



Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Odontología

Departamento de Estomatología IV

(Profilaxis, Odontopediatría y Ortodoncia)

Aplicación de sistemas tridimensionales en Odontopediatría

MÁSTER EN CIENCIAS ODONTOLÓGICAS

Trabajo de Investigación

Autora: M^a Begoña Gómez Legorburu

Tutora: Dra. Paloma Planells del Pozo

A amama y aitite.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que directa o indirectamente han participado en la consecución de este trabajo de investigación:

A la doctora Paloma Planells, mi tutora, por su paciencia, disposición absoluta siempre. Por hacerme ver que no hay que poner barreras a nada y alentarme en todo momento.

Al doctor José Ramón Mérida, por saber encauzar el proyecto, sus conocimientos en anatomía y embriología, tan bien transmitidos y por su increíble simpatía.

A la empresa Desarrollos Informáticos Abadía, en especial a Juanjo y Marco, por proporcionarme el programa Amira y por su paciencia y disposición a la hora de enseñarme a trabajar en el mundo virtual.

A mis profesores del Máster de Ciencias Odontológicas, que han sabido enseñarme que hay algo más detrás de la práctica odontológica, y transmitirme la importancia de la labor investigadora y el rigor científico.

A mis compañeros del Máster de Ciencias Odontológicas, con los que he compartido estos estudios tan alejados de la práctica a la que estamos habituados.

A mi madre y hermano, que siempre han comprendido que este era el momento, y siempre han sabido ayudarme.

A mis amigos y compañeros de clínica, por su ayuda y comprensión.

ÍNDICE

1.-INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN **1**

2.-ANTECEDENTES DEL TEMA **5**

2.1. Conceptos básicos y generales sobre la informática	6
2.1.1. Antecedentes históricos de de la informática	7
2.1.2. Generación de computadoras	8
2.2. Informática aplicada a la docencia médica	10
2.3. Bases embriológicas y anatómicas en el área orofacial	12
2.3.1. Crecimiento y desarrollo de las arcadas	12
2.3.1.1. Desarrollo de la cara	12
2.3.1.2. Desarrollo de la mandíbula	15
2.3.2. Anatomía del macizo maxilofacial	20
2.3.2.1. La mandíbula	20
2.3.2.1.1. Cuerpo	21
2.3.2.1.2. Ramas de la mandíbula	22
2.4. Desarrollo y erupción dentaria	24
2.4.1. Lámina dentaria	25
2.4.2. Lámina vestibular	25
2.4.3. Estadíos de desarrollo y maduración dentaria	26
2.4.3.1. Estadío de brote	26
2.4.3.2. Estadío de casquete	26
2.4.3.3. Estadío de campana	27
2.4.3.4. Formación de los tejidos duros	28
2.4.3.5. Formación de la raíz	30
2.4.4. Determinación del patrón dentario	30
2.4.5. El fenómeno eruptivo	32
2.4.6. Erupción de la dentición temporal	33

3.-HIPÓTESIS DE TRABAJO **34**

4.-OBJETIVOS **36**

5.-MATERIAL Y MÉTODO **38**

Limitaciones de nuestro estudio	40
---------------------------------	----

<u>6.-RESULTADOS</u>	<u>41</u>
<u>7.-DISCUSIÓN</u>	<u>48</u>
<u>8.-CONCLUSIONES</u>	<u>57</u>
<u>9.- BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>59</u>
<u>10.- ANEXO</u>	<u>65</u>

1.- INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Es bien sabido por todos que hoy en día la informática está presente en todos los ámbitos. No somos capaces de concebir un campus universitario sin su área informática, ni a un docente sin su soporte virtual como apoyo y mejora de sus lecciones. No obstante, la informática avanza a pasos agigantados y cada vez nos ofrece unas posibilidades más amplias y desconocidas.

Con la llegada de esta era digital, la obtención de una base de datos digital del cuerpo humano se hace imprescindible. No obstante la digitalización del cuerpo humano es bastante compleja.(1) Dada esta necesidad, surge el concepto de “*Virtual Human*”, como modelo interactivo digital que integra características anatómicas, fisiológicas y biomecánicas del cuerpo humano. En función del desarrollo de la base de datos con la que se trabaje, se podrán obtener archivos anatómicos, fisiológicos o funcionales de mayor complejidad. Estos estados de desarrollo se dividen en tres generaciones: El “Visible Human”, “Physical Human” y “Physiological Human”. La primera generación permite la visualización de estructuras anatómicas en tres dimensiones, mientras que las otras dos tratarán de reproducir las características físicas y fisiológicas del cuerpo humano, necesitando una tecnología más compleja.(2)

El desarrollo del “*Visible Human Project*” (VHP) a finales de los años 80, por parte de la Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos, ha permitido obtener una galería de imágenes digitales procedentes de cadáver (un hombre y una mujer) que incluyen secciones digitalizadas de criosecciones, imágenes de tomografía computarizada e imágenes de resonancia magnética nuclear. (3) Este proyecto ha sido el punto de partida de un nuevo concepto, la enseñanza virtual en el campo de la anatomía, que ofrece ventajas considerables respecto a la enseñanza convencional sobre cadáveres humanos conservados en medios específicos. Estas disecciones, dependen de donaciones que suelen ser escasas, caras y perecederas.

Además, las reconstrucciones tridimensionales de forma tridimensional son muy precisas, permitiendo al estudiante la visualización de cualquier órgano en todos los planos del espacio, sus relaciones... No es extraño por tanto, que desde su difusión a través de la base de datos creada por el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado , en diciembre de 1995, el VHP esté siendo utilizado por estudiantes, profesores, grupos industriales en más de una centena de países.(1, 2)

En el año 2000, la Universidad de Ajou en Corea y el Instituto Coreano de Ciencias y Tecnología de la Información comenzó el proyecto del “*Visible Korean Human*” (VHK), que finalizaría en el año 2005, a partir de un cadáver de un paciente de 33 años de edad que murió leucemia.(1, 4-6) Dado que China tiene el mayor índice de población en el mundo, en 2001 en la 174 Conferencia Científica de Xiangshan, surgió la idea de crear un “*Chinese Visible Human*”, mediante la creación de una base digital de imágenes de un hombre y una mujer adultos, representativos de la raza asiática. La obtención del varón adulto concluyó en 2002, mientras que la de la mujer en 2003. (1, 2)

En Alemania, el Centro Médico Universitario de Hamburgo- Eppendorf creó el “*Voxel Man*”, una base de datos anatómica con imágenes tridimensionales de alta resolución, con aplicaciones en simulaciones quirúrgicas y modelos corporales virtuales a partir de las imágenes del varón del visible human.(2, 7)

La planificación de las enseñanzas de Grado de Odontología en la Universidad Complutense se organiza en cinco módulos, divididos en materias. Siguiendo las directrices del Consejo de Gobierno de la Universidad Complutense de Madrid, las materias se dividirán a su vez en asignaturas. Así, el Grado de Odontología tendrá una duración de 300 créditos europeos, de los cuales 60 corresponden a Materias Básicas, de los cuales 36 corresponden a materias básicas de la rama de Ciencias de la Salud y los 24 restantes, corresponden a materias propias de la titulación. Del resto de ECTS del Grado, 174 son Materias Obligatorias, 36 son Optativas, 24 corresponden a prácticas tuteladas y 6 al trabajo fin de grado.

Entre las materias básicas de la rama de ciencias de la salud (36 ECTS), se incluye anatomía, perteneciente al primero de los cinco módulos: Ciencias Biomédicas básicas relevantes para la Odontología), con un total de 6 ECTS, que se impartirá en el primer curso. La Odontopediatría se incluye dentro del cuarto módulo: Terapéutica y Rehabilitación Odontológica, contando con 18 ECTS, divididos en dos cursos, tercero, con 6 ECTS y cuarto con 12 ECTS.

La implantación del nuevo modelo de Grado se va a ir realizando paulatinamente, de ahí que en el curso académico 2011-2012 se impartirá hasta el tercer curso, y en curso 2012-2013 hasta el cuarto, siendo necesario, que la asignatura de Odontopediatría se adapte al nuevo modelo.

Tomando como punto de partida los proyectos de “Virtual Human”, y la necesidad de una nueva educación adaptada a las nuevas tecnologías, surgió la idea de crear este Proyecto de Investigación, basado en un modelo virtual de un sujeto en edad infantil. Para ello proponemos la creación de un modelo tridimensional de una mandíbula de una paciente en crecimiento que sirva como instrumento educativo en el Ámbito de la Anatomía, Odontopediatría y Operatoria Dental.

2.- ANTECEDENTES DEL TEMA

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALES SOBRE LA INFORMÁTICA

El origen del término “Informática” surge de la fusión de los términos INFORMación y autoMÁTICA. Entre las definiciones existentes, podemos reseñar las siguientes:

- La informática es la “ciencia” que se encarga del tratamiento automático de la información. Para ello utiliza una herramienta, el ordenador. (8).
- La informática es el conjunto de conocimientos científicos y técnicas que hacen posible el tratamiento automático y racional de la información por medio de los ordenadores.(9)

El área informática más extendida es la denominada informática de usuario, centrada en el uso de un programa por parte de un usuario para desempeñar una tarea específica mediante ordenadores personales o PC.

La informática como ingeniería se ocupa de la arquitectura de los ordenadores, es decir, de su diseño (ingeniería de sistemas) y de cómo se deben desarrollar las grandes aplicaciones informáticas (ingeniería de software). También entran dentro del campo de la informática las tareas consistentes en escribir programas concretos que realicen tareas específicas (programación de aplicaciones).

