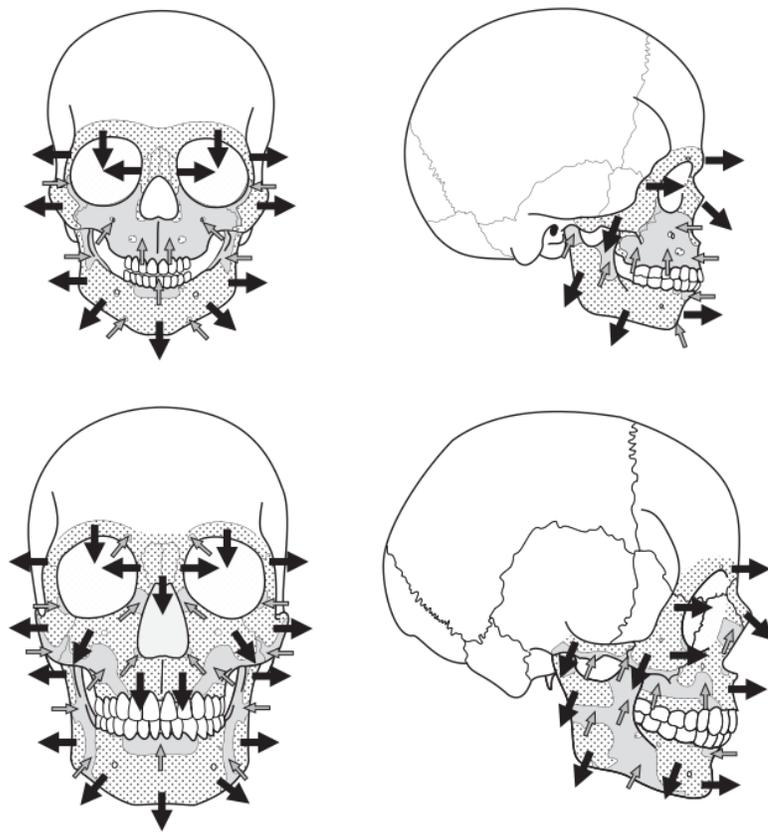


Figura 4: La figura muestra los vectores de crecimiento inferidos a partir de los patrones de modelado óseo generalizados de humanos subadultos y adultos. Las flechas negras muestran la dirección del crecimiento por la formación ósea y las flechas grises la dirección del crecimiento por la resorción ósea (Martinez-Maza et al., 2013) (Martinez-Maza, 2013).

### 3.2. Anatomía

El esqueleto de la cabeza es una de las estructuras más complejas del organismo. Esta se divide en dos partes: el neurocráneo y la cara. El neurocráneo es el que contiene y protege al encéfalo, conformado por una parte superior, la calvaria, y una parte inferior aplanada, la base de cráneo (Figura 5). La cara limita con el cráneo y en ella podemos encontrar múltiples cavidades ocupadas por los órganos de los sentidos, sin embargo hay un sentido que se encuentra a nivel de neurocráneo, el auditivo a nivel del temporal (Rouvière et al., 1987). La cabeza está conformada por un total de 22 huesos, los cuales se relacionan mediante articulaciones, especificadas en la tabla 1 (Netter, 1989).

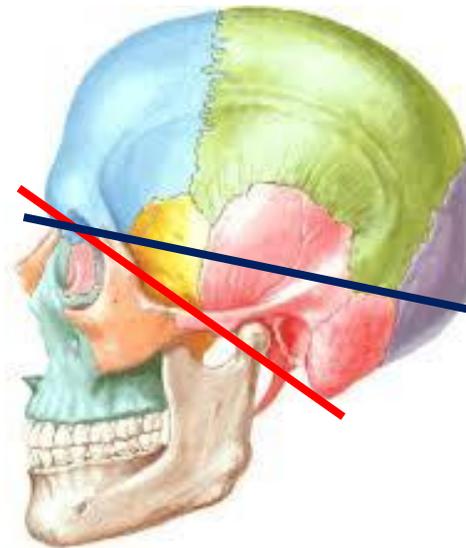


Figura 5: vista lateral de la cabeza. La línea azul representa el límite entre el cráneo y la cara, que va desde el nasion al proceso mastoides. La línea roja, que va desde la glabella a la protuberancia externa del occipital, divide a la calvaria y la base de cráneo (editado de Netter, 1989)

Tabla 1: Articulaciones de los huesos de la cabeza (editado de Netter, 1989).

Hueso	Impar	Par	Se articula con
Frontal	X		Parietal, esfenoides, cigomático, maxilar, etmoides, nasal, lagrimal
Parietal		X	Frontal, parietal, temporal, occipital, esfenoides
Temporal		X	Parietal, occipital, esfenoides, cigomático, mandíbula
Occipital	X		Parietal, temporal, esfenoides y atlas (C1)
Esfenoides	X		Frontal, parietal, temporal occipital, cigomático, maxilar, etmoides, palatino, vómer
Cigomático		X	Frontal, temporal, maxilar
Maxilar		X	Frontal, esfenoides, cigomático, maxilar, etmoides, palatino, vómer, nasal, lagrimal, concha nasal inferior
Etmoides	X		Frontal, esfenoides, maxilar, palatino, vómer, nasal, lagrimal, concha nasal inferior,
Palatino		X	Esfenoides, maxilar, etmoides, palatino, vómer, concha nasal inferior
Vómer	X		Esfenoides, maxilar, etmoides, palatino
Nasal		X	Frontal, maxilar, nasal
Lagrimal		X	Frontal, maxilar, etmoides, concha nasal inferior,
Cornete nasal inferior		X	Maxilar, etmoides, palatino, lagrimal
Mandíbula	X		Temporal

### 3.2.1. Neurocráneo:

- a) Calvaria: está compuesta anteriormente por la escama del hueso frontal, lateralmente por los huesos parietales y la porción escamosa del hueso temporal y posteriormente por la porción superior del hueso occipital. En el recién nacido, los huesos de la calvaria se encuentran separados por unas

articulaciones fibrosas denominadas fontanelas, que posteriormente, son reemplazadas por suturas dentadas (Rouvière et al., 1987).

- b) Base de cráneo: está compuesta anteriormente por la porción orbitonasal del hueso frontal y el hueso etmoidal, por el esfenoides en la zona media y posteriormente por el hueso occipital y temporal (porción mastoídea y timpánica). Se divide interiormente en tres fosas: fosa craneal anterior, media y posterior. La base de cráneo posee múltiples agujeros y fisuras, tanto en los huesos que la conforman, como en las uniones entre ellos, por donde distintas estructuras la atraviesan, tanto nervios, venas, arterias y la médula oblonga (Figura 6) (Rouvière et al., 1987). Estructuralmente, la base del cráneo es el cimiento de la cabeza: conecta el cráneo con el esqueleto axial, y forma la plataforma central sobre la cual crece el cerebro, y debajo del cual crece la cara. La posición intermedia de la base craneal entre el cerebro y la cara explica su papel especial como región que ayuda a integrar el cráneo (Lieberman, 2011).

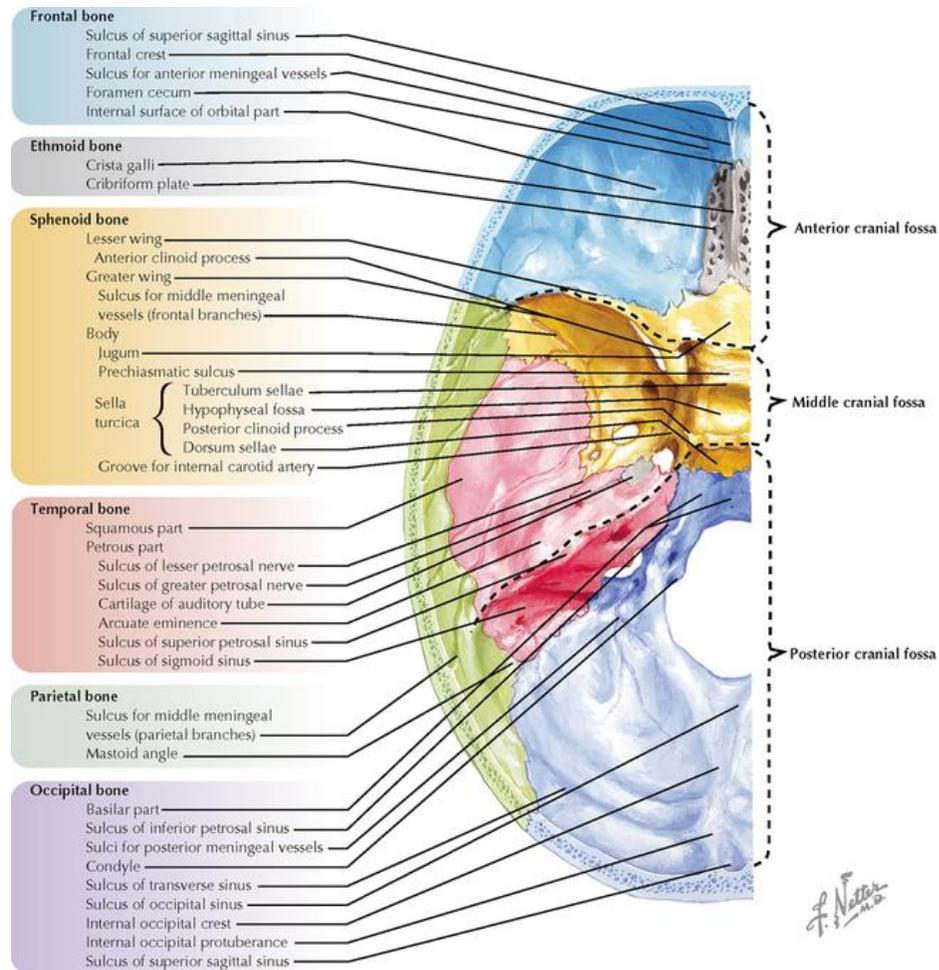


Figura 6: vista superior del endocráneo de la base de cráneo con sus estructuras

(Netter, 1989)

### 3.2.2. Cara:

Está situada anterior al cráneo y está compuesto por 14 huesos, de los cuales solo dos son impares: el vómer y la mandíbula. El resto son huesos pares y laterales y se localizan de forma simétricos con respecto a la línea media. Estos huesos son los maxilares, huesos cigomáticos, los huesos lagrimales, las conchas nasales inferiores, los huesos nasales y palatinos. La cara presenta siete cavidades: una es central e impar: la cavidad oral. Las otras son pares, laterales y simétricas con respecto a la línea media, limitadas por la cara y base de cráneo (cavidad nasal, órbitas y fosas infratemporales) (Rouvière et al., 1987).