En la actualidad la informática se sustenta en tres pilares básicos:

1. El elemento físico o *Hardware*, consistente en todos los dispositivos que tienen entidad física y componen el sistema informático, como el propio computador, cualquier periférico, cables...
2. El elemento lógico o *Software* que proporciona al *Hardware* la capacidad de realizar cualquier tipo de trabajo.
3. El elemento humano o *Personal Informático* que sería el conjunto de personas encargadas de poner en funcionamiento el *Hardware* y *Software* para cumplir unos determinados objetivos y resolver necesidades.(9, 10)

2.1.1. Antecedentes históricos de la informática

Desde el punto de vista histórico, el término “informática” surge en Francia, en los años sesenta, y como su nombre indica, se ocupa de proporcionar ayuda en tareas en las que predomina el manejo de la información.

La utilización de métodos de ayuda en la realización de cálculos se remonta a más de 4000 años, cuando se empezaron a utilizar muescas en un trozo de madera o de piedra para llevar la contabilidad en el intercambio de productos. Uno de los instrumentos de cálculo más antiguos que se conoce es el ábaco, empleado por los romanos en el siglo IV a.C., aunque los chinos ya utilizaban un contador basándose en bolas hacia el siglo IX a.C. (10, 11)

En el siglo XVII, varios matemáticos diseñaron e incluso llegaron a construir máquinas que realizaban operaciones aritméticas elementales. W. Schickard construyó en 1624 la primera máquina capaz de realizar sumas y restas de forma automática. El matemático B. Pascal desarrolló en 1645 su máquina aritmética que realizaba las mismas funciones por procedimientos más complejos. Estas primeras calculadoras mecánicas fueron diseñadas con fines de investigación, sin la intención de que tuvieran una aplicación útil. (10, 11)

La primera aparición de una máquina programable de carácter práctico data de 1801, año en el que el francés Joseph- Marie Jacquard desarrolló un telar automático que funcionaba a base de largas tiras de cartón con perforaciones que indicaban los patrones a realizar. (10, 11)

En 1883, el británico Charles Babbage (considerado el padre de la informática moderna) diseñó una máquina a la que llamó máquina analítica, que debía permitir realizar las cuatro operaciones fundamentales sobre 1000 números de 50 cifras contenidos en una memoria, según las indicaciones de un programa de cálculo registrado en una tira de papel perforado, siguiendo una técnica parecida a la realizada por Jacquard. Aunque por razones puramente técnicas, la tecnología de la época no permitió su construcción, su diseño alcanzó gran fama debido a que Babbage estableció cuáles debían ser los elementos fundamentales de un sistema automático (posteriormente este aparato fue construido por ingenieros de este siglo y su

funcionamiento es perfecto). También inventó otras máquinas como la máquina diferencial, diseñada para solucionar problemas matemáticos complejos. (10, 11)

Muchos historiadores consideran a Babbage y a su colega, la matemática británica Augusta Ada Byron (1815-1852) como los verdaderos inventores de la computadora digital moderna. La tecnología de aquella época, como ya hemos señalado, no era capaz de trasladar a la práctica sus acertados conceptos, pero la máquina analítica ya tenía muchas de las características de un ordenador moderno. Incluía una corriente, un flujo de entrada en forma de paquete de tarjetas perforadas, una memoria para guardar los datos, un procesador para las operaciones matemáticas y una impresora para hacer permanente el registro. (10, 11)

En el primer tercio del siglo XX llegó el salto cualitativo con el desarrollo de la electrónica moderna. Con la sustitución de las ruedas dentadas y las tarjetas perforadas por interruptores eléctricos, se consiguió un dispositivo en el que la circulación de corriente representaba el (1) y la interrupción del flujo el (0). Este tipo de máquinas es considerablemente más rápido que las de tipo mecánico y también más fiable. (10, 11)

Fue el matemático de origen húngaro J. Von Neumann (1903-1957) quien definió las características básicas del funcionamiento de las máquinas programables que hoy conocemos como ordenadores: almacenamiento de programas en una memoria física y recorrido paso a paso, de forma secuencial, de las instrucciones almacenadas. Sobre la base de sus ideas, se empezaron a construir los primeros ordenadores digitales modernos. Diseñó la primera computadora que utilizaba un programa archivado flexible, el *MANIAC I*, Participó en el diseño del que es considerado primer ordenador, el *ENIAC*, un ordenador que se hizo para calcular la trayectoria de proyectiles. Von Neumann propuso separar el *Hardware* del *Software*, realizándose en el ordenador *EDVAC*.(10, 11)

2.1.2. Generaciones de computadoras

Se distinguen distintas generaciones en la historia de los ordenadores. El paso de una generación a la siguiente se produce cuando se dan avances significativos en los elementos que constituyen el soporte de la información (11).

La *primera generación* (1940-1952) se corresponde con el uso de válvulas de vacío y relés electromagnéticos para el almacenamiento de datos. El número de

componentes por decímetro cúbico es de diez. Un predecesor inmediato de esta generación fue el ordenador digital *Mark I*, desarrollado en la universidad de Harvard por H. H. Aiken, que se basaba en interruptores mecánicos. En 1940 se construyó el *ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator)*, primer ordenador que empleaba válvulas de vacío en vez de interruptores. A partir de ese momento se construyeron modelos perfeccionados hasta que, en 1951, apareció el *UNIVAC-I*, que es el primer ordenador comercial.

En la *segunda generación* (1952-1964) los transistores sustituyen a las válvulas de vacío y se utilizan memorias de ferritas. Cada ordenador contiene cerca de un centenar de componentes por decímetro cúbico. Aparecen los primeros ordenadores comerciales con una programación previa (sistema operativo) que interpretaban instrucciones escritas en lenguajes de programación como el *Fortran* o el *Cobol*.

En la *tercera generación* (1964-1971), se introduce el uso del circuito integrado como soporte de información, lo que permite disponer de varios miles de elementos por decímetro cúbico. Gracias a ello se reduce significativamente el tamaño y el coste de los ordenadores, al tiempo que aumenta su velocidad y sus prestaciones.

En la *cuarta generación* (1971-1981), se avanza en la escala de integración de los circuitos integrados, dando lugar al circuito microprocesador. Con esto se consigue integrar todos los circuitos básicos del ordenador en un solo circuito integrado.

La *quinta generación* (desde 1981 hasta nuestros días) contempla el avance en la escala de integración continua de forma progresiva. Los circuitos integrados *VLSI* alcanzan cifras del orden de millones de transistores que ocupan un espacio menor que la palma de una mano. En esta última generación se da mayor énfasis a la intercomunicación usuario-ordenador, en un intento de aproximar cada vez más el lenguaje del ordenador a la forma de comunicación natural de las personas y al lenguaje convencional.

La miniaturización y abaratamiento de costes también propició la aparición del ordenador personal o PC, cuya gran difusión en el mercado lo convierte en parte imprescindible tanto de las necesidades actuales como de la realidad cotidiana.

2.2. INFORMÁTICA APLICADA A LA DOCENCIA MÉDICA

La docencia en medicina y biología, tradicionalmente ha estado basada en el uso de atlas o disecciones. Sin embargo, el empleo de atlas limita la visión a dos dimensiones, necesitando una gran capacidad de abstracción por parte del estudiante para entender las relaciones tridimensionales. Con el avance de las tecnologías, la enseñanza basada en elementos informáticos ha roto estas barreras permitiendo una docencia más dinámica, realista y atractiva.

Muchos de los programas informáticos empleados en medicina utilizan datos reales obtenidos de resonancias magnéticas y tomografías computarizadas, que permiten reconstrucciones tridimensionales de los diferentes órganos y estructuras. (12)

Las ventajas y desventajas de la enseñanza asistida por ordenador frente a los métodos tradicionales han sido resaltadas por diversos autores (13-18) y se exponen a continuación:

Ventajas

- Pueden enseñar y evaluar habilidades en el manejo clínico de casos a largo plazo, simulando un seguimiento longitudinal.
- Los contenidos de las lecciones se adaptan al nivel del estudiante.
- La ausencia de otros estudiantes favorece un ambiente de trabajo más desinhibido, creativo. No existe la ansiedad de actuar y responder delante de público.
- El estudiante controla el ritmo de avance de los contenidos. Se promueve un uso eficiente del tiempo, permitiendo saltar o revisar material adecuadamente.
- Feedback inmediato cuando se permite a los estudiantes realizar autoevaluación.
- La interactividad promueve la concentración y el aprendizaje.
- El valor de lo novedoso añade motivación.
- Los estudiantes se aficionan aún más al uso de herramientas informáticas.
- Pueden proporcionar mejores imágenes, mejores diagramas.

- Los estudiantes pueden elegir el momento del día o de la noche para aprender.
- Alivia al profesor de presentar conferencias o exposiciones repetitivas.
- Los ordenadores dan el mejor rendimiento posible constantemente, de forma reproducible, pero el profesor puede ser variable.

Inconvenientes

- Las opciones de saltar material pueden conducir a los alumnos a obviar material importante que desconocen.
- Los ordenadores sólo dan información preprogramada, pudiendo dejar cuestiones sin resolver a los estudiantes.
- Los estudiantes no aprenden de las preguntas y respuestas de otros alumnos.
- Los estudiantes no experimentan la presión de actuar frente a otros, lo que puede disminuir la motivación.
- Los estudiantes necesitan aprender a manejar el programa de ordenador en cuestión. Estudiantes con menor habilidad en el manejo de ordenadores pueden encontrarlo incómodo.
- No existe el refuerzo docente del profesor narrando anécdotas y experiencias de la vida real.
- Ausencia del “factor humano”.
- El desarrollo e implementación requiere dinero y tiempo, a veces en cantidades considerables.
- Potencial baja calidad de imagen en pantallas de baja resolución.
- La disponibilidad limitada de estaciones de trabajo puede disminuir el acceso al aprendizaje.

Desde un punto de vista técnico, la enseñanza asistida por ordenador permite dos entornos de trabajo, el aprendizaje on-line, en el que el alumno está conectado a un servidor remoto y el aprendizaje off-line, en el que el alumno trabaja en su propio ordenador.