En el complejo ósea facial, podemos encontrar unas estructuras denominadas arcos y pilares, los cuales son engrosamientos óseos de mayor resistencia mecánica, capaces de disipar las fuerzas fisiológicas, como las fuerzas masticatorias, tanto en forma vertical como horizontal. Los arcos (que disipan las fuerzas en sentido horizontal), desde superior a inferior son: el borde supraorbitario combinado con la glabella, el borde infraorbitario combinado con los arcos cigomáticos, y los procesos alveolares del maxilar superior. Los pilares (que disipan las fuerzas en sentido vertical) se pueden dividir en superficiales y profundo. Los superficiales son, desde anterior a posterior: el pilar canino o frontomaxilar, el pilar cigomáxicomaxilar (en relación al primer molar), y el pilar pterigoideomaxilar (la unión de la pterigoideas con la tuberosidad del maxilar), y el pilar profundo es el tabique nasal (Donat, Endress, & Mathog, 1998; Rouvière et al., 1987).

La parte media de la cara tiene cuatro pares de senos paranasales. Los senos paranasales son cavidades aéreas, revestidas por epitelio respiratorio, que se ubican en los huesos maxilares, esfenoides, etmoides, y frontales. Estos poseen una anatomía muy variable entre ellos, pero tienen en común que todos drenen en la cavidad nasal (Lieberman, 2011; Netter, 1989).

### 3.3. Músculos de la masticación: anatomía y función.

Los músculos de la masticación, como su nombre lo indica, son los encargados de llevar a cabo la masticación mediante la movilización de la mandíbula en diversas direcciones con respecto al cráneo, siendo el fulcro la articulación temporomandibular (ATM) (Toro-Ibacache & O'Higgins, 2016). Estos tienen en común, además de su función, en que su origen se encuentra a nivel del cráneo o a nivel del hueso hioides y su inserción a nivel de la mandíbula, y que están inervados por el ramo mandibular del nervio Trigémino (Rouvière et al., 1987) (Tabla 2).

Los músculos de la masticación definen los brazos de palancas durante la mordida y por lo tanto, definen las cargas que serán transmitidas a la estructura

ósea de la cara y cráneo. La contracción de estos actúan sobre el hueso generando tensiones en la zona de inserción (detallado en la Tabla 2), definiendo y afectando no solo al crecimiento modular del cráneo, y por lo tanto a la morfología de la estructura craneofacial, sino que también explicaría los cambios anatómicos que ha sufrido el cráneo a través de los años, debido a los cambios en la intensidad de las tensiones por los cambios en la dieta (C. Morales, 2018).

Este grupo muscular se forman a partir del tejido mesenquimático de origen mesodérmico proveniente del primer arco faríngeo (Sadler, 2011).

Tabla 2: Descripción general de los músculos masticatorios (C. Morales, 2018).

Músculo	Origen	Inserción	Acción principal	Inervación
Masetero, porción superficial	Borde inferior de los 2/3 anteriores del arco cigomático	Ángulo mandibular, parte inferior y lateral de la rama mandibular	Eleva la mandíbula La porción superficial participa durante la protrusión	Ramo masetérico del nervio mandibular (ramo del nervio trigémino)
Masetero, porción profunda	Borde medial del arco cigomático; borde inferior del 1/3 posterior del arco cigomático	Parte superolateral de la rama mandibular hasta el proceso coronoides		
Temporal	Fosa temporal hasta la línea temporal inferior Cresta infratemporal	Proceso coronoides y la cresta temporal	Elevador mandibular Retrae la mandíbula (fibras posteriores)	Ramos temporales profundos anterior y posterior del nervio mandibular
Pterigoideo medial, porción profunda	Fosa pterigoidea (lámina lateral)	Cara medial de la rama y ángulo mandibular	Eleva, protruye y permite movimiento de lateralidad a la mandíbula	Ramo pterigoideo medial del nervio mandibular
Pterigoideo medial, porción superficial	Tuberosidad del maxilar; proceso piramidal del hueso palatino			
Pterigoideo lateral, porción superior	Ala mayor del esfenoides. Cresta infratemporal	Disco y cápsula de la ATM	Desciende, protruye y permite movimiento de lateralidad a la mandíbula	Ramos pterigoideos laterales del nervio mandibular
Pterigoideo lateral, porción inferior	Cara lateral de la lámina lateral del proceso pterigoides	Fosita pterigoidea en el cuello mandibular		
Milohioideo	Línea milohioidea de la mandíbula	Rafe mediano milohioideo y hueso hioides	Desciende la mandíbula. Eleva hioides y piso de la cavidad oral	Nervio milohioideo (del nervio alveolar inferior, del nervio mandibular)
Digástrico, vientre anterior	Tendón intermedio del músculo digástrico	Cara inferior del tubérculo mentoniano Fosa digástrica	Desciende la mandíbula.	Nervio milohioideo.
Digástrico, vientre posterior	Incisura mastoidea	Tendón intermedio del músculo digástrico	Elevación hueso hioides (permite deglución)	Nervio facial

### 3.4. Masticación y alimentos

La masticación es un proceso complejo en el cual hay actividad sensorial y motora con el fin de preparar la comida para ser tragada, siendo por lo tanto, el primer paso para la digestión de los alimentos. Para ser llevada a cabo, es necesaria la participación de diversos grupos musculares, como los faciales y los masticatorios, además de otros elementos como la lengua, los dientes, la saliva, etc. La masticación implica el aplastamiento de los alimentos, así como un patrón de movimientos rítmicos, bajo el control de un generador central de patrones ubicado en el tronco encefálico (Farias Gomes et al., 2010; Lieberman, 2011; Van der Bilt, Engelen, Pereira, Van der Glas, & Abbink, 2006). Además de ser fundamental para la digestión, esta también lo es para el desarrollo y crecimiento facial, explicando tanto los cambios esqueléticos durante la vida de un individuo como los cambios en la evolución del ser humano.

El ser humano realiza dos tipos de mordidas: la incisión, que se lleva a cabo con los dientes anteriores, y la masticación la cual se realiza con los dientes postcaninos. La incisión parte los alimentos en partes más pequeñas para poder ingresarlas a la cavidad oral. Esta ocurre de forma bilateral, a diferencia de la masticación que es unilateral (lado de trabajo), y ocurre con la mandíbula en posición protruida con la participación simétrica de los músculos con muy poco o nada de movimientos laterales. La masticación es repetitiva y rítmica con la participación activa de la lengua que lleva el alimento a las zonas oclusales, desde anterior a posterior hasta que finalmente es tragado (Lieberman, 2011; Van der Bilt et al., 2006). La mandíbula para masticar realiza movimientos anteroposteriores, movimientos en sentido vertical y laterales. La masticación unilateral es más eficiente, ya que combina la fuerza de los músculos de ambos lados (lado de trabajo y de balance) para realizar el trabajo en solo un lado, y ya que de esta forma permite movimientos más controlados y coordinados. Estos dos tipos de mordida tienen una importante implicancia para el crecimiento y función del complejo craneofacial, las cuales serán estudiadas de forma independiente en este trabajo en términos de

las microdeformaciones que producirán en el esqueleto óseo craneofacial, al aplicar la carga masticatoria Lieberman (2011).

La masticación se divide en dos fases: apertura y cierre. Durante la apertura, la mandíbula desciende gracias a la acción de la gravedad y de las contracciones de los músculos suprahioides. Esto genera la rotación de los cóndilos en un eje horizontal. La contracción de los pterigoideos laterales traslada a los cóndilos hacia anterior y abajo por debajo de la eminencia articular. Durante la apertura de la incisión bilateral, ambos cóndilos se trasladan de forma simétrica, no así en la masticación unilateral, desplazando la mandíbula ligeramente lateralmente hacia el lado de trabajo. El cierre incluye dos etapas: cierre rápido y lento. El cierre rápido se inicia con la contracción del pterigoideo medial del lado de balance y el masetero profundo del lado de trabajo, llevando la mandíbula a una posición más elevada e inclinada hacia el lado de trabajo. En el momento en que los dientes postcaninos inferiores del lado de trabajo quedan en posición lateral a los superiores pasa a cierre lento, en donde se contrae el pterigoideo medial, el masetero y el temporal, llevando finalmente la mandíbula al planomediano del cráneo (Figura 7).

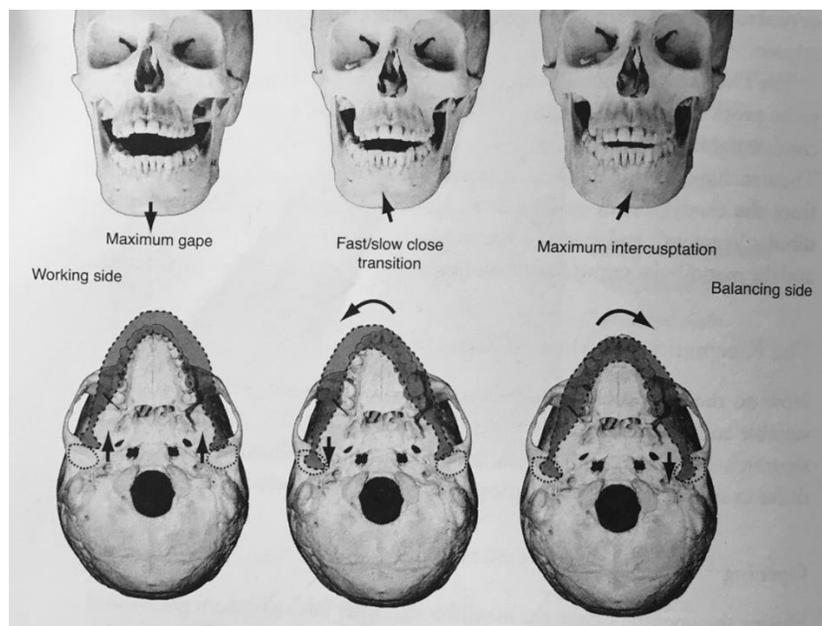


Figura 7: Movimientos mandibulares durante la masticación. Visión frontal e inferior (editado de Lieberman, 2011)

Los alimentos y sus propiedades mecánicas juegan un importante rol a la hora de masticar. El objetivo principal de masticar es reducir el tamaño de los alimentos, además de aumentar la eficiencia digestiva, entre otros. Desde el punto de vista de los dientes, la característica más importante de los alimentos son sus propiedades de fractura. Estas propiedades varían ampliamente y son críticas con respecto a las dos etapas durante las cuales un diente actúa sobre una unidad de alimento. La primera etapa es la deformación inicial de los alimentos en respuesta a la carga aplicada. Esta depende del módulo de elasticidad del material (el rango en que el material volverá a su forma inicial después de ceder la carga). La segunda etapa (food breakdown) es cuando el alimento sufre una deformación plástica, en donde una vez cedida la carga, el alimento no vuelve a su forma inicial y este se rompe o fractura. Una vez que una partícula de alimento comienza a agrietarse, esta debe propagarse a través del objeto completo, acción determinada por la dureza o tenacidad del alimento, la cual depende principalmente por la presencia de colágeno y/o celulosa (Agrawal, Lucas, Prinz, & Bruce, 1997; Lieberman, 2011). Los alimentos varían ampliamente en sus módulos de elasticidad, plasticidad y rigidez, requiriendo algunos más fuerza y más ciclos masticatorios para iniciar la fractura u otros en donde se necesita más fuerza y ciclos para poder propagarla (Van der Bilt et al., 2006). Los alimentos duros (como la manzana, zanahoria o una nuez) necesitan de gran fuerza para que se produzca la fractura, pero una vez producido el rasgo, este se propaga rápidamente. Por el contrario, los alimentos tenaces (como las carnes y las hojas de espinaca) necesitan de mucha energía para propagar la fractura, además de un gran número de ciclos masticatorios y una actividad prolongada de los músculos elevadores mandibulares (Foster, Woda, & Peyron, 2006; N. Morales & Toro-Ibacache, 2018).