Aprendizaje on-line

Significa literalmente en línea o conectado, es decir, estar conectado con el sitio donde están los recursos docentes electrónicos, de manera remota y por medio de internet. En inglés, se emplea con frecuencia el término Web-Based Training, es decir, aprendizaje basado en la web. Tiene como ventajas el permitir la interacción a distancia en tiempo real y la gestión de usuarios por un coordinador (por ejemplo, profesor). Sin embargo, una baja velocidad de transmisión puede limitar su utilización.

Aprendizaje off-time

Significa fuera de línea, desconectado, de manera que se recurre a material didáctico almacenado en el ordenador, o en diferentes tipos de soporte (CD-ROM, DVD, etc.), por tanto no se necesita acceso a Internet. En inglés se denomina Computer-Based Training. Presenta la ventaja de que el recurso docente reside en nuestro propio ordenador, de manera que las limitaciones de velocidad son menores; sin embargo no permite la interacción virtual. (19)

2.3. BASES EMBRIOLÓGICAS Y ANATÓMICAS EN EL ÁREA OROFACIAL

El objeto de estudio de este trabajo de investigación es la búsqueda de nuevas posibilidades de estudio de la anatomía, concretamente de la mandíbula, sobre un espécimen humano de tres años de edad.

Para ello nos centraremos en el punto de vista anatómico, embriológico, así como el desarrollo y la evolución de los órganos dentarios.

2.3.1. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LAS ARCADAS

Para poder entender cómo se constituyen las arcadas dentarias y la oclusión, se ha de comprender en primer lugar cómo crecen y se desarrollan el cráneo y las estructuras faciales antes y después del nacimiento.

1. Desarrollo de la cara

El desarrollo del cráneo desde el punto de vista embrionario es bastante complejo y tardío en comparación con el de otras estructuras blandas como el cerebro, los ojos, nervios, vasos y músculos. Tal es este hecho, que en el primer mes, el embrión

prácticamente no tiene cara y la cabeza parece en su mayor parte un cerebro simplemente cubierto por una delgada lámina de ectodermo y mesodermo.(20)

La cara se desarrolla entre la cuarta y décima semana de vida intrauterina. Durante la cuarta semana, la cavidad oral primaria (estomodeo) está definida por cinco mamelones faciales, generados por la proliferación de zonas mesenquimatosas situadas debajo del ectodermo. Estos son el proceso frontonasal (impar y medio) y los procesos maxilares y mandibulares (pares). Los procesos maxilares y mandibulares derivan del primer arco branquial. Los procesos faciales al principio, están delimitados por surcos , que a lo largo del tiempo van desapareciendo por la proliferación y migración del tejido mesenquimal.(21) (Figura 1)

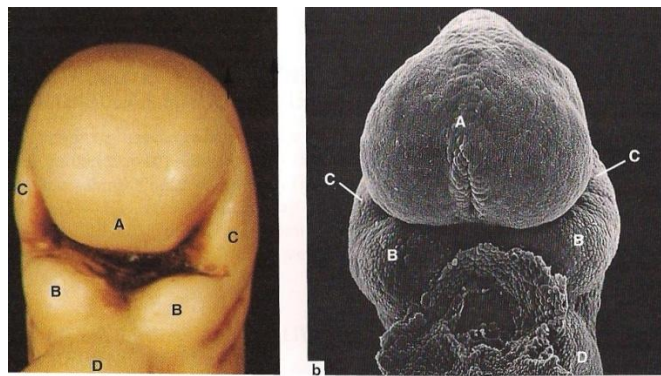


Fig.1: Modelo desarrollo facial (4 semanas intrauterino)

A: Proceso frontonasal, B: Procesos mandibulares C: Procesos maxilares,
D: Proceso pericárdico. Tomado de Berkovitz (21)

En los primeros estadios de desarrollo (cuarta semana), la membrana orofaríngea separa la cavidad oral primitiva de la faringe en desarrollo. Esta membrana es bilaminar y se compone de una capa externa ectodérmica y una interna endodérmica. Pronto esta membrana desaparece dando continuidad a la porción ectodérmica de la cavidad oral y endodérmica de la faringe.(21)

A las cinco semanas, en el embrión se detectan unos engrosamientos de ectodermo que darán lugar a las placodas nasales y ópticas, que formarán el epitelio olfativo y los ojos. Las placodas nasales a su vez van a adentrarse en el tejido mesenquimal subyacente formando lo que serán las cavidades nasales primitivas. La proliferación de tejido mesenquimal del proceso frontonasal alrededor de estas nuevas

cavidades produce los procesos nasales media y lateral. Además, el proceso maxilar va a aumentar y crecer hacia delante y hacia medial, como se aprecia en la figura 2 (21)

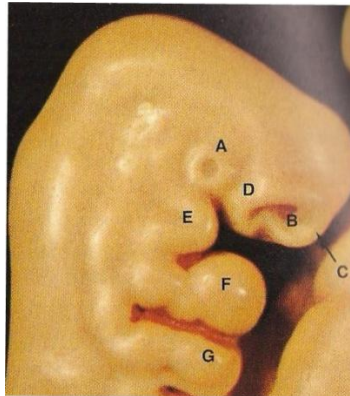


Fig.2: Modelo desarrollo facial (5 semanas intrauterino)

A: Placoda óptica, B: Placoda nasal, C: Proceso nasal medial,
D: Proceso nasal distal, E: Proceso maxilar, F: Proceso mandibular.

G: Segundo arco facial Tomado de Berkovitz (21)

Hacia la sexta semana, los dos procesos mandibulares se van a fusionar en la línea media dando lugar a los tejidos que formarán la mandíbula. Los procesos maxilares y mandibulares van a estar unidos a nivel del ángulo de la boca, definiéndose así su contorno. Desde los bordes superiores de la boca, el proceso maxilar crece por debajo del proceso nasal lateral y por delante del proceso nasal medial. Entre la fusión de los procesos maxilar y nasal lateral aparecen los surcos óptico-nasales (surcos nasolacrimales). De cada surco, el descenso de células ectodérmicas va a generar la aparición de los conductos lacrimales. Todo esto queda reflejado en la figura 3 (21)

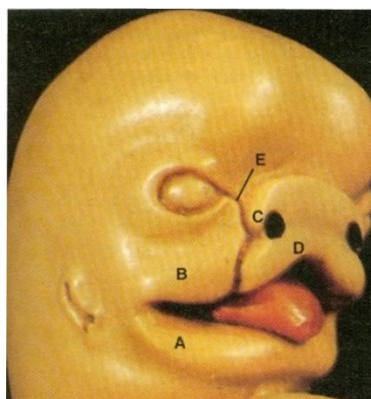


Fig.3: Modelo desarrollo facial (6 semanas intrauterino)

A: Proceso mandibular, B: Proceso maxilar, C: Proceso nasal lateral,
D: Proceso nasal medial, E: Surco óptico-nasal. Tomado de Berkovitz (21)

Existen dos teorías en torno a la formación del labio superior hacia la sexta semana de gestación. La primera sugiere que el proceso maxilar crece por encima del proceso nasal medial hacia la línea media, dando lugar a los tejidos que formarán el labio superior. La otra teoría mantiene que el mesénquima del proceso maxilar desplaza el mesénquima del proceso nasal medial. La histología en relación a los procesos de inervación defienden esta última postura, pero es cierto que todavía no existen evidencias claras que descarten la posible migración maxilar hacia la línea media, sugiriéndose que el tercio medio del labio superior derivaría de margen nasal medial del proceso frontonasal. (21) El labio inferior se formará por la migración de ectomesénquima del proceso mandibular.(22)

Durante el periodo de formación facial (aproximadamente los veinticuatro a veintiocho días de gestación), parte del epitelio que recubre el proceso facial, se va a diferenciar en odontogénico o formador de tejidos dentarios. En el borde inferior del proceso maxilar y el superior del proceso mandibular, el epitelio empieza a proliferar y a engrosarse, formándose así el epitelio odontogénico. Éste también se va a desarrollar en torno a la vertiente lateral del proceso nasal medial, viéndose hacia el día treinta y siete (cuando los procesos maxilar y nasal se fusionen), la banda epitelial primaria. Esta banda epitelial primaria es una proliferación de epitelio odontogénico con forma arqueada que va a formar el maxilar superior, distinguiéndose cuatro zonas de proliferación epitelial. Lateralmente, una zona asociada a cada proceso maxilar, y en el medio una asociada a los procesos nasales mediales. Igualmente dos zonas en el proceso mandibular formarán la banda epitelial primaria de la mandíbula.(22)

2.3.1.2. Desarrollo de la mandíbula

El desarrollo inicial de la mandíbula es intramembranoso pero su crecimiento y desarrollo posterior se puede definir como cartilaginoso. Es fundamental en el desarrollo mandibular el cartílago de Meckel, que deriva del primer arco faríngeo. Aparece en torno a la sexta semana de vida intrauterina y se extiende desde la cápsula ótica cartilaginosa en la región que formará la oreja, hasta la sínfisis. No va a contribuir demasiado el desarrollo de la mandíbula adulta, simplemente va a servir de estructura en torno a la cual se forme el hueso mandibular. La rama mandibular del nervio trigémino, tiene una estrecha relación con este cartílago de Meckel, recorriendo en su

mayor parte la longitud del mismo, y dividiéndose en sus ramas alveolares y lingual, que recorrerán su cara lateral y medial respectivamente.(22, 23)

La mandíbula en sus fases iniciales de formación tiene un aspecto de lámina de tejido fibroso denso. En la séptima semana aparece un centro de osificación en este tejido fibroso próximo a lo que será en foramen mentoniano. Desde este centro, la formación de hueso es abundante hacia atrás, hacia delante y hacia arriba, alrededor del nervio dentario y de sus ramas terminales mentoniana e incisal. Un incremento de desarrollo óseo en dirección anterior y posterior produce una placa ósea en la cara lateral del cartílago de Meckel que corresponderá con el futuro cuerpo mandibular. Ésta se extenderá hacia la línea media para encontrarse con el hueso que se formará en el otro lado. Sin embargo, estas dos partes permanecerán separadas por tejido fibroso correspondiente a la sínfisis. (Figura 4)(22, 23)