### 3.5. Cómo la función modifica la forma: Mecanotransducción

A nivel microscópico, los cambios plásticos de la estructura facial y sus partes, consecutivo a las cargas aplicadas, se explica por la respuesta de las distintas células encargadas de la formación y remodelación ósea

(osteoprogenitoras, osteoblastos, osteocitos y osteoclastos), generando en distintas proporciones deposición, reabsorción y mantención del tejido óseo. Esto genera un cambio en la morfología micro y macroanatómica del hueso de tal forma que las cargas que actúan sobre el hueso sean resistidas por la nueva forma, y las microdeformaciones generadas en el hueso estén dentro del rango de mantención de la masa ósea (Frost, 1987). La carga ejercida produce micro deformaciones en el tejido, las cuales activan el proceso de mecanotransducción. La mecanotransducción es un mecanismo por el cual las células de un tejido, en conjunto, convierten los estímulos mecánicos, mediante la deformación del citoesqueleto, proteínas de membrana, proteínas de la matriz extracelular, etc, en una respuesta bioquímica que producen cambios en la transducción del ADN (Ingber, 2006). Estos cambios producirán señales capaces de activar a los osteocitos, los cuales son los principales responsables de la coordinación del funcionamiento de los osteoblastos y osteoclastos, lo que finalmente va a concluir con la remodelación del tejido óseo, tanto en su tamaño y forma (Bellido, 2014).

Durante la mecanotransducción, las moléculas, o mediadores de la mecanotransducción, que forman parte de los tejidos (Figura 8), se ven alteradas por el estrés mecánico, lo que, a su vez, reorganiza al resto de la estructura, tanto interna como externamente. Por ejemplo, se sabe que la distensión mecánica de la membrana celular genera un cambio conformacional de los canales iónicos, cambiando su tasa de apertura y cierre, lo que da pie a una serie de procesos metabólicos en la célula. En cartílago y hueso, se ha observado que contracciones musculares cíclicas son capaces de movilizar fluidos de la matriz extracelular, lo que causa estrés de cizalla en la superficie celular y cambios en potenciales electroquímicos de la membrana, modificando la transducción de señales e induciendo remodelamiento (Ingber, 2006).

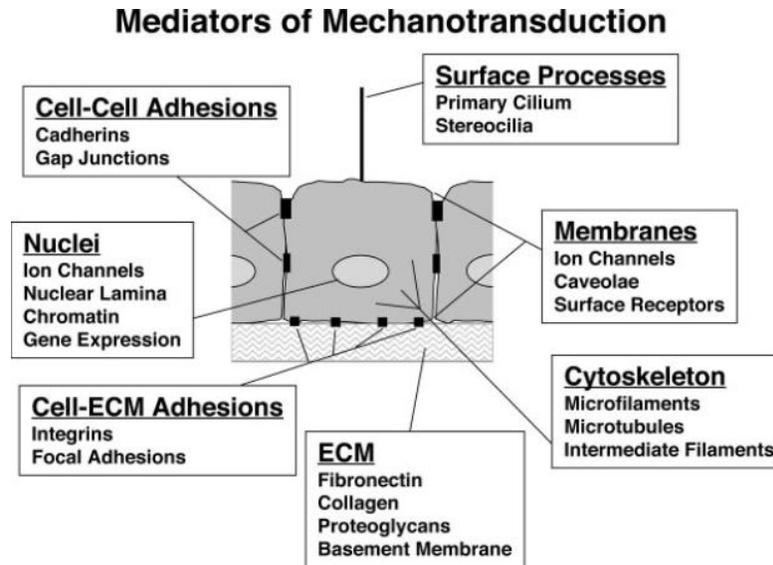


Figura 8: Mediadores de la mecanotransducción. Diversas moléculas, componentes celulares y estructuras extracelulares contribuyen a la mecanotransducción (Ingber, 2006).

Durante la oclusión dental el cráneo actúa 1) permitiendo la inserción de los músculos elevadores de la mandíbula, y 2) recibiendo la carga oclusal generada en los dientes que articulan con el proceso alveolar del maxilar y la mandíbula. La inserción muscular actúa en el hueso generando tensión durante su contracción, y además la posición relativa de estos define los brazos de palanca, determinando así, las cargas que finalmente se transmiten mediante los dientes al esqueleto óseo. Todas estas cargas y tensiones generan microdeformaciones en el hueso, las que al sobrepasar el umbral de mantención del tejido óseo, gatillarán la remodelación ósea, distribuidas en distintas estructuras de forma desigual, dependiendo del lugar de la carga y de las inserciones musculares.

### 3.6. Cuantificando la microdeformación ósea: Análisis de elementos finitos

Mediante técnicas de modelamiento computacional como análisis de elementos finitos (AEF), es posible observar que las cargas generadas durante la oclusión dental se traducen en microdeformaciones (o strains) altas a nivel facial, en las zonas de inserción de los músculos masticatorios, principalmente los

músculos masetero y el pterigoideo medial, el proceso alveolar en relación al diente en oclusión, la incisura nasal, el proceso frontal del maxilar, la fosa mandibular, el paladar, en relación al diente en oclusión, y los arcos y pilares faciales. Cuando hay diferencias morfológicas entre los individuos, la distribución de las microdeformaciones se ve levemente alteradas, principalmente en el maxilar superior, particularmente el proceso alveolar y el paladar, alcanzando magnitudes más bajas en los individuos con el maxilar más angosto y procesos alveolares orientados verticalmente, comparado con individuos más prognáticos (Toro-Ibacache, Muñoz, & O'Higgins, 2016) (Figura 9).

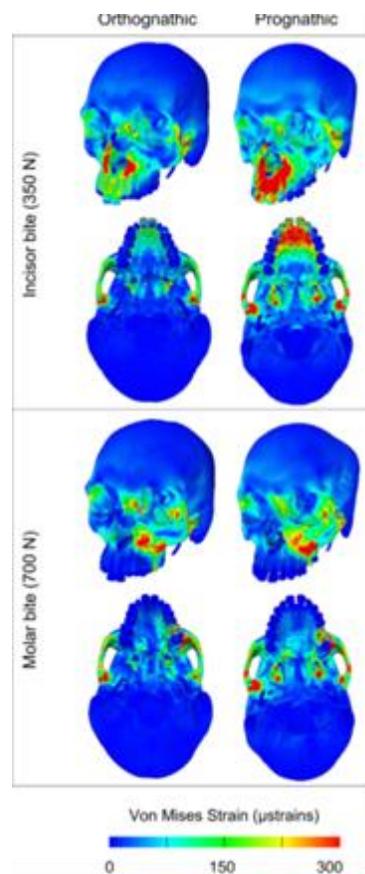


Figure 9: Diagrama de contorno de microdeformación Von Mises de modelos de elementos finitos, de cráneos con diferentes morfologías neurocraneales y faciales, durante incisión (cuadro superior) y oclusión molar (cuadro inferior). El individuo ortognático (columna izquierda) tiene un maxilar estrecho orientado verticalmente en comparación con el individuo prognático (Toro-Ibacache et al., 2016).

El modelamiento computacional mediante análisis de elementos finitos (AEF) es una técnica muy utilizada en diversas áreas para predecir el rendimiento mecánico de la estructura biológica bajo carga en términos de estrés y microdeformación. A modo general, el AEF es una técnica de análisis numérico, en donde una estructura es dividida en un número finito de elementos discretos, los cuales se encuentran unidos por nodos (Figura 10), formando una malla 2D o 3D (Kupczik, 2008) (Figura 11). La geometría de la estructura a analizar es obtenida, por ejemplo, mediante tomografía computarizada (TC), y mediante software especializados es posible realizar su transformación a malla de elementos finitos, a la que luego se le aplican fuerzas de interés (por ejemplo, fuerzas musculares) y restricciones de movimiento espacial. El software luego resuelve el modelo calculando para cada elemento la microdeformación sufrida, la que se basa en los cambios en la ubicación de los nodos (Rayfield, 2007). Esta técnica es muy útil a la hora de realizar estudios en donde los enfoques experimentales en los que se mide directamente la microdeformación en el tejido no son aplicables (por ejemplo en humanos vivos), entregando valiosa información para comprender el comportamiento del esqueleto craneal durante la oclusión (Kupczik, 2008). En estudios de morfología funcional craneal en humanos y otros primates, el AEF ha sido utilizado para evaluar los efectos mecánicos de diferencias en la activación de los músculos, de diferencias en la anatomía y propiedades materiales óseas (Torobacache et al., 2016).

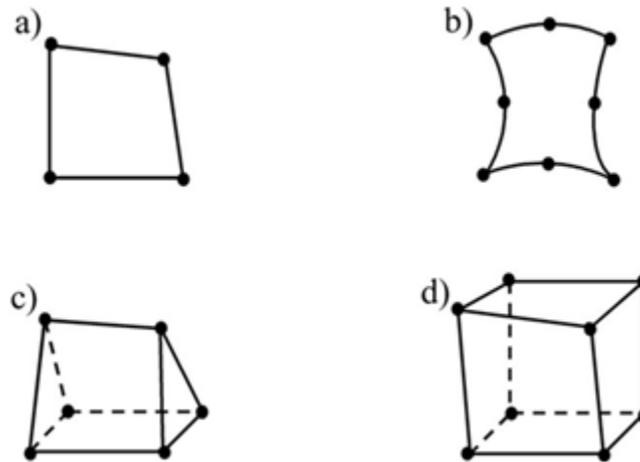


Figura 10: Varios ejemplos de tipos de elementos. Los elementos pueden ser lineales (a, c, y d) o cuadráticos (b). Los últimos son más flexibles y precisos, pero computacionalmente más complejos de resolver. Una mayor densidad de elementos también aumenta la precisión. Los elementos típicos incluyen elementos bidimensionales lineales (a) y cuadráticos (b) y elementos poliédricos 3D tales como la cuña lineal de seis nodos (c) y los elementos de ladrillo de ocho nodos (d) (Richmond et al., 2005).

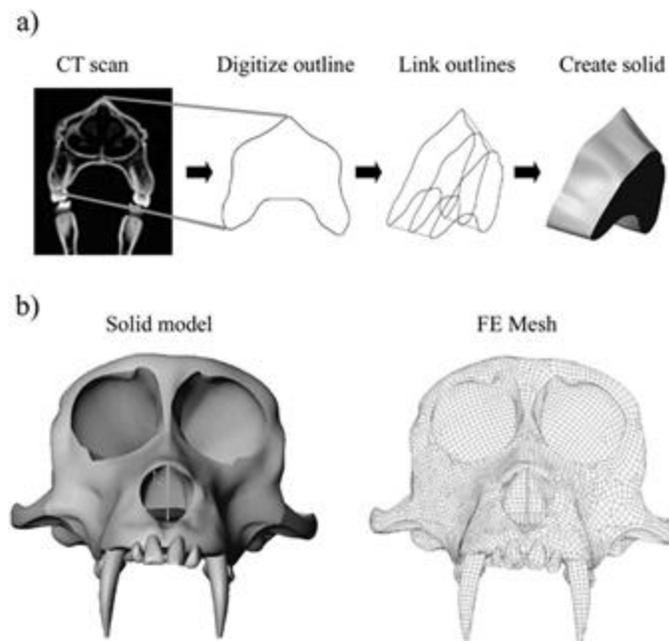


Figura 11: Un ejemplo ilustrativo de creación de la malla de elementos finitos de un cráneo de macaco. a) Los contornos externos e internos del cráneo fueron recreados en base a las imágenes de una TC, y mediante software especializado, convertido en a un modelo 3D sólido (b). Este modelo sólido fue luego transformado a una malla 3D (FE Mesh) elementos en forma de ladrillos y otros elementos poliédricos lineales (Richmond et al., 2005).

En odontología, AEF se ha usado en distintas áreas, como la implantología, cirugía, ortodoncia y rehabilitación, aportando con información relevante para obtener, por ejemplo, mejores técnicas quirúrgicas y materiales, de manera de garantizar un adecuado desarrollo, mantención y/o cicatrización del tejido óseo. En implantología, ha sido útil para estudiar la osteointegración, sus etapas y su relación con la respuesta del tejido óseo frente a cargas (Marcián et al., 2018), la biocompatibilidad de los distintos materiales, respuesta ósea frente a diversas cargas (Prados-Privado, Prados-Frutos, Calvo-Guirado, & Bea, 2016), etc. En cirugía maxilofacial se ha utilizado para evaluar y comparar la respuesta del tejido óseo frente a diferentes técnicas quirúrgicas de fijación para cirugía ortognática mandibular (Stringhini et al., 2016), entre otros.

El AEF ofrece entonces una excelente oportunidad para estudiar los cambios estructurales que son producidos en el esqueleto craneal debido a diferencias en cargas masticatorias relacionadas por ejemplo, con dietas de distinta consistencia. Individuos con mayor demanda mecánica desarrollarán una morfología ósea más robusta, capaz de resistir mejor las cargas (es decir, deformarse menos ante ellas) en comparación a un cráneo que no ha sufrido cargas intensas durante su crecimiento. Se asume que el cráneo del ser humano moderno, al requerir menos cargas masticatorias, posee músculos masticatorios más pequeños y con menos fuerza (Stedman et al., 2004), lo que se traduce en una menor restricción del crecimiento vertical de la cara. Así, en humanos esta debilidad muscular se vería reflejado en el desarrollo de caras más largas y verticales con menor aposición ósea en el hueso en las zonas de inserción de los músculos masticatorios resultando en un menor ancho craneofacial. Esto daría como resultados esqueletos craneales y dientes más pequeños y menos resistentes, propensos a sufrir deformaciones, y a producir maloclusiones, que a su vez, son aún más propensos a sufrir deformaciones óseas (Van Spronsen, 2010). Este estudio es el primero en su tipo en el sentido de que analiza la relación entre las cargas que ejerció en vida un individuo, no solo en intensidad, sino que también en forma (relación craneomandibular) con su respuesta mecánica craneal en términos de su patrón de microdeformación ósea.

El presente trabajo busca estudiar la relación entre la fuerza masticatoria y forma craneofacial, cuyo fenotipo varía, en parte, por la intensidad de sus fuerzas masticatorias y relaciones oclusales (Eyquem, 2018). En anatomía y áreas afines (antropología física, odontología y medicina), es de interés conocer cuánto de la morfología facial es susceptible de ser modificada plásticamente por la función masticatoria (o a modo general, cuánto de la morfología ósea puede modificarse por la acción muscular). Particularmente en odontología, este conocimiento es fundamental en áreas como la cirugía maxilofacial, implantología y ortodoncia en donde la carga y la respuesta del tejido óseo son determinantes en el éxito del procedimiento. Debido a esto, es sumamente importante comprender el impacto de la masticación sobre el desarrollo y crecimiento de la morfología craneofacial.

#### **4. HIPÓTESIS**

Existe una relación entre la intensidad de carga masticatoria, la relación maxilomandibular y la respuesta mecánica craneal durante la oclusión dental.

Se espera que, bajo la misma magnitud de carga, los individuos respondan de distinta forma, con una mayor deformación en aquellos con dietas con menor requerimiento mecánico. Se espera además que los individuos con oclusión alterada muestren un tipo de respuesta (ubicación relativa de microdeformaciones altas y bajas) distinta al de los individuos con relación maxilomandibular armónica.

#### **5. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el efecto de la intensidad de carga masticatoria y relación maxilomandibular en la respuesta mecánica craneal.

#### **6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Construir y resolver modelos de elementos finitos del cráneo de individuos representativo de grupos que difieren en a) intensidad de carga masticatoria debido a dietas en base a alimentos de distinta consistencia, y b) relación maxilomandibular.
- ii. Comparar la magnitud y forma de la deformación craneofacial de los 5 individuos representantes de los tipos de carga masticatori

## 7. METODOLOGÍA

El diseño del estudio corresponde a un estudio transversal, experimental con descripción cuantitativa y cuantitativa de los resultados, sin prueba estadística de la hipótesis y por lo tanto de tipo exploratorio (ver detalle más abajo). Este estudio se enmarca el proyecto FONDECYT 11150175, y autorizado por el Comité de Ética de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile (Anexo 1).

### 7.1. Muestra

La muestra estará conformada por cinco individuos que difieren en su estrategia de sobrevivencia, y con ello, la consistencia de sus alimentos. De los cinco individuos, dos son de poblaciones arqueológicas y tres de poblaciones actuales, cada uno representando distintas intensidades de cargas masticatorias y relación maxilomandibular. La selección de los individuos se basará en los resultados de los análisis de morfometría geométrica obtenidos en un estudio previo (Eyquem, 2018), mediante los cuales se seleccionaron aquellos que representan la forma promedio de cada grupo de interés (ver abajo). Por lo tanto, los modelos presentarán las características anatómicas más relevantes de cada estrategia de alimentación y relaciones oclusales.

Los criterios de inclusión para los individuos tanto para los restos esqueléticos como para la población viva serán:

- Los individuos tienen que ser adultos.
- Buen estado del tejido óseo, sin malformaciones, trauma masivo craneofacial o cirugías ortognáticas.
- Presencia de al menos 1 molar en oclusión. Si el molar no está presente por pérdida peri o postmortem, pero el alveolo y el proceso alveolar está intacto, también se puede incluir.

Cada individuo representa una carga masticatoria:

Individuo 1: Pertenece a una población arqueológica de cazadores-recolectores y representa a la carga masticatoria intensa. Fue seleccionado de una muestra conformada por individuos tanto de Chile como Argentina. De Chile, la muestra era perteneciente a una colección de Chonos, los cuales poseían una dieta principalmente marina, con alto consumo de pescado y lobo marino (Bernal, Perez, & Gonzalez, 2006; El-Zaatari, 2010; González-José et al., 2005). De Argentina se obtienen individuos tanto de la Tierra del Fuego como de la costa de la Patagonia argentina. Estos individuos, tanto de Chile como Argentina tenían la peculiaridad de que eran nómades y basaban su subsistencia en la caza de animales y recolección de frutos, semillas y/o mariscos (Bernal et al., 2006; Kelly, 1983).

Individuo 2: Pertenece a una población arqueológica de agricultores y representará una intensidad de carga masticatoria intermedia, en donde la dieta es más procesada que la del individuo anterior, ya que las poblaciones de agricultores eran capaces de cultivar y procesar química y mecánicamente sus alimentos, además de un aumento en el consumo de hidratos de carbono, legumbres, vegetales, entre otros (González-José et al., 2005; Planella, Falabella, Belmar, & Quiroz, 2014). Este individuo se obtendrá a partir de una muestra conformada por individuos de Pampa Grande (NOA) y Mapuches de la pampa argentina; y del Norte de Chile, del complejo Pica Tarapacá.

Las TCs de estos individuos son de diferentes colecciones pertenecientes a la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad de Chile (FACSO); el Museo de Historia Natural de Florencia (MNHF) y del instituto Max Planck de Antropología Evolutiva (MPI-EVA).

Individuo 3: Corresponderá a un ser humano moderno y contemporáneo y representará la carga masticatoria leve, cuya alimentación se basa en alimentos industriales altamente procesados (Monteiro, Levy, Claro, Castro, & Cannon, 2010; Smith, 1984). Se obtendrá a partir de dos muestras: una perteneciente a un hospital urbano chileno (Hospital Universitario de Chile, Santiago de Chile), con población viva que asiste a dicho centro médico con fines ajenas a los objetivos de este

estudio, y una muestra correspondiente a la colección Osteológica Subactual de Santiago o, más conocida como Cementerio General (CCG) de FACSO.

Individuos 4 y 5: Representan la carga masticatoria alterada. Estos dos individuos se obtienen de una muestra conformada por individuos urbanos, contemporáneos, pacientes con alteraciones de las relaciones anteroposteriores maxilomandibulares y oclusales del Instituto de Cirugía, Ortodoncia, Rehabilitación Oral y Maxilofacial (ICOR). Lo que diferencia al individuo 4 del 5 es que uno tiene una alteración severa de tipo clase II y la otra de tipo clase III respectivamente.

Tabla 3: Datos de los individuos seleccionados a partir de los resultados de análisis de morfología geométrica, obtenidos en un estudio previo (Eyquem, 2018), los cuales son los más representativos de cada grupo.

<b>Carga masticatoria</b>	<b>Colección</b>	<b>Sexo</b>	<b>Origen geográfico</b>	<b>Origen de la muestra</b>
<b>Intensa</b>	Chubut (Cu)	M	Noroeste de la Patagonia argentina	Museo de La Plata (MLP)
<b>Intermedia</b>	Pica 8 (P8)	M	Complejo Pica-Tarapacá, norte de Chile	Facultad de Ciencias Sociales Universidad de Chile (FACSO)
<b>Leve</b>	Población actual urbana (Mo)	F	Centro de Chile	Hospital Clínico Universidad de Chile (HCUCH)
<b>Alterada Clase II</b>	Población actual urbana (A2)	F	Centro de Chile	Instituto de Cirugía, Ortodoncia Rehabilitación Oral y Máxilo-Facial (ICOR)
<b>Alterada Clase III</b>	Población actual urbana (A3)	M	Centro de Chile	Instituto de Cirugía, Ortodoncia Rehabilitación Oral y Máxilo-Facial (ICOR)

## 7.2. Métodos de obtención y procesamiento de datos

Posterior a la obtención de las imágenes, las TCs fueron exportadas para su uso en este estudio como DICOM files. Los tejidos fueron segmentados para realizar su reconstrucción tridimensional (Figura 12a), mediante la utilización del programa de visualización y análisis virtual tridimensional Avizo (visualization Sciences Group, USA) Cabe destacar que este procedimiento se realizará solo en cráneo, excluyendo a la mandíbula (Figura 12b).