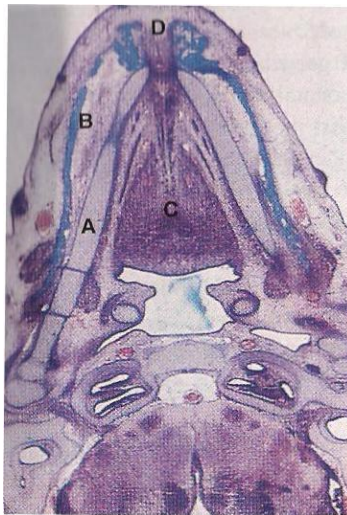


Fig.4: Sección de mandíbula (8 semanas vida intrauterina)

A: Cartílago de Meckel, alrededor del que se forma hueso mandibular (B). C: Lengua, D: Sínfisis. Tomada de Berkovitz (23)

Continuando con el crecimiento del cuerpo mandibular, se va a producir una gran proliferación de tejido óseo que supondrá un aumento del tamaño mandibular, apareciendo también el hueso alveolar alrededor de los gérmenes dentarios (figura 5). En un estadio superior, el cartílago de Meckel se reabsorbe. El paquete vasculonervioso, que en estadios primitivos se localizaba con los gérmenes dentarios, se va a albergar en su propio canal óseo con un consiguiente desarrollo marcado del proceso alveolar.(22-24)

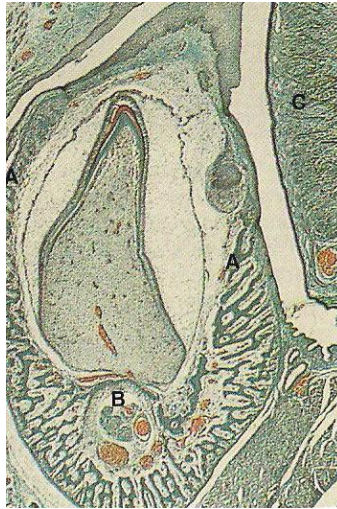


Fig.5: Sección de mandíbula en donde el cartílago de Meckel se ha reabsorbido. El paquete vasculonervioso (B) se alberga en su canal óseo y el proceso alveolar (C) presenta una gran proliferación. C: Lengua

Tomada de Berkovitz (23)

Aunque el cartílago de Meckel no va a contribuir significativamente en el desarrollo final de la mandíbula, se pueden apreciar remanentes cartilagosos en la región de la sínfisis hasta el nacimiento, y además en su porción más dorsal, el cartílago se osifica para formar los osículos auriculares, el martillo y el yunque. Por detrás del cuerpo mandibular, el pericondrio del cartílago persiste formando los ligamentos esfenomandibular y esfenomaleolar. El ligamento esfenomandibular se osificará para formar la línula mandibular y espina del esfenoides.(22, 23)

Durante el periodo de campana de formación de los gérmenes, irá proliferando hueso alrededor, generándose así los alveolos. Su tamaño se irá modificando en función del crecimiento del germen dentario. En este alveolo se producirán fenómenos de aposición y reabsorción ósea, reabsorción en su interior y aposición en su parte externa. Posteriormente entre los dientes se formará el septo interdental. Igualmente con la aparición de las raíces dentarias, proliferará entre ellas hueso interradicular.(22-24)

La rama mandibular en origen es una condensación de tejido fibroso que, pese a que va a tener continuidad con el cuerpo, se va a localizar lateralmente al cartílago de Meckel. Un gran desarrollo de esta rama se debe a la osificación en dirección posterior del cuerpo, que ya mencionamos, y también por la aparición de cartílagos secundarios. Entre la décima y decimo cuarta semana de vida intrauterina, se van a desarrollar tres

cartílagos secundarios en relación a la mandíbula en crecimiento. El mayor y más importante es el cartílago condilar. Esta masa cartilaginosa se va a convertir progresivamente en hueso mediante un proceso de osificación endocondral; así en torno a la semana veinte de gestación, sólo se apreciará una fina capa de cartílago en la cabeza del cóndilo. Ésta permanecerá activa hasta la segunda década de vida, siendo un mecanismo importante de crecimiento mandibular.(22-24)

Los otros dos cartílagos, menos importantes, se localizan en las regiones coronoidea y sinfisaria. Con todo esto se aprecia que la aparición en el feto de la articulación ocurre aproximadamente hacia la semana catorce de gestación.(22, 23)

La articulación temporomandibular se formará a partir de una capa mesenquimatosa entre el cóndilo en formación y el hueso temporal, cuyo desarrollo será intramembranoso. Mérida y cols, tras el estudio de setenta especímenes humanos describen la evolución en el desarrollo de la articulación. En la semana séptima, se va a observar una condensación de tejido mesenquimal en lo que sería el esbozo condilar, que se va a asociar con nervios maseterino y auriculotemporal, éste último transcurrirá entre el futuro cóndilo y el cartílago de Meckel. En torno a la octava semana, se produce una osificación intramembranosa en la rama, que corresponde con la base del futuro cóndilo. Craneolateralmente a ella se generará el esbozo del disco articular a partir de tejido mesenquimatoso. En este estadio, todavía no existen cavidades articulares, pero sí se van esbozando estructuras musculares como el pterigoideo lateral y el ligamento discomaleolar.(25)

En torno a la novena semana comienza la osificación en el centro del blastema condilar. Igualmente se aprecian unas hendiduras entre el esbozo del disco articular y el cóndilo mandibular, que suponen la formación inicial de la fosa mandibular inferior, que se completará en torno a la décima semana, sin apreciarse evidencias de la superior. En esta décima semana, el cartílago condilar va adquiriendo una forma cónica y próximo al vértice de su base se encuentra lo que será el foramen mandibular. Hace la semana once, comienza la organización de la fosa mandibular superior. La cápsula articular se sitúa entre el proceso cigomático de la porción escamosa del temporal y el cóndilo y se une al disco articular. (25)

Entre la semana doce y diecisiete, se completa la formación de la totalidad articular. En la semana doce no existen cambios significativos en las superficies

articulares y las fosas están perfectamente definidas. En la semana trece, la superficie articular de la porción escamosa del temporal adquiere una morfología cóncava y se observa la inserción del disco articular la superficie externa del cóndilo, así como la invaginación del mesénquima vascular y la aparición de la fisura timpanoescamosa. Igualmente se aprecian proyecciones fibrosas que corresponderán a los músculos masetero y temporal en la porción anterior del temporal. En la región retrocapsular se aprecia el nervio auriculotemporal, así como la rama originada de la arteria timpánica anterior y el plexo venoso retrodiscal. A partir de la semana catorce el cartílago de Meckel sufre una reducción en su volumen. Durante la semana diecisiete existe una clara osificación endocondral en la porción anterior del cóndilo, asociada a la inserción del músculo pterigoideo lateral y el ligamento discomaleolar adquiere un aspecto fibroso.(25)

El ratio cuerpo- rama es mayor en el nacimiento que en el adulto, indicando un incremento proporcional de la rama con el paso del tiempo. En el momento de nacer, la barbilla no está bien delimitada, y ambas hemimandíbulas se unen a nivel de la sínfisis, que se osificará en torno a los dos años de vida, generándose así un único hueso. El mentón se va haciendo progresivamente más prominente, sobretudo en la pubertad en varones. Además, el ángulo mandibular va disminuyendo desde el nacimiento hasta la edad adulta.(22, 23) Estas variaciones quedan claramente reflejadas en la figura 6.

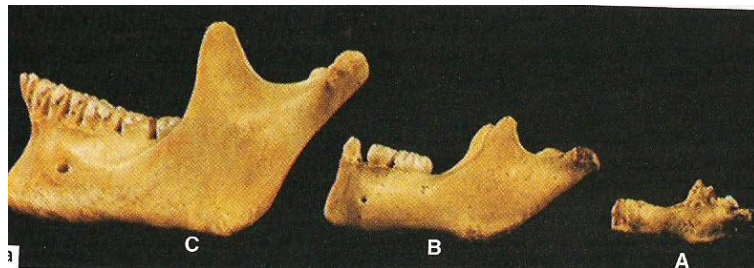


Fig.6: Evolución mandibular del niño (A) al adulto (C)

Tomada de Berkovitz (23)

El crecimiento mandibular ocurre merced a un proceso de remodelación ósea. El incremento en altura del cuerpo mandibular ocurre primeramente por la formación del hueso alveolar, aunque también hay depósito óseo a nivel del borde inferior. El incremento en la longitud se produce por la proliferación ósea a nivel posterior de la rama, con su consiguiente reabsorción en su borde anterior, acompañado del depósito de

hueso en la superficie posterior de la apófisis coronoides y la reabsorción en la vertiente anterior del cóndilo. El crecimiento en anchura se produce por la deposición ósea en las vertientes externas y la reabsorción en las internas.(22-24)

Existe cierta controversia sobre el papel del cartílago condilar en el crecimiento mandibular. Una teoría mantiene la continua proliferación de este cartílago como responsable del crecimiento en altura y longitud de la rama. Otra teoría, en cambio afirma que la proliferación del cartílago es una respuesta al crecimiento pero no su causa. Por último algunos estudios han comprobado que el crecimiento mandibular se mantendría si seccionásemos el cóndilo.(22, 23)

1. ANATOMÍA DEL MACIZO MAXILOFACIAL

El esqueleto de la cara está situado inferiormente a la mitad anterior del cráneo. Se divide en dos partes principales: el maxilar y la mandíbula. El proceso maxilar está formado por trece huesos, entre los cuales uno sólo es medio e impar, el *vómer*. Los otros son pares laterales y están colocados simétricamente a ambos lados de la línea media. Estos huesos son: *los maxilares, los lagrimales, los palatinos, las conchas nasales inferiores, los huesos nasales y los cigomáticos*. La mandíbula está formada por un solo hueso.(26) Nos centraremos en la revisión anatómica del área mandibular.

2.3.2.1. La mandíbula

La mandíbula está situada en la parte inferior de la cara. Se distinguen en ella tres partes, el *cuerpo*, y dos partes laterales, las *ramas*, que se alzan en los extremos posteriores del cuerpo.

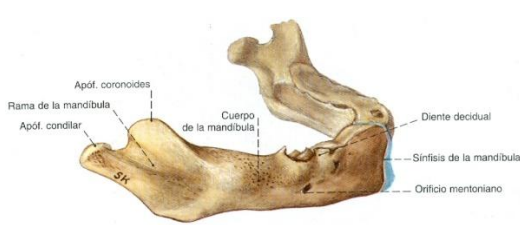


Fig.7: Visión lateral de una mandíbula de recién nacido. Tomada de Sobotta (27)

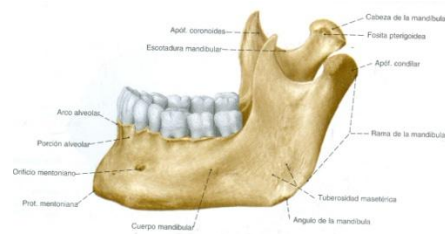


Fig.8: Visión lateral de una mandíbula de un adulto. Tomada de Sobotta (27)

1. CUERPO

El cuerpo está incurvado en forma de herradura. Presenta una cara anterior convexa, una cara posterior cóncava, un borde superior o alveolar y un borde inferior libre.

Cara anterior: Se observa en la línea media una cresta vertical, la *sínfisis mandibular*, que es la huella de la unión de las dos piezas laterales que integran la mandíbula. La sínfisis mandibular termina inferiormente en un vértice triangular de base inferior, la *protuberancia mentoniana*. De ésta nace a cada lado una cresta, llamada *línea oblicua*, que se dirige posterior y superiormente y tiene continuidad con el labio lateral del borde anterior de la rama mandibular. Superior a la línea oblicua se encuentra el *agujero mentoniano*. Este agujero se sitúa a la misma distancia de los dos bordes de la mandíbula y en una vertical que pasa entre los dos premolares, o por uno u otro de estos dos dientes. Da paso a los vasos y nervios mentonianos.

Cara posterior: Se aprecian en la parte media y cerca del borde inferior cuatro pequeños salientes superpuestos, dos a la derecha y dos a la izquierda, que son las *espinas mentonianas (apófisis geni) superiores e inferiores*. Las espinas superiores sirven de inserción a los músculos genioglosos, las inferiores a los genihioideos. Comúnmente, las espinas mentonianas inferiores, y a veces las cuatro apófisis, se fusionan en una sola.

De las espinas mentonianas nace a cada lado una *línea oblicua milohioidea*. La línea milohioidea se dirige superior y posteriormente y termina en la rama mandibular formando el labio medial de su borde anterior; sirve de inserción al músculo milohioideo. Inferior a ella se halla un estrecho surco llamado *surco milohioideo* por el que pasan los vasos y nervios del mismo nombre.

La línea milohioidea divide la cara posterior del cuerpo de la mandíbula en dos partes. Una superior, excavada, más alta anterior que posteriormente, se llama *fosita sublingual* y aloja la glándula sublingual. La otra, inferior, es más alta posterior que anteriormente y está en gran parte ocupada por una depresión, la *fosita submandibular*, que ocupa la glándula submandibular.

Bordes: *Superior o alveolar:* Está excavado por cavidades, los alveolos, destinadas a alojar las raíces de los dientes. *Inferior:* Es grueso, obtuso y liso. Presenta,

un poco por fuera de la línea media, una superficie ovalada y ligeramente deprimida, la *fosa digástrica*, en la que se inserta el vientre anterior del músculo digástrico.

2. RAMAS DE LA MANDÍBULA

Las ramas de la mandíbula son rectangulares, alargadas de superior a inferior y presentan dos caras, una lateral y otra medial, y cuatro bordes.

Cara lateral: Se aprecian en su parte inferior las crestas rugosas, oblicuas inferior y posteriormente, en las cuales se insertan las láminas tendinosas del masetero.

Cara medial: Existen también en la parte inferior de la cara medial crestas rugosas, oblicuas inferior y posteriormente, marcadas por la inserción del músculo pterigoideo medial. En la parte media de esta cara se encuentra el orificio de entrada del *conducto mandibular*, en el cual penetran los vasos y nervios alveolares inferiores. El orificio, llamado *agujero mandibular* está situado en la prolongación del reborde alveolar y coincide con el punto medio de una línea trazada desde el trago al ángulo anteroinferior del masetero. Está limitado anteriormente por un saliente triangular agudo, la *línula mandibular o espina de Spix*, sobre la cual se inserta el ligamento esfenomandibular. Posterior al agujero mandibular, existe a veces otro saliente más pequeño que el anterior, la *antilínula*. En el agujero mandibular comienza el surco milohioideo ya descrito.

Bordes: El *borde anterior* está comprendido entre dos crestas o labios, uno medial y otro lateral. El labio medial limita inferiormente con el labio lateral un canal que aumenta de profundidad y anchura de superior a inferior. Su extremidad inferior se continúa más o menos directamente con la línea milohioidea del cuerpo de la mandíbula. Superiormente, el labio medial asciende sobre la cara medial de la rama mandibular y de la apófisis coronoides formando un relieve, la *cresta temporal*.

En el canal que limitan inferiormente los dos labios del borde anterior se observa una cresta oblicua dirigida inferior y lateralmente, la *cresta buccinatrix*, que sirve de inserción del músculo buccinador.

Los dos labios del borde anterior sirven de inserción a los fascículos tendinosos del músculo temporal.

El *borde posterior* es grueso y romo y describe una curva en forma de “S” muy alargada.

El *borde inferior* tiene continuidad con el borde inferior del cuerpo de la mandíbula. Forma posteriormente, cuando se une con el borde posterior de la rama mandibular, el *ángulo de la mandíbula o gonion*. Está frecuentemente cruzado en su parte anterior por una depresión transversal debida al paso de la arteria facial.

El *borde superior* presenta dos salientes, uno posterior, la *cabeza de la mandíbula (cóndilo)* y otro anterior, la *apófisis coronoides*, separados entre sí por la *escotadura mandibular*.

El *cóndilo* es una eminencia oblonga cuyo eje mayor se dirige de lateral a medial y un poco de anterior a posterior. Sobresale más sobre la cara medial que sobre la cara lateral de la rama mandibular. Se aprecia en él una cara superior en forma de ángulo diedro, cuyas vertientes anterior y posterior se articulan con el temporal. La vertiente posterior tiene continuidad inferiormente con una superficie triangular cuyo vértice inferior se confunde con la extremidad superior del borde posterior de la rama mandibular.

La cabeza presenta además en la mayor parte de los casos, por debajo de su extremo lateral, una pequeña rugosidad determinada por la inserción del ligamento lateral de la articulación temporomandibular. La cabeza está adherida a la rama mandibular por una parte estrecha, el *cuello de la mandíbula*, que presenta medial y anteriormente una fosita rugosa en la cual se inserta el músculo pterigoideo lateral. Sobre la cara medial del cuello de la mandíbula se aprecia un saliente, el *pilar medial de la cabeza*, formado por el labio medial de la fosita de inserción del pterigoideo lateral y que se prolonga inferior y anteriormente hasta las proximidades de la línula mandibular.

La *apófisis coronoides* es triangular. Su cara lateral es lisa. Su cara medial presenta la cresta temporal ya descrita. Su borde anterior tiene continuidad con el labio lateral del borde anterior de la rama mandibular. Su borde posterior, cóncavo posteriormente, limita anteriormente la escotadura mandibular. Su base se continúa con el hueso. Su vértice superior es romo. La apófisis coronoides sirve de inserción al músculo temporal.

La *escotadura mandibular*, ancha, profunda y cóncava superiormente, establece comunicación entre las regiones maseterina y cigomática y da paso a los vasos y nervio maseterinos.

En el feto y en el niño pequeño, la mandíbula está recorrida por otro conducto llamado *conducto de Serres*, subyacente al conducto mandibular. El conducto de Serres contiene únicamente vasos. Desde el nacimiento tiende a obliterarse y desaparecer muy pronto. Sin embargo, se encuentra a veces en el adulto su orificio posterior colocado inferior y posteriormente al agujero mandibular y su orificio anterior situado anterior al del agujero mentoniano. (28)

3. DESARROLLO Y ERUPCIÓN DENTARIA

Como se mencionó anteriormente, en torno a los 37 días de gestación, se produce un engrosamiento de tejido epitelial en los procesos alveolares. Esta banda, con forma de herradura va a ser el emplazamiento de los futuros dientes maxilares y mandibulares. La formación de este engrosamiento es el resultado de un incremento de la actividad proliferativa en el tejido epitelial y un cambio en la orientación de los husos mitóticos y el plano escisional de las células en división. (Figura 9) Estas bandas, denominadas bandas epiteliales primarias, rápidamente se dividen en dos: la lámina dentaria, que se forma primero; y la lámina vestibular, que se forma un poco después y por delante de la anterior. Un punto clave en el inicio de la formación dentaria es la aparición de engrosamientos o placodas dentro de estas bandas epiteliales primarias. (29)

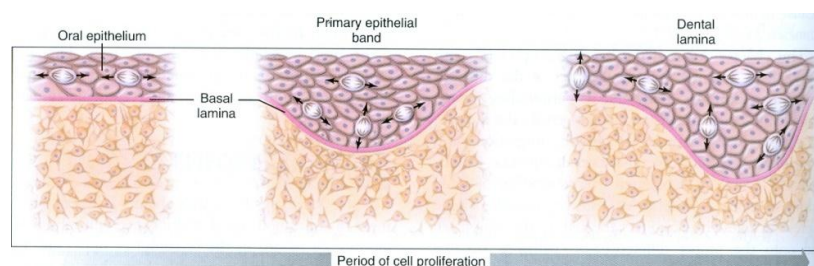


Fig.9: Representación esquemática del cambio de orientación de los husos y el plano escisional durante la formación de las bandas epiteliales y la lámina dentaria. Tomada de Nanci (29)

De una forma resumida, el origen de los diferentes tejidos dentarios está tanto en el mesodermo y la cresta neural (que darán lugar a la papila dentaria y por tanto a los odontoblastos, cementoblastos y fibroblastos), como del ectodermo (que llevará a la formación de los ameloblastos y el órgano del esmalte. (29, 30)

2. Lámina dentaria

En la superficie anterior de la lámina dentaria, se va a generar una actividad proliferativa localizada y continuada dando lugar a la formación de excrecencias en el ectomesénquima en las localizaciones de los futuros dientes deciduos. En este momento, la actividad mitótica, de marcaje y el crecimiento de las células epiteliales es menor al de las células de ectomesénquima subyacente, haciendo que éstas células ectomesenquimales se acumulen alrededor de las excrecencias mencionadas.