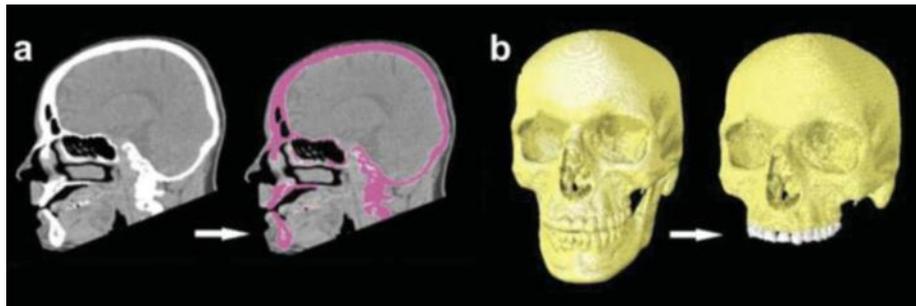


Figura 12: Ejemplo ilustrativo de una reconstrucción 3D a partir de una TC. a) Los tejidos duros (señalados en rosado) están etiquetados (segmentados) a partir de tejidos blandos y aire. b) Dentro de los tejidos duros, el cráneo, la mandíbula y los dientes se pueden segmentar y separar para el análisis (imagen diseñada por Viviana Toro-Ibacache, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile).

Durante la segmentación de las imágenes de los individuos 1 y 2 fue necesaria la reconstrucción de los dientes ausentes relevantes al estudio, ya que en ellos fueron aplicadas las restricciones cinemáticas en el eje vertical que simulan la mordida incisal. Específicamente, en el individuo 1, el diente 1.1 fue reconstruido rellenando los alveolos con material dental y en la parte coronal imitando la anatomía del diente contralateral. En el individuo 2, ambos incisivos centrales debieron ser reconstruidos, rellenando los alveolos con material dental y recreando la corona tomando como referencia la anatomía de los incisivos laterales.

### 7.3. Análisis de elementos finitos del cráneo

Los modelos presentarán las características anatómicas más relevantes de cada estrategia de alimentación y relaciones oclusales. Se preservarán los senos craneofaciales y se modelará el hueso esponjoso como cortical, decisión basada en el hecho de que la reducción del hueso esponjoso hace que el modelo aumente su rigidez de forma proporcional, sin alterar mayormente los resultados en términos de ubicación relativa de microdeformaciones óseas (Fitton & PrôA, 2015). Las segmentaciones basadas en TC producirán datos de volumen en formato .bmp que luego se transformarán en mallas FE mediante conversión directa de vóxeles a elementos cúbicos con ocho nodos, mediante la utilización del programa VOX-FE (Fagan et al., 2007; Liu et al., 2012). A cada malla FE se le asignan un módulo de elasticidad (módulo de Young) de 17 GPa al hueso y relación de Poisson de 0,3, que indica que el hueso será modelado homogéneamente como material elástico lineal isotrópico. Estas, posteriormente serán cargadas y restringidas cinemáticamente en el eje vertical, en los bordes incisales de los incisivos centrales superiores y en las puntas de las cúspides de los primeros molares superiores, con el fin de simular los puntos de contactos comunes en la masticación, y en las superficies articulares de las fosas mandibulares en los ejes espaciales x, y, z, para simular escenarios de masticación (Toro-Ibacache & O'Higgins, 2016). El AEF tiene como fin predecir la microdeformación además de las fuerzas de reacción (oclusal y articular), así como la deformación del modelo global, tanto en tamaño como en forma, para así, poder comparar cualitativa y cuantitativamente, mediante mapas de contorno de colores, como responderá cada grupo a las cargas masticatorias (Figura 13). Debido al tamaño reducido de la muestra, inherente a estudios mediante AEF dada la complejidad de la construcción de modelos, la comparación entre modelos no se realizará mediante métodos estadísticos.

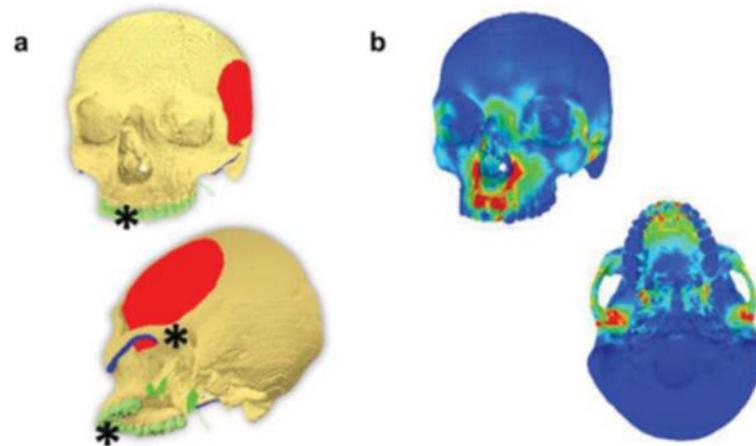


Figura 13: AEF de modelos craneales humanos. a) Construcción del modelo a partir de reconstrucciones tridimensionales basadas en CT; los asteriscos representan restricciones cinemáticas para una oclusión incisiva simulada, y se aplican cargas musculares (en rojo, azul y verde). b) La solución del modelo se representa utilizando diagramas de deformación que representan áreas de cepas alta (roja), media (verde) y baja (azul) (imagen diseñada por Viviana Toro-Ibacache, Facultad de Odontología, Universidad de Chile).

Tabla 4: descripción de los modelos de elementos finitos.

Individuo	Sexo	Tamaño de vóxeles de las CT (mm)	N° de elementos	Fuerza Temporal (N)	Fuerza Masetero (N)	Fuerza Pterigoideo Medial (N)
<b>Intensa</b>	M	0,33 x 0,33 x 0,33	163,283,22	200	200	150
<b>Intermedia</b>	M	0,41 x 0,41 x 0,41	7,137,148			
<b>Leve</b>	F	0,44 x 0,44 x 0,44	6,936,623			
<b>Alterada Clase II</b>	F	0,39 x 0,39 x 0,39	9,178,646			
<b>Alterada Clase III</b>	M	0,39 x 0,39 x 0,39	9,754,542			

## 8. RESULTADOS

En este estudio se evaluó el comportamiento mecánico craneal, en términos de microdeformación ósea, durante la acción de cargas masticatorias aplicadas en los incisivos centrales superiores y en el primer molar superior izquierdo. Los resultados del AEF muestran que la distribución de las zonas de alta y baja deformación en los mapas de contorno es muy similar entre los modelos, pero la magnitud aumenta en aquellos individuos que han ejercido menores cargas (por el su economía de subsistencia y los alimentos consumidos, altamente procesados) y en los individuos de carga alterada. Además, se pueden apreciar más zonas de alta deformación cuando los modelos son cargados en los incisivos en comparación a cuando son cargados en los primeros molares.

### 8.1. Carga en los incisivos centrales:

Los resultados obtenidos en la incisión fueron muy similares en la distribución de las microdeformaciones, no así en la magnitud.

De modo general, la magnitud de las microdeformaciones fue menor en el individuo de carga intensa, seguido por el de carga intermedia, después el de carga leve, el de carga alterada clase II y por último el de carga alterada clase III, el cual fue significativamente mayor que en el resto de los individuos (Figura 14).

La distribución de las microdeformaciones en los modelos se caracteriza por ser simétricos con respecto de la línea mediana, ubicándose principalmente en las zonas de inserción muscular (Figura 14). También se ubican en el proceso alveolar, por apical a los incisivos donde fue aplicada la fuerza, extendiéndose por lateral de la incisura nasal, por el proceso palatino del maxilar en relación a los incisivos, en la fosa mandibular (específicamente en anterior y lateral), y en la paredes medial y lateral de la órbita (Figura 14).

Desde una vista inferior, se puede apreciar que el individuo de carga intermedia posee mayor magnitud de deformación ósea que el de carga leve, sobre todo en la zona palatina en relación a los incisivos, lo cual difiere del orden general de la magnitud de las microdeformaciones entre los individuos (Figura 14).

El individuo de carga alterada clase III, como se mencionó anteriormente, difiere de forma significativa en términos de magnitud de las microdeformaciones, y por lo tanto su distribución también difiere del resto, abarcando mucho más del esqueleto craneofacial en comparación con los otros cuatro individuos. Estas diferencias se ven principalmente en la extensión de la zona del paladar óseo comprometido, siendo este mucho mayor y además de presentarse por anterior, también se ubica en la zona más posterior de este, en el hueso frontal, en el proceso cigomático del maxilar y en la pared medial de la órbita (Figura 14).

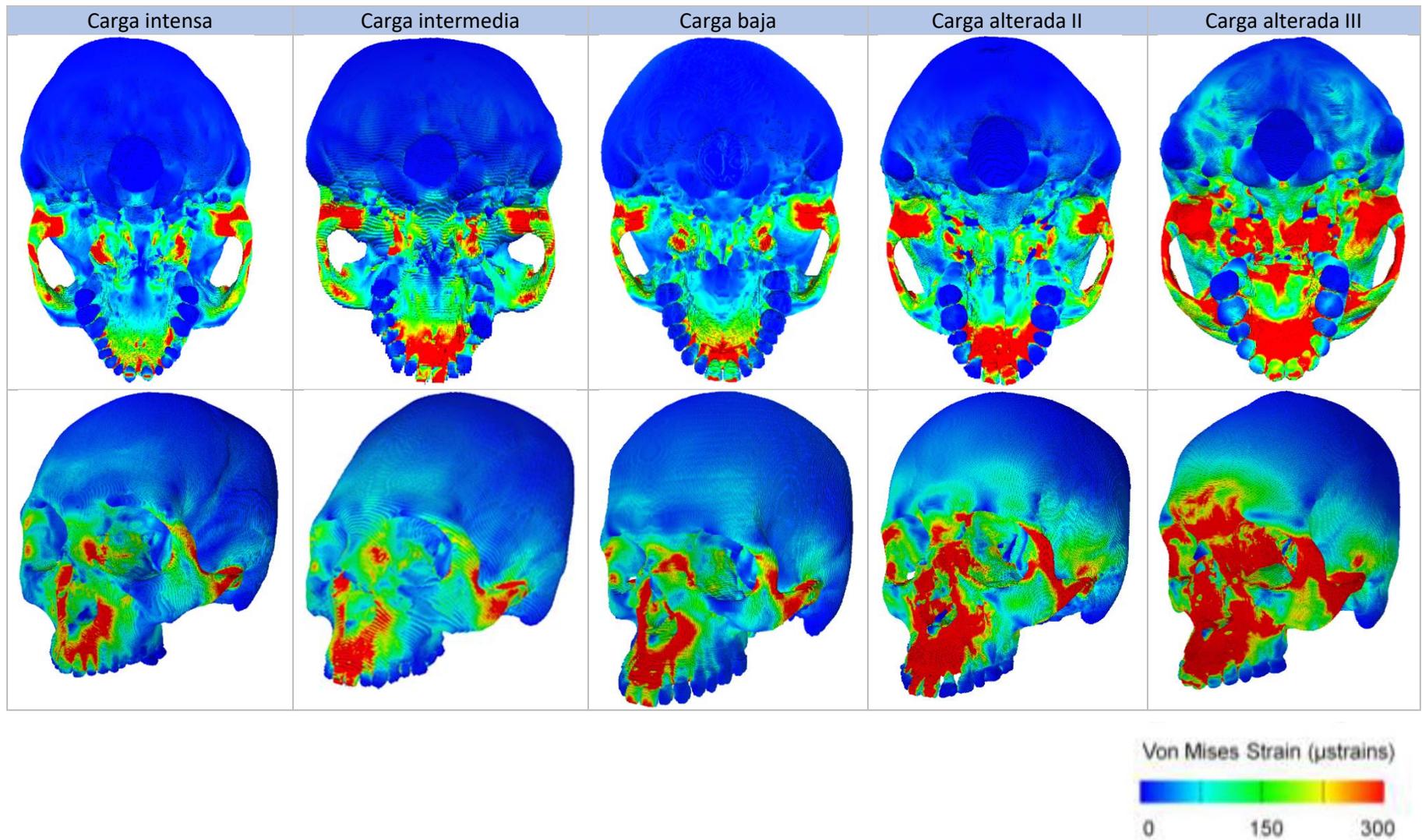


Figura 14: Diagrama de contorno de microdeformación durante la incisión (carga en los incisivos centrales superiores) desde una vista inferior y anterolateral.