Una vez llegado a este punto el desarrollo y maduración dentarios se va a producir en tres estadios fundamentales: *brote*, *casquete* y *campana*. Estos términos hacen referencia a la morfología que van adquiriendo los gérmenes dentarios, pero no a los cambios histológicos y funcionales que van ocurriendo, y que serán de gran importancia. También es importante tener en cuenta, que el proceso evolutivo es un hecho continuo, siendo difícil en ocasiones marcar una verdadera transición entre los estadios.(29, 31)

3. Lámina vestibular

Si realizamos un corte coronal de la cabeza en formación (figura 10) en un embrión de unas seis semanas de gestación, no apreciaríamos imagen alguna de vestíbulo entre la mejilla y el área destinada a la formación dentaria. El vestíbulo se forma a expensas de la proliferación de la lámina vestibular en el ectomesénquima en un periodo inmediatamente posterior a la formación de la lámina dentaria. Las células de esta lámina vestibular van a crecer rápidamente y van a dar lugar a las hendiduras formarán el área vestibular entre la barbilla y los futuros dientes.(29)

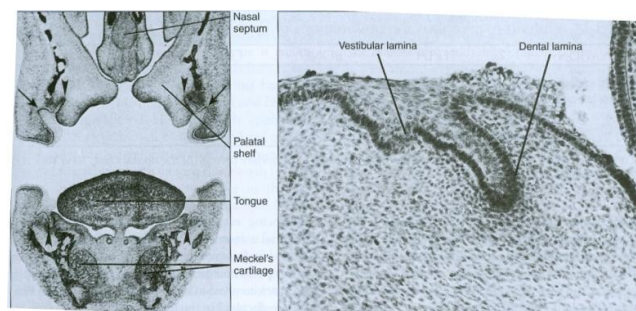


Fig.10: Corte coronal de una cabeza en gestación. A: La posición de la lámina dentaria y vestibular, se marca con una punta de flecha y una flecha respectivamente. B: Las dos láminas a mayor aumento. Tomada de Nanci (29)

4. Estadíos de desarrollo y maduración dentaria

2.4.3.1. Estadío de brote

Este periodo se caracteriza por la primera incursión epitelial en ectomesénquima. Las células epiteliales apenas van a mostrar cambios en la forma o en la función ya que no ha comenzado aun la histodiferenciación. Las células ectomesenquimales comienzan adyacentes comienzan a agruparse alrededor del brote epitelial.(29)

Los brotes o gérmenes dentarios van a corresponder en número con los dientes temporales (diez en el maxilar y diez en la mandíbula). Se desarrollarán a partir de la octava semana de vida intrauterina, presentándose como proliferaciones locales de la lámina dental. Alrededor de estas proliferaciones se aprecia una condensación de células mesenquimatosas adyacentes, constituyendo la futura papila dental.(29, 31)

A nivel posterior, la lámina dental continúa proliferando en el tejido conjuntivo del maxilar y la mandíbula, constituyendo la lámina sucesiva o definitiva, que dará lugar a los brotes de los dientes permanentes sin predecesores deciduos (primer, segundo y tercer molares permanentes). Mientras, los gérmenes dentales de los dientes permanentes con predecesores temporales (incisivos, caninos y premolares), se originan en la parte lingual de la lámina dental. Cualquier alteración a este nivel puede originar la presencia de dientes supernumerarios o agenesias.(29, 31)

2.4.3.2. Estadío de casquete

Alrededor de la décima semana de vida intrauterina, mientras el brote epitelial continúa proliferando en el ectomesénquima, hay un incremento de densidad celular en las zonas adyacentes, lo que se conoce como condensación de ectomesénquima.(29, 31)

En esta fase pueden comenzar a identificarse los elementos formativos del diente. Se va a observar un sobrecrecimiento epitelial, con un cierto parecido con un sombrero o casquete, que si situará sobre el ectomesénquima condensado, denominado órgano del esmalte que dará lugar al esmalte dentario y cuyo centro se denomina retículo estrellado. El conjunto de células ectomesenquimatosas condensadas, denominado papila dental, formará la dentina y la pulpa. A su vez, el ectomesénquima condensado que limita la papila y encapsula el órgano del esmalte, y que se denominará folículo dental o saco, será el origen de los tejidos de soporte del diente.

El órgano del esmalte, la papila dental y el folículo constituyen el órgano dental o germen dentario. Durante el desarrollo tendrán lugar importantes cambios que comenzarán de forma tardía en el periodo de casquete y continuarán en la transición de casquete a campana. Durante estos cambios se produce la histodiferenciación, una diferenciación celular, tanto morfológica como histológica. (29, 31-33)

En esta fase aparecen los nudos de esmalte, racimos o *clusters* de células epiteliales no diferenciadas. Cada diente va a presentar un nudo del esmalte en la fase de casquete. Al desaparecer, se forman nudos de esmalte secundarios en la zona correspondiente a la punta de las cúspides en los molares. Se cree que estas estructuras representan un centro de organización que orquesta la morfogénesis cuspidea.(29)

2.4.3.3. Estadío de campana

Durante, este periodo, que tiene lugar en torno a los tres meses de desarrollo intrauterino, la corona dental va a adquirir su forma final, proceso conocido como morfodiferenciación, y las células encargadas de la síntesis del esmalte y la dentina (ameloblastos y odontoblastos) se van a histodiferenciar.(29)

Las cuatro capas del órgano del esmalte se encuentran diferenciadas. En su periferia, las células adquieren un aspecto cuboideo, dando lugar al epitelio dental externo. A su vez, las células que bordean la papila dental toman forma de columna, formando el epitelio dental interno. Ambos epitelios forman una estructura continua, comenzando el epitelio interno cuando el externo se dobla para dar lugar a la concavidad en la que se acumulan las células de la papila. La zona de transición entre ambos epitelios es el lazo cervical, que dará lugar al componente epitelial de la formación radicular.

Desde un punto de vista celular, a nivel del epitelio dental externo, las células adquieren una morfología cuboidea, para ir aplanándose, estableciéndose así una transición entre la cresta o futura cúspide hasta el asa cervical. En cuanto al retículo estrellado (parte central del órgano del esmalte), sus células inicialmente polimórficas van adoptando un aspecto estrellado. Se debe al depósito extracelular de una sustancia mucoide rica en mucopolisacáridos hidrofílicos que aleja las células unas de otras, manteniendo su unión por los desmosomas. De esta forma se aumenta el espacio en el órgano del esmalte, lo que permite el desarrollo de la corona.(29, 31)

El epitelio interno, en su porción más cercana al retículo estrellado, se compone de células columnares bajas, pre- ameloblastos, que al diferenciarse a ameloblastos, cambian su forma, alargándose, y cesando su actividad mitótica.(29, 30, 34)

Las células del ectomesénquima de la papila dental próximas al epitelio dental interno, pre- odontoblastos, se van a diferenciar a odontoblastos que se encargarán de la formación de la dentina. La diferenciación de odontoblastos se inicia con la diferenciación previa de los pre- ameloblastos del epitelio dental interno.(35)

Durante el estadio de campana tienen lugar otros dos eventos de gran importancia. En primer lugar la lámina dental se rompe en cierto número de islas de células epiteliales, separándose el diente en desarrollo del epitelio oral. En segundo lugar, el epitelio dental interno completa su plegamiento, haciendo posible distinguir la forma de la futura corona del diente.

El cese de la actividad mitótica en las células del epitelio dental interno determinará la forma del diente. Cuando el germen dental crece durante la transición de fase de casquete a campana, la división celular se da en todo el epitelio dental interno. Al continuar el desarrollo, la división se detiene en una zona concreta ya que las células están comenzando a diferenciarse y asumir su función productora de esmalte. El punto inicial en el que la célula del epitelio dental interno comienza a diferenciarse representa la zona donde se desarrollará la cúspide y será el centro de crecimiento.

La diferenciación celular del epitelio dental interno y de la papila es seguida por el depósito de esmalte y dentina. La aparición de una segunda zona de diferenciación celular en el epitelio dental interno lleva a la formación de una segunda cúspide, una tercera zona a una tercera cúspide y así hasta que el patrón cuspídeo final del diente queda definido. (29, 31)

2.4.3.4. Formación de los tejidos duros

El siguiente paso en el desarrollo del diente es la diferenciación de ameloblastos y odontoblastos y la formación de los tejidos duros del diente, el esmalte y la dentina, proceso conocido como histodiferenciación. Tras el estadio de campana, hasta que la corona del diente alcanza su tamaño completo, serán únicamente las células del margen cervical del esmalte las que se dividan. En las zonas que corresponderán a las futuras cúspides, en donde aparecerá por primera vez una capa de dentina, la actividad mitótica

va a cesar, y las células columnares del epitelio interno del esmalte se van a elongar y cambiar de polaridad, quedando sus núcleos enfrentados a la papila dental.