## 8.2. Carga en el primer molar izquierdo:

La distribución de las microdeformaciones, al igual que en la incisión, fue muy similar entre los individuos, y la magnitud no varió tanto en los modelos como sucedió en la incisión (Figura 15).

Las zonas de altas microdeformaciones se distribuyen principalmente por las zonas en donde se insertan los músculos de la masticación, tanto en el lado de trabajo (izquierdo) como en el lado de balance (derecho), y en el proceso cigomático del maxilar del lado de trabajo, en relación al molar cargado. También se pueden apreciar zonas de altas deformaciones en la pared medial y lateral de la órbita del lado de trabajo extendiéndose hasta la unión del hueso frontal con nasal y en la fosa mandibular (Figura 15) .

Los individuos que más sufrieron microdeformaciones, en términos de magnitud, fueron los de carga alterada, específicamente el de carga alterada clase II. Aun así, la diferencia no es tan marcada entre los individuos como cuando se cargó los modelos en los incisivos (Figura 15).

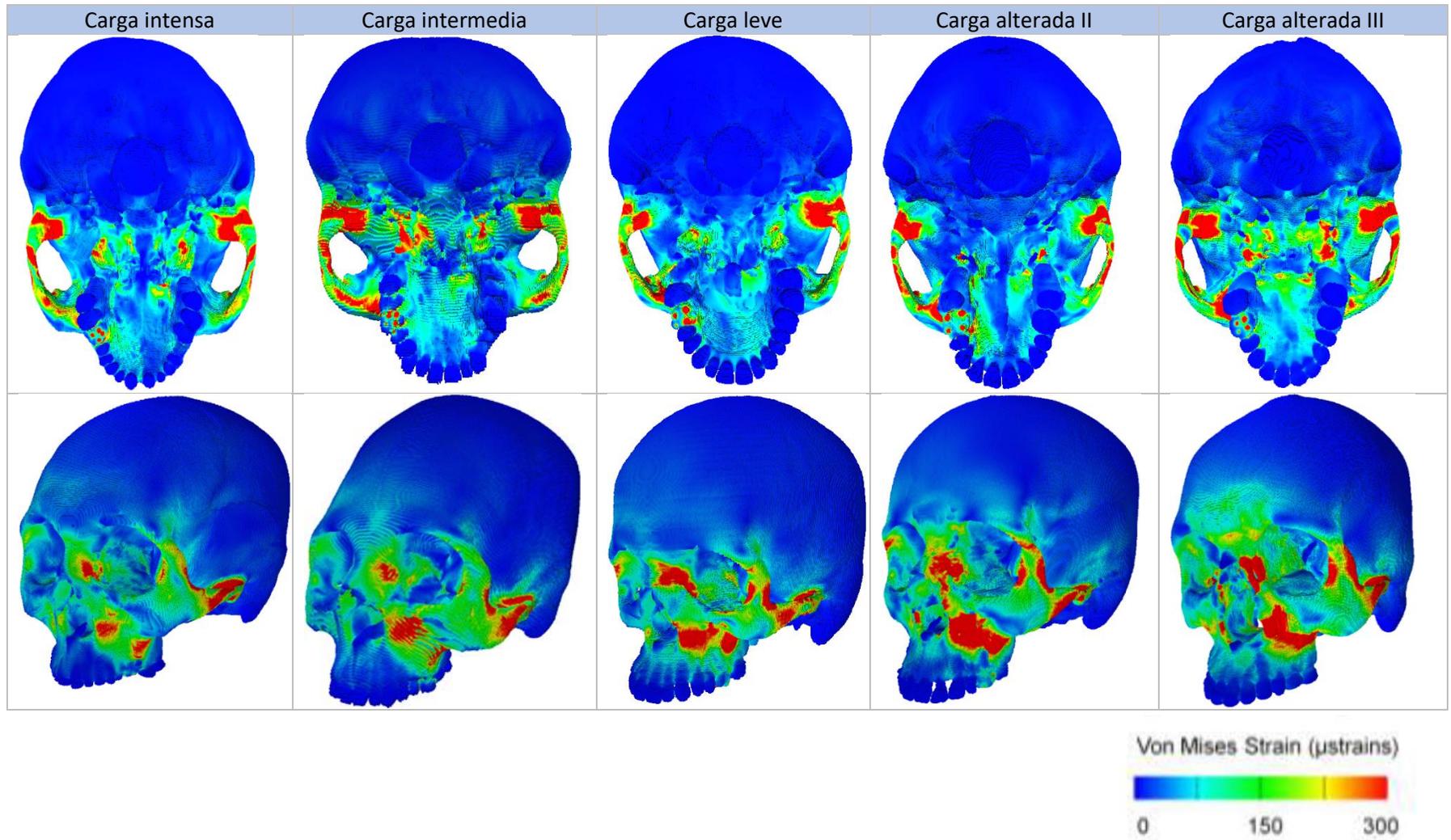


Figura 15: Diagrama de contorno de microdeformación durante la masticación (carga en el primer molar superior izquierdo) desde una vista inferior y lateral.

## 9. DISCUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo principal estudiar el efecto de la intensidad de carga masticatoria y relación maxilomandibular en la respuesta mecánica craneal. Se construyeron cinco modelos de elementos finitos de cráneos humanos de distintas intensidades de cargas masticatorias a partir de sus respectivas TCs. Los diagramas de contorno de microdeformación obtenidos en los resultados fueron comparados entre ellos para comprobar la hipótesis central del estudio, que dice que existe una relación entre la intensidad de carga masticatoria, la relación maxilomandibular y la respuesta mecánica craneal durante la oclusión dental. Esto se llevó a cabo bajo dos tipos de mordidas: la incisión y la masticación, cargando de forma separada a los modelos en los incisivos centrales superiores y en el primer molar superior izquierdo respectivamente.

Las zonas de altas microdeformaciones, como era de esperarse, se localizan en cinco áreas clave: inserciones de los músculos masticatorios, el esqueleto estrechamente relacionado con el diente cargado, las fosas mandibulares y, según la ubicación de la mordida, las estructuras óseas compactas que rodean las cavidades faciales que forman los arcos y pilares (Toro-Ibacache, 2013).

### 9.1. Incisión v/s masticación:

Lo primero que llama la atención al momento de analizar los resultados, es la notoria diferencia de microdeformaciones, en términos de magnitud, al cargar los incisivos en comparación a cuando se carga el primer molar izquierdo. En la incisión, podemos observar mayor cantidad de deformación, tanto en magnitud como en distribución, del esqueleto facial en general y espacialmente del maxilar en relación con el diente cargado, en comparación con la masticación. Esto se explica principalmente por la angulación del eje longitudinal del diente (y su hueso alveolar asociado) con respecto al plano oclusal. El primer molar se encuentra en una posición mucho más perpendicular al plano oclusal, no así el incisivo, el cual posee una angulación de 70° hacia vestibular (García Micheeksen

& Olavarria Astudillo, 2005). Esta angulación genera una palanca tipo 1, generando una mayor cantidad de cargas sobre la estructura ósea. Además de que el primer molar superior se encuentra junto al pilar cigomático, una prominencia ósea el cual forma parte de los pilares faciales, y por lo tanto es una zona de mayor resistencia capaz de disipar de forma adecuada las fuerzas. En el estudio realizado por Martin D. Gross, titulado "Análisis tridimensional de elementos finitos del esqueleto facial en la carga oclusal simulada", se cargan los modelos unilateralmente en los molares, premolares, caninos e incisivo. Los resultados muestran que a medida que se aplicaba la misma carga desde la región posterior a la anterior, los valores de microdeformaciones aumentaron en todas las áreas faciales.

## 9.2. Morfología facial y rendimiento mecánico:

Los individuos analizados difieren en su estrategia de sobrevivencia, y con ello, la consistencia de sus alimentos. Los individuos de carga intensa e intermedia son de poblaciones arqueológicas, los cuales ingerían alimentos con un mayor requerimiento mecánico por parte de la estructura ósea, articular y muscular. El individuo de carga intensa pertenece a poblaciones cazadores-recolectores, caracterizándose por ser nómades, basando su subsistencia en la caza de animales y recolección de frutos, semillas y/o mariscos (Bernal et al., 2006; Kelly, 1983). El individuo de carga intermedia pertenece a una población de agricultores, en donde la dieta es levemente más procesada que el individuo de carga intensa, ya que eran capaces de cultivar y procesar química y mecánicamente sus alimentos, junto con el aumento de consumo de hidratos de carbono, legumbres, vegetales, entre otros (González-José et al., 2005; Planella et al., 2014). Estos dos individuos sufrieron menos cantidad de microdeformaciones que el resto (el de carga intensa menos que el de carga intermedia) debido a que su estructura ósea es más robusta y las cargas que actúan sobre el hueso son resistidas, y las microdeformaciones generadas están dentro o sobre el rango de mantención de la masa ósea (Frost, 1987). Esto podría deberse a su economía de subsistencia, sin embargo, otros factores no pueden descartarse. Eyquem, en un estudio que utilizó la misma

muestra a partir de la cual se obtuvo la seleccionada para la presente tesis, observó que la carga masticatoria afectaría la forma craneal en cierto grado, pero este no es el único factor influyente en la morfología ósea. Eyquem, al estudiar la maxila de manera aislada, observó que se puede notar una mayor interferencia de la carga masticatoria en la forma, que cuando se analiza la forma craneal en general. Esto indicaría que hay otros factores que estarían contribuyendo en la forma de la cara, como por ejemplo la ancestría, adaptación y las deficiencias nutricionales. Un ejemplo de esto son los grupos agricultores (carga intermedia) en donde existían menos variedades de alimentos, las alimentaciones eran muy desiguales entre la población y al estar conviviendo todos juntos, existía un mayor contagio de enfermedades.

Estos individuos, presentan además, maxilares más verticales y de menor longitud en anterior en comparación con el resto de los individuos (carga leve y alterada). Es por esto que cuando las fuerzas que inciden de forma vertical en las caras oclusales e incisales de los molares e incisivos respectivamente, coincidan con la angulación vertical que posee el maxilar.

Por el contrario, los individuos de carga leve y alterada poseen una estructura ósea más pequeña y grácil, y sufren una mayor cantidad de microdeformaciones, tanto en magnitud como en distribución al estar bajo del rango de mantención de Frost. Estos individuos basan su alimentación en alimentos industriales altamente procesados (Monteiro et al., 2010; Smith, 1984), y por lo tanto poseen una cara de menor de tamaño, tanto en sentido anteroposterior y vertical de la cara, de los dientes, músculos masticatorios, diferencia en la flexión de la base de cráneo y forma del neurocráneo (Lieberman, 2008, 2011).

El individuo de carga leve, el cual tiene una relación maxilomandibular adecuada, posee menos deformación ósea que los de carga alterada, siendo este más similar a los de carga intensa e intermedia, ya que este posee una anatomía armónica que permite disipar de forma correcta las fuerzas a través de los arcos y pilares. Esto no ocurre con los individuos de carga alterada, los cuales poseen relaciones maxilomandibulares alteradas, utilizando para masticar, zonas que

normalmente no deberían ser cargadas o que deberían ser cargadas en menor medida. Por consecuencia de esto, la estructura ósea sufre de muchas zonas de alta deformación ya no son capaces de disipar correctamente las cargas.

En el caso del individuo de carga alterada clase III, el cual destaca en gran medida por sobre los otros individuos por su cantidad de microdeformaciones en la zona del maxilar con respecto a los incisivos cargados (en la incisión), se puede inferir que esto ocurre porque esta zona no es cargada usualmente para la incisión debido a la posición prognática de la mandíbula y/o retrognasia del maxilar. Esto hace que la estructura ósea sea atrófica y débil, siendo esta más propensa a las deformaciones óseas ante las cargas. Además de que su anatomía se caracteriza por tener una mayor longitud del maxilar con respecto a los otros individuos y un perfil cóncavo, siendo esta la característica anatómica más variada con respecto a los otros individuos de carga leve y alterada II (Eyquem, 2018). Debido a su alterada anatomía, las fuerzas que inciden verticalmente sobre el maxilar en la incisión hacen que este se flecte sobre sí mismo y por lo tanto sufra deformaciones óseas.

En la masticación, la magnitud no varía mucho entre los individuos. Esto se debe a que la anatomía en relación al primer molar superior no varía tanto entre ellos, siendo el maxilar en esta zona vertical, al igual que la dirección de las fuerzas aplicadas.

### 9.3. Inserciones musculares:

Durante la incisión se realizan movimiento de apertura y cierre con la mandíbula en una posición protruida. Esto se lleva a cabo por la acción coordinada y bilateral de los músculos masticatorios, específicamente por el pterigoideo lateral, el milohioideo y el vientre anterior del digástrico en apertura, por el masetero, temporal y pterigoideo medial en cierre y por los pterigoideos mediales y laterales para la posición protruida de la mandíbula. Esto explica la ubicación de las zonas de alta microdeformación en la zona de las inserciones musculares en los modelos,

los cuales tienen en común su distribución. La fuerza muscular y la morfología del esqueleto están relacionadas a través del proceso de remodelación ósea. Durante la contracción, los músculos tensan directamente el hueso donde insertan y aplican cargas (Toro-Ibacache et al., 2016).

Algo similar ocurre con la masticación, pero con la diferencia de que este tipo de mordida es mucho más compleja, ya que no ocurre de forma simétrica como en el caso de la incisión, sino que es unilateral (lado de trabajo) con movimientos en los tres sentidos del espacio por parte de la mandíbula. Debido a esto, las zonas de altas microdeformaciones en la masticación no son simétricas con respecto a la línea media. A pesar de esto, se pueden observar zonas de alta microdeformaciones (pero en menor medida) en el lado de balance en las inserciones de los músculos masticatorios, ya que combina la fuerza de los músculos de ambos lados (lado de trabajo y de balance) para llevar a cabo esta acción (Lieberman, 2011).

#### 9.4. Limitaciones e implicancias odontológicas

Es importante mencionar que estos resultados indican un patrón de deformación ósea que no necesariamente se repetirá de forma exacta en todas las personas de características similares. Es decir que, por ejemplo, si se cargan a múltiples individuos de clase III, estos no necesariamente responderán de la misma forma, es más, pueden diferir de gran manera dependiendo de sus características anatómicas y óseas. Esto ocurre debido a diversos factores tales como la calidad y cantidad ósea, la anatomía de cada individuo (por ejemplo una clase III puede ser por retrognasia del maxilar o por una prognasia verdadera de la mandíbula, difiriendo en gran medida en su estructura ósea), estado nutricional del paciente, entre otros. De esta afirmación, nace una limitación de este estudio, ya que la muestra es pequeña (debido a la complejidad de la construcción de modelos), no permitiendo determinar una relación significativa entre el tipo de carga de los individuos y la magnitud y distribución de las microdeformaciones óseas. Sin embargo, en la literatura existen diversos estudios en humanos que muestran que

hay una conservación de las estructuras que se ven afectadas en términos de microdeformaciones óseas (Gross, Arbel, & HersHKovitz, 2001; Toro-Ibacache, 2013; Toro-Ibacache et al., 2016; Toro-Ibacache & O'Higgins, 2016), por lo que los resultados obtenidos aquí deberían ser suficientemente representativos para los objetivos del estudio.

Mas allá de estas limitaciones, este estudio es sumamente relevante para diversas áreas en la odontología como la implantología, cirugía, ortodoncia y rehabilitación, ya que aporta información fundamental para la planificación y el pronóstico de los diferentes tratamientos a los cuales pueden ser sometidos los pacientes ante por ejemplo: correcciones de relaciones maxilomandiulares, tanto de forma quirúrgica como con ortodoncia, traumas, tratamientos rehabilitadores, etc. Se puede obtener información como las áreas de mayor y menor resistencia mecánica del tejido ósea en los distintos tipos de relaciones maxilomandibulares y ayuda a predecir como se comportará el hueso ante las distintas cargas a la cual puede ser sometidas en las variadas intervenciones aplicadas en cada especialidad, o como puede verse afectada la articulación temporomandibular en oclusiones con relaciones oclusales deficientes.

Otra relevancia que tiene este estudio es la línea de investigación con la cual se puede continuar. Este estudio fue realizado con individuos de fenotipo amerindio/mongoloide y mestizo, sin incluir grupos africanos ni europeos (Eyquem, 2018). En Chile, en los últimos años, ha habido un importante aumento de inmigrantes de individuos de Colombia, Haití y Venezuela (países con un importante componente genético africano) (DEM, 2017), lo que en futuros años se verá reflejado en el cambio en la morfología ósea de la población chilena en general. Para trabajos futuros sería interesante evaluar como la estructura ósea de grupos africanos se comporta ante las cargas masticatorias, para así poder predecir como el cambio poblacional afectará en la respuesta ósea ante las diversas cargas aplicadas (como fisiológicas, terapéuticas, traumáticas, etc) de los chilenos.

## 10. CONCLUSIÓN

- Se aprueba parcialmente la hipótesis planteada, ya que la respuesta mecánica no difiere en gran medida en individuos con distintos patrones de carga masticatoria, a menos que el mismo patrón genere una debilidad estructural, como es el caso del prognatismo mandibular
- En el maxilar, de manera aislada, hay una mayor interferencia de la carga masticatoria en la forma que en la forma craneal en general.
- No solo la carga masticatoria tiene incidencia en el cambio de la morfología de la estructura craneofacial, sino que hay otros factores no pueden descartarse, como por ejemplo la ancestría, cambios plásticos del hueso ante otras variables ambientales y las deficiencias nutricionales.
- Las zonas de altas microdeformaciones, se localizan en cinco áreas clave: inserciones de los músculos masticatorios, el esqueleto estrechamente relacionado con el diente cargado, las fosas mandibulares y, según la ubicación de la mordida, las estructuras óseas compactas que rodean las cavidades faciales que forman los arcos y pilares.
- El individuo de carga alterada clase III es el que más difiere del resto en términos de magnitud de microdeformaciones debido a su alterada anatomía e inadecuada relación maxilomandibular.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Agrawal, K., Lucas, P., Prinz, J., & Bruce, I. (1997). Mechanical Properties of Foods Responsible for Resisting Food Breakdown in the Human Mouth. *Archives of Oral Biology*, 42(1), 1-9.
- Bellido, T. (2014). Osteocyte-Driven Bone Remodeling. *Calcified tissue international*, 94(1), 25-34.
- Bernal, V., Perez, S. I., & Gonzalez, P. N. (2006). Variation and Causal Factors of Craniofacial Robusticity in Patagonian Hunter-Gatherers from the Late Holocene. *American Journal of Human Biology*, 18(6), 748-765.
- Carlson, B. M. (2005). *Embriología Humana y Biología del Desarrollo*. Barcelona, España: Elsevier.
- Corruccini, R. S. (1984). An Epidemiologic Transition in Dental Occlusion in World Populations. *American journal of orthodontics*, 86(5), 419-426.
- Donat, T. L., Endress, C., & Mathog, R. H. (1998). Facial Fracture Classification According to Skeletal Support Mechanisms. *Journal of Otolaryngology - Head & Neck Surgery*, 124(12), 1306-1314.
- El-Zaatari, S. (2010). Occlusal Microwear Texture Analysis and the Diets of Historical/Prehistoric Hunter-Gatherers. *International Journal of Osteoarchaeology*, 20(1), 67-87.
- Enlow, D. H. (1966). A Morphogenetic Analysis of Facial Growth. *American journal of orthodontics*, 52(4), 283-299.
- Eyquem, A. (2018). *Efecto de la Intensidad Masticatoria en la Forma Craneal en Poblaciones Arqueológicas y Modernas de Chile y Argentina*. (Título Profesional de Antropología con mención en Antropología Física), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Fagan, M. J., Curtis, N., Dobson, C. A., Karunanayake, J. H., Kitpczik, K., Moazen, M., . . . O'Higgins, P. (2007). Voxel-based Finite Element Analysis-working Directly with MicroCT Scan Data. *Journal of Morphology*, 268(12), 1071-1071.
- Farias Gomes, Guimarães, S., Custodio, W., Moura Jufer, J. S., Del Bel Cury, A. A., & Rodrigues Garcia, R. C. M. (2010). Correlation of Mastication and Masticatory Movements and Effect of Chewing Side Preference. *Brazilian dental journal*, 21(4), 351-355.
- Fitton, L. C., & PrôA, M. R., Charlie; Toro-ibacache, Viviana; O'higgins, Paul. (2015). The Impact of Simplifications on the Performance of a Finite Element Model of a Macaca Fascicularis Cranium. *The Anatomical Record*, 298(1), 107-121.
- Foster, K. D., Woda, A., & Peyron, M.-A. (2006). Effect of Texture of Plastic and Elastic Model Foods on the Parameters of Mastication. *Journal of Neurophysiology*, 95(6), 3469-3479.
- Frost, H. M. (1987). Bone "Mass" and the "Mechanostat": a Proposal. *The Anatomical Record*, 219(1), 1-9.
- Garcia Micheeksen, J. L., & Olavarria Astudillo, L. E. (2005). *Diseño de Prótesis Parcial Removible*.
- González-José, R., Ramírez-Rozzi, F., Sardi, M., Martínez-Abadías, N., Hernández, M., & Pucciarelli, H. M. (2005). Functional-Cranial Approach to the Influence