Al tiempo que ocurren cambios celulares en el epitelio interno del órgano del esmalte, se van a producir alteraciones también en las células de la papila. Las células ectomesenquimales indiferenciadas aumentan significativamente su tamaño y se van a diferenciar a odontoblastos. Este aumento en el tamaño celular implica la desaparición del espacio acelular entre la papila y el epitelio interno del órgano del esmalte. Además se ha comprobado, que la diferenciación odontoblástica se va a producir por la influencia de las células del epitelio interno ya mencionadas. En ausencia de estas células parece imposible la formación de dentina.(29, 31)

Según avanza el desarrollo, las células del epitelio interno se van diferenciando progresivamente en la zona cuspídea, mientras que en la papila se va a producir una diferenciación odontoblástica. Los odontoblastos, una vez diferenciados, comenzarán a elaborar matriz orgánica dentinaria que poco a poco irá mineralizándose. Una vez depositada está matriz dentinaria, los odontoblastos van a migrar al centro de la papila, dejando en su recorrido extensiones de citoplasma, alrededor de las cuales se formará dentina, adquiriéndose, así, el aspecto tubular de la misma.(29)

Una vez formada la primera capa de dentina, los ameloblastos generados en el epitelio interno del órgano del esmalte comenzarán a secretar proteínas del esmalte formando una matriz orgánica que estará en íntimo contacto con la matriz dentinaria. Esta matriz se mineraliza inmediatamente, convirtiéndose en la capa inicial de esmalte. Aunque la secreción de proteínas en el esmalte ocurre antes de que la matriz de dentina sea visible, éstas no van a adquirir una forma de capa hasta que la dentina se haya formado. Igualmente, los ameloblastos se van a ir progresivamente alejando de la dentina formada, incrementando así el espesor del esmalte. Se ha comprobado que para que ocurra la diferenciación odontoblástica, éstos deben recibir señales de los ameloblastos formados en el epitelio interno del órgano del esmalte y viceversa, fenómeno conocido como inducción recíproca. .(29, 31, 34)

En incisivos y caninos se aprecia un único centro de calcificación, apareciendo en el centro del borde incisal. A partir de éste, se calcificará toda la corona. En molares y premolares el epitelio interno da lugar al patrón inicial de corona y los centros de

calcificación van a coincidir con las cúspides. Según progresa la calcificación, se produce la coalescencia de los diferentes centros.(29, 31)

La formación del esmalte se circunscribe únicamente a la fase preeruptiva de la odontogénesis, finalizando cuando los ameloblastos depositan sobre la corona una delgada membrana orgánica denominada cutícula primitiva, del esmalte o de Nasmyth, dando lugar al epitelio dental reducido, que va a proteger al diente durante el proceso eruptivo.(36)

2.4.3.5. Formación de la raíz

La raíz dentaria está constituida por dentina cubierta de cemento. Al igual que ocurría en la formación coronal, se hace necesaria la presencia de células epiteliales para iniciar la diferenciación de los odontoblastos. Así, las células del epitelio interno y externo del esmalte van a proliferar desde el lazo cervical del órgano del esmalte para formar una doble capa celular conocida como vaina epitelial de Hetwig, que se va a extender alrededor de la pulpa, dejando libre la zona basal que dará lugar al foramen apical.

En los dientes unirradiculares, las células epiteliales internas de la vaina radicular van poco a poco rodeando y encapsulando a la pulpa y diferenciándose en odontoblastos a partir de las células ectomensenquimales de la periferia pulpar. En dientes multirradiculares el proceso es similar, apreciándose dos o tres lenguas de epitelio en torno al tejido pulpar. Sobre la dentina mineralizada se depositará una delgada capa de hueso especializado o cemento.(29, 32)

La vaina radicular que iría desde el lazo cervical hasta el foramen apical se puede apreciar solamente en estadios iniciales de formación radicular, ya que una vez formada comienza la formación de la raíz. En el adulto puede persistir como restos epiteliales de Malassez dentro del ligamento periodontal y ocasionar quistes radiculares. (29, 31)

5. Determinación del patrón dentario

La determinación del tipo de diente y su localización en las arcadas dentarias es lo que hoy se conoce como dental patterning o patrón dental. Actualmente se cree que la formación y localización específica de cada diente se debe a una concentración de

factores de señalización como son factores de crecimiento (EGF, BMP o FGF), ácido retinoico y Sonic hedgehog (Shh), que hacen que las células expuestas a ellos respondan mediante la expresión de factores de transcripción, que llevarán a la activación y diferenciación de los diferentes tipos celulares.

Estos fenómenos se inician presumiblemente en estadios muy tempranos. Se cree que la morfogénesis de los incisivos depende de un mecanismo asociado a la formación de la línea media facial, mientras que el resto de dientes se regularían por mecanismos diferentes.

Los nudos del esmalte, ya mencionados, actuarían como focos de crecimiento y de secreción de factores de señalización que servirían como estimulantes para el crecimiento del epitelio dental interno alrededor del nudo del esmalte. Estos factores de señalización permiten la expresión de factores de transcripción, que servirán como selectores para las diferentes cascadas de diferenciación, que conducirán a la morfogénesis y diferenciación tisular. (37)

Se ha comprobado (principalmente en modelos murinos) la interacción de diversos genes en el proceso inicial de formación dentaria. Entre las principales familias de genes implicadas encontramos:

- Familia *Dlx* (1, 2, 3, 5, 6 y 7): Estarían relacionados en la regionalización de los maxilares para los diferentes tipos dentarios. Igualmente participarían en la iniciación de la formación dentaria, así como en la morfogénesis e histogénesis de los dientes (sobre todo en molares).
- Familia *Pax* (2 y 6) y *Shh*.: Se encargarían de la señalización y el patrón de los incisivos maxilares, que se regularían por separado del los otros dientes.
- Familia *Msx* (1 y 2) y *Lef 1*: Tendrían un papel importante en el crecimiento de la lámina dental y en la inducción del mesénquima en incisivos.
- *Barx-1*: Implicado en la diferenciación del ectomesénquima en molares.(29, 37-39)

2.4.5. El fenómeno eruptivo

Inmediatamente después al inicio de la formación radicular, el diente comienza a erupcionar hasta que finalmente adquiere su posición en la cavidad oral con su superficie oclusal en el plano oclusal correspondiente.

La corona debe romper la cripta ósea y atravesar la línea mucosa de la cavidad oral. Al comenzar los fenómenos eruptivos, el esmalte coronal está aun cubierto de una capa de ameloblastos y remanentes de las capas del órgano del esmalte. Así, dichos ameloblastos y las células adyacentes formarán lo denominado como epitelio reducido del esmalte. Poco a poco el hueso que cubre el diente en erupción va reabsorbiéndose y la corona va a atravesar el tejido conectivo de la mucosa. El epitelio reducido y el epitelio oral van a fundirse y formar una masa de células epiteliales que cubrirán la corona. Las células centrales en esta masa se van a ir degenerando, formando un canal epitelial a través del cual el diente erupciona.(29)

Moyers describe tres fases en la erupción:

1. La fase preruptiva: Corresponde a la etapa en la que completada la calcificación de la corona, se inicia la formación de la raíz y tiene lugar la migración intraalveolar hacia la superficie de la cavidad oral. Incluso en esta fase, el germen dentario realiza pequeños movimientos de inclinación y giro, en relación con el crecimiento de los maxilares.
2. La fase eruptiva prefuncional: Etapa en la que el diente está presente ya en boca sin establecer contacto con el antagonista. Cuando el diente perfora la encía, su raíz presenta aproximadamente entre la mitad y los dos tercios de su longitud final. La emergencia de la corona en la cavidad oral recibe el nombre de erupción activa. Simultáneamente ocurre un desplazamiento de la inserción epitelial en dirección apical que recibe el nombre de erupción pasiva.
3. La fase eruptiva funcional: El diente ya establece su oclusión con el antagonista y los movimientos que ocurren van a durar toda la vida, tratando de compensar el desgaste o abrasión dentaria.(40)

2.4.6. Erupción de la dentición temporal

Los dientes temporales comienzan a hacer su aparición en boca a los seis meses de edad y su secuencia eruptiva es la siguiente: incisivo central inferior, incisivo central superior, incisivo lateral superior, incisivo lateral inferior, primer molar inferior, primer molar superior, canino inferior, canino superior, segundo molar inferior y segundo molar superior. Se puede comprobar que, en general, los dientes de la arcada inferior preceden a los de la superior, aunque los incisivos laterales superiores suelen preceder a los inferiores. (41)

Pueden considerarse como normales pequeñas variaciones individuales a las que frecuentemente se les atribuye en influencia genética. De todos modos, entre los veinticuatro y treinta y seis meses de edad han hecho ya su aparición los veinte dientes de la dentición temporal, encontrándose ya a los tres años totalmente formados y en oclusión. Massler considera los treinta y seis meses como normal con una desviación de más/menos seis meses.(42)

En cuanto al sexo, no se han observado diferencias estadísticamente significativas (43), ahora bien, parece ser que en las niñas, los dientes temporales erupcionan 1,1 mes antes que en los niños, excepto el primer molar temporal.(44, 45)

La siguiente tabla resume toda la cronología referente a la erupción de la dentición temporal. (Tabla 1)

Dientes temporales	Formación tejido duro (semanas en útero)	Cantidad esmalte formado al nacer	Esmalte terminado (meses después nacimiento)	Erupción (promedio edad meses \pm DE)	Raíz terminada (Año)
Inferiores					
Incisivo Central	14 (13-16)	Cinco sextos	1,5	10 (8-12)	1,5
Incisivo Lateral	16 (14,75-16,5)	Dos tercios	2,5	11 (9-13)	2
Canino	17 (15-18)	Un tercio	9	19 (16-22)	3,25
Primer Molar	15,5 (14,5-17)	Cúspides unidas; oclusal totalmente calcificado	6	16 (13-19) Niños (14-18) Niñas	2,5
Segundo Molar	19 (16-23,5)	Vértices cuspidos todavía aislados	11	29 (25-33)	3
Superiores					
Incisivo Central	14 (13-16)	Tres quintos	2,5	8 (6-10)	1,5
Incisivo Lateral	16 (14,75)	Tres quintos	3	13 (10-16)	1,5
Canino	17 (16-)	Un tercio	9	17 (15-21)	3,25
Primer Molar	15,5 (14,5-17)	Cúspides unidas; oclusal completamente calcificado	5,5	16 (14-18)	2,25
Segundo Molar	18 (17-19,5)	Vértices cuspidos todavía aislados	10	27 (23-31) Niños (24-30) Niñas	3

Tabla 1: Cronología del desarrollo de la dentición temporal.