- of Economic Strategy on Skull Morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 128(4), 757-771.
- Gross, M. D., Arbel, G., & Hershkovitz, I. (2001). Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Facial Skeleton on Simulated Occlusal Loading. *Journal of oral rehabilitation*, 28(7), 684-694.
- Ingber, D. E. (2006). Cellular Mechanotransduction: Putting all the Pieces Together Again. *The FASEB journal*, 20(7), 811-827.
- Kelly, R. L. (1983). Hunter-Gatherer Mobility Strategies. *Journal of anthropological research*, 39(3), 277-306.
- Kupczik, K. (2008). Virtual Biomechanics: Basic Concepts and Technical Aspects of Finite Element Analysis in Vertebrate Morphology. *Journal of Anthropological Sciences*, 86(4), 193-198.
- Lieberman, D. (2008). Speculations About the Selective Basis for Modern Human Craniofacial Form. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 17(1), 55-68.
- Lieberman, D. (2011). *The Evolution of the Human Head*: Harvard University Press.
- Liu, J., Shi, J., Fitton, L. C., Phillips, R., O'Higgins, P., & Fagan, M. J. (2012). The Application of Muscle Wrapping to Voxel-Based Finite Element Models of Skeletal Structures. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 11(1-2), 35-47.
- Marcían, P., Wolff, J., Horáčková, L., Kaiser, J., Zikmund, T., & Borák, L. (2018). Micro Finite Element Analysis of Dental Implants Under Different Loading Conditions. *Computers in biology and medicine*.
- Martínez-Abadías, N., Paschetta, C., de Azevedo, S., Esparza, M., & González-José, R. (2009). Developmental and Genetic Constraints on Neurocranial Globularity: Insights From Analyses of Deformed Skulls and Quantitative Genetics. *Evolutionary Biology*, 36(1), 37-56.
- Martinez-Maza, C., Rosas, A., & Nieto-Díaz, M. (2013). Postnatal Changes in the Growth Dynamics of the Human Face Revealed from Bone Modelling Patterns. *Journal of anatomy*, 223(3), 228-241.
- Meruane, M., Smok, C., & Rojas, M. (2012). Face and Neck Development in Vertebrates. *International Journal of Morphology*, 30(4), 1373-1388.
- Mitteroecker, P., & Bookstein, F. (2008). The Evolutionary Role of Modularity and Integration in the Hominoid Cranium. *Evolution: International Journal of Organic Evolution*, 62(4), 943-958.
- Monteiro, C. A., Levy, R. B., Claro, R. M., Castro, I. R. R. d., & Cannon, G. (2010). A New Classification of Foods Based on the Extent and Purpose of Their Processing. *Cadernos de saude publica*, 26(11), 2039-2049.
- Morales, C. (2018). *Morfología de la Sección Transversal Mandibular en Poblaciones Actuales y Arqueológicas que Ejercen Distintas Intensidades de Cargas Masticatorias de Acuerdo a su Dieta*. (Trabajo de investigación requisito para optar al título de cirujano dentista), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Morales, N., & Toro-Ibacache, V. (2018). La Transición a la Agricultura y la Industrialización Cambiaron la Cara del Ser Humano. ¿Puede el Vegetarianismo ser un Nuevo Factor de Cambio?. Revisión de la Literatura. *International Journal of Morphology*, 36(1), 35-40.

- Moss, M. L., & Young, R. W. (1960). A Functional Approach to Craniology. *American Journal of Physical Anthropology*, 18(4), 281-292.
- Netter, F. H. (1989). *Netter-Atlas de Anatomía Humana*. Barcelona, España: Editorial MASSON.
- Opperman, L. A. (2000). Cranial Sutures as Intramembranous Bone Growth Sites. *Developmental dynamics*, 219(4), 472-485.
- Planella, M. T., Falabella, F., Belmar, C., & Quiroz, L. (2014). Huertos, Chacras y Sementeras. Plantas Cultivadas y su Participación en los Desarrollos Culturales de Chile Central. *Revista Española de Antropología Americana*, 44(2), 495.
- Prados-Privado, M., Prados-Frutos, J. C., Calvo-Guirado, J. L., & Bea, J. A. (2016). A Random Fatigue of Mechanize Titanium Abutment Studied with Markoff Chain and Stochastic Finite Element Formulation. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 19(15), 1583-1591.
- Rayfield, E. J. (2007). Finite Element Analysis and Understanding the Biomechanics and Evolution of Living and Fossil Organisms. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 35(1), 541-576.
- Richmond, B. G., Wright, B. W., Grosse, I., Dechow, P. C., Ross, C. F., Spencer, M. A., & Strait, D. S. (2005). Finite Element Analysis in Functional Morphology. *The Anatomical Record*, 283(2), 259-274.
- Rouvière, H., Delmas, A., & Delmas, V. (1987). *Anatomía Humana: Descriptiva, Topográfica y Funcional* (Vol. 1). Barcelona, España: Editorial MASSON.
- Sadler, T. W. (2011). *Langman's Medical Embryology*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Sarig, R., Slon, V., Abbas, J., May, H., Shpack, N., Vardimon, A. D., & Hershkovitz, I. (2013). Malocclusion in Early Anatomically Modern Human: a Reflection on the Etiology of Modern Dental Misalignment. *PloS one*, 8(11), e80771.
- Smith, B. H. (1984). Patterns of Molar Wear in Hunter–Gatherers and Agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology*, 63(1), 39-56.
- Sperber, G. H., Sperber, G. H., Guttman, G. D., Sperber, S. M., & Gutterman, G. D. (2001). *Craniofacial Development (book for windows & macintosh)* (Vol. 1): PMPH-USA.
- Stedman, H. H., Kozyak, B. W., Nelson, A., Thesier, D. M., Su, L. T., Low, D. W., . . . Mitchell, M. A. (2004). Myosin Gene Mutation Correlates with Anatomical Changes in the Human Lineage. *Nature*, 428(6981), 415.
- Stringhini, D. J., Sommerfeld, R., Uetanabaro, L. C., Leonardi, D. P., Araújo, M. R., Rebellato, N. L. B., . . . Scariot, R. (2016). Resistance and Stress Finite Element Analysis of Different Types of Fixation for Mandibular Orthognathic Surgery. *Brazilian dental journal*, 27(3), 284-291.
- Teaford, M. F., & Ungar, P. S. (2000). Diet and the Evolution of the Earliest Human Ancestors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(25), 13506-13511.
- Toro-Ibacache, V. (2013). *A Finite Element Study of the Human Cranium; The Impact of Morphological Variation on Biting Performance*. (PhD in Medical Sciences), The University of Hull and the University of York,
- Toro-Ibacache, V., Muñoz, V. Z., & O'Higgins, P. (2016). The Relationship Between Skull Morphology, Masticatory Muscle Force and Cranial Skeletal

- Deformation During Biting. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 203(1), 59-68.
- Toro-Ibacache, V., & O'Higgins, P. (2016). The Effect of Varying Jaw-elevator Muscle Forces on a Finite Element Model of a Human Cranium. *The Anatomical Record*, 299(7), 828-839.
- Van der Bilt, A., Engelen, L., Pereira, L., Van der Glas, H., & Abbink, J. (2006). Oral physiology and mastication. *Physiology behavior*, 89(1), 22-27.
- Van Spronsen, P. (2010). Long-Face Craniofacial Morphology: Cause or Effect of Weak Masticatory Musculature? *Seminars in Orthodontics*, 16(2), 99-117.
- Wilkie, A. O., & Morriss-Kay, G. M. (2001). Genetics of craniofacial development and malformation. *Nature Reviews Genetics*, 2(6), 458.

## 12. ANEXO

Anexo 1: Acta de aprobación del Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile.



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA  
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS



04 ENE 2016

### ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO

FECHA: 04 de enero de 2016.

**PROYECTO: "THE ROLE OF MASTICATORY LOAD INTENSITY AND DENTAL OCCLUSAL RELATIONSHIPS IN SHAPING THE MODERN HUMAN SKULL" (EL ROL DE LA INTENSIDAD DE LA CARGA MASTICATORIA Y LAS RELACIONES OCLUSALES DENTALES EN LA FORMA CRANEOFACIAL HUMANA MODERNA)** (Fondecyt Iniciación a la Investigación)

Investigadora Responsable: **Dra. Viviana Toro-Ibacache**, quien desempeña sus labores en la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile.

Con fecha 22 de Diciembre de 2015, el proyecto ha sido analizado a la luz de los postulados de la Declaración de Helsinki, de la Guía Internacional de Ética para la Investigación Biomédica que involucra sujetos humanos CIOMS 1992, y de las Guías de Buena Práctica Clínica de ICH 1996.

Sobre la base de la información proporcionada en el texto del proyecto el Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, estima que el estudio propuesto está bien justificado y que no significa para los sujetos involucrados riesgos físicos, psíquicos o sociales mayores o mínimos.

Cuenta con autorización de las siguientes autoridades para la adquisición de imágenes y uso de base de datos anonimizadas.

Director prof. Dr. Jean-Jacques HUBLIN, Director, Department of Human Evolution, Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie. (Institución Secundaria).

Prof. Dr. Lui Quevedo, ICOR, Instituto de Cirugía – Ortodoncia. Rehabilitación Oral y Maxilo Facial (base de datos de imágenes de tomografías computarizadas preoperatorias de pacientes ICOR)

Sebastián Krapivka F., Encargado de Colecciones Bioantropológicas, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile (base de datos de resacas del Cementerio General de Santiago)

En virtud de las consideraciones anteriores el Comité otorga la aprobación ética para la realización del estudio propuesto, dentro de las especificaciones del protocolo.



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA  
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS



04 ENE. 2016

INTEGRANTES DEL COMITÉ DE ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN  
EN SERES HUMANOS

NOMBRE	CARGO	RELACION CON LA INSTITUCION
Dr. Manuel Oyarzún	Presidente	Sí
Prof. Gina Raineri	Secretaria Ejecutiva	Sí
Dr. Hugo Amigo	Miembro	Sí
Dra. Lucía Cifuentes	Miembro	Sí
Dra. María Eugenia Pinto	Miembro	Sí
Dra. María Angela Delucchi	Miembro	Sí
Dra. Grisel Orellana	Miembro	Sí
Prof. Ma. Julieta González	Miembro	Sí
Sra. Claudia Marshall	Miembro	No
Dr. Miguel O' Ryan	Miembro Suplente	Sí

Santiago, 04 de enero de 2016.

  
 Dr. Manuel Oyarzún Gómez  
 PRESIDENTE CEISH

MOG/om.  
 Proyecto N° 203-2015  
 mtoroibacache@odontologia.uchile.cl