Basado en los datos de Logan y Kronfeld y ligeramente modificada por McCall y Schour.(41)

3.- HIPÓTESIS DE TRABAJO

Consideramos la creación de una herramienta virtual que nos permitiera satisfacer a medio-largo plazo las demandas en relación con la adecuación al nuevo modelo educativo de los planes de estudios al plan Bolonia:

- Fomento de la capacidad de autoaprendizaje por parte del alumno.
- Desarrollo de competencias.
- Adaptación del programa educativo a las nuevas tecnologías.
- Respuesta al imperativo tecnológico actual.
- Mejorar la relación entre costes y eficacia de la enseñanza.

5.- OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es la creación de un modelo virtual de mandíbula, partiendo de un sujeto infantil real, que sirva como herramienta educativa en el ámbito de la Anatomía Odontopediátrica.

OBJETIVOS SECUNDARIOS

1.- Realizar la representación tridimensional de cada germen del diente permanente.

2.- Ejecutar la imagen tridimensional de cada uno de todos los dientes temporales presentes en la cabeza humana infantil analizada.

5.- MATERIAL Y MÉTODO

A partir de los cortes tomográficos ejecutados sobre cadaver en una cabeza de una niña de tres años de edad, procedimos a la reconstrucción tridimensional de la mandíbula.

Para ello, necesitamos del programa Amira 5.3.0, instalado en un ordenador portátil de la marca Toshiba, modelo Satellite L675- 11N de 64 bits, con un procesador Intel Core I5 M480 a 2,7 GHz y con una Memoria Ram de 4,00 GB, con el sistema operativo Windows 7 Home Premium.

El software Amira, instalado y cedido por la empresa D. I. Abadía, permite visualizar las imágenes en los tres planos del espacio, coronal (xy), sagital (yz) y transversal (xz). En cada plano, el usuario puede interactuar, e ir moviéndose corte a corte para examinar de forma rigurosa todas las estructuras óseas y cavidades a nivel craneal. A su vez, permite una reconstrucción tridimensional de la imagen, transformando la unidad bidimensional pixel, a una tridimensional llamada voxel.

El vóxel (volumetric pixel) es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional. Constituye la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional y es, por tanto, el equivalente del píxel en un objeto 3D.

Para crear una imagen en tres dimensiones, al tratarse de imágenes en escalas de grises, los vóxeles tienen que sufrir una transformación de densidad en función de las diferentes estructuras. Esta información confiere diferentes valores de densidad a cada vóxel. Esto es importante cuando se han de mostrar detalles interiores de una imagen que quedaría tapada por la capa exterior más opaca de los vóxeles.

Al igual que los píxeles, los vóxeles no contienen su posición (x,y,z) en el espacio 3D, sino que esta se deduce por la posición del vóxel dentro del archivo de datos.

Las estructuras anatómicas capturadas en el escáner, deben convertirse en áreas marcadas y reconstruidas tridimensionalmente. Este proceso lleva el nombre de segmentación. En nuestro proyecto hemos segmentado la mandíbula. Todas estas áreas delimitadas en dos planos, de forma manual, y generadas de forma semiautomática a un sistema tridimensional, han de ser catalogadas con un nombre (mandíbula, cada diente y germen con su nombre...), de tal manera que cuando el usuario pinche sobre la estructura, se marque en todos los planos del espacio y se genere automáticamente la

estructura tridimensional que representa, en una organización espacial adecuada.

Para conseguir esto a partir de las imágenes generadas por el escáner, se realizan los procedimientos de segmentación y etiquetado.

La segmentación de imágenes se define como la partición de una imagen en regiones constituyentes no solapadas, las cuales son homogéneas con respecto a alguna característica como una intensidad o una textura.

El etiquetado nos permite lograr la clasificación de píxeles, objetivo deseable en el tratamiento de imágenes medicas, ya que, normalmente, se hace necesaria la clasificación de regiones desconectadas que pertenecen al mismo tejido.

Nosotros hemos segmentado el hueso mandibular, con todos los dientes temporales erupcionados, así como los gérmenes de los dientes definitivos en formación. Para ello se ha utilizado un código arbitrario de colores, así como la denominación anatómica de las diferentes estructuras.

El coste en horas de trabajo de estos dos procedimientos de segmentado y etiquetado supuso un total de aproximadamente 160 horas exclusivamente, de labor informática.

LIMITACIONES DE NUESTRO ESTUDIO

En nuestro proyecto, de momento hemos conseguido segmentar las diferentes estructuras anatómicas mandibulares, datos de utilidad anatómica y odontopediátrica. Dado que contamos con el esqueleto craneal completo, futuros trabajos irán destinados a la segmentación del maxilar. Sería interesante igualmente proceder a datar al sistema de propiedades estereoscópicas y asociarle un sistema háptico para su aplicación a nivel de operatoria. No obstante, somos conocedores del importante coste económico que ello supondría. Algo más sencillo sería simular situaciones reales (pulpotomías, selladores de fosas y fisuras, preparación de cavidades...), que serían un elemento didáctico para que el estudiante se fuese familiarizando con las situaciones reales antes de enfrentarse a la práctica con pacientes.

6.- RESULTADOS

A partir de las imágenes tomográficas obtenidas y transferidas al programa Amira 5.3.0. obtuvimos en nuestro ordenador todos los datos concernientes a la cabeza divididos en cortes: coronal (xy), sagital (yz) y transversal (xz), de extrema utilidad para trabajar en la segmentación y el etiquetado.

Se obtuvieron un total de 512 cortes en el plano coronal (xy) y sagital (yz) y 309 en el transversal (xz).

Así mismo, el programa nos permite trabajar a nivel tridimensional como bidimensional, en sus diferentes pantallas.

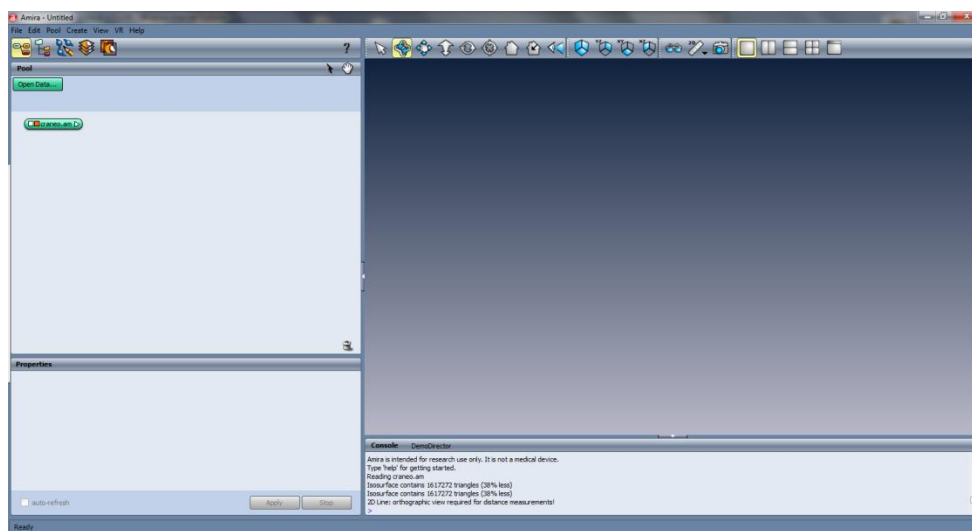


Fig.11:Imagen de la pantalla de inicio principal del programa Amira 5.3.0

La figura 11 muestra la pantalla de inicio del programa, a partir de la que vamos a poder acceder a las diferentes herramientas de trabajo, así como visualizar las segmentaciones obtenidas. Las siguientes tres figuras nos muestran la estructura esquelética de la que partíamos, mediante la obtención de una reconstrucción tridimensional con una de las herramientas del programa. (Figura 12)

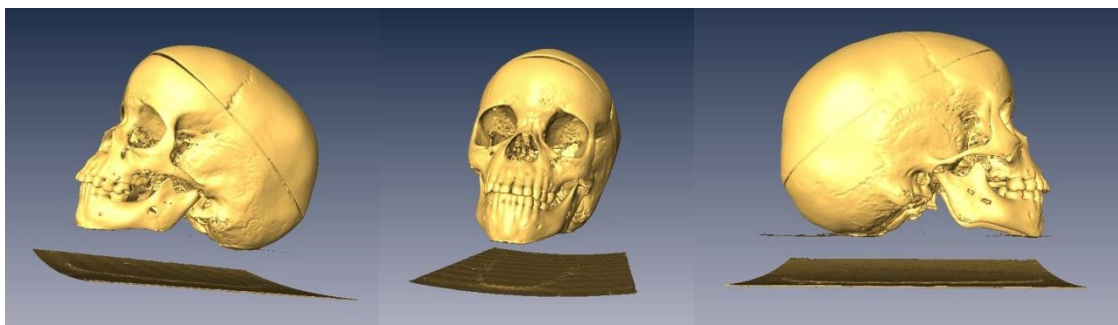


Fig.12: Reproducción 3D de la cabeza del cadáver en visiones laterales y frontal

A partir de la pantalla de inicio, accedemos a nuestra pantalla de segmentaciones, desde donde trabajaremos para delimitar nuestra estructura mandibular y los órganos dentarios. La figura 13 muestra el botón de acceso a dicha pantalla.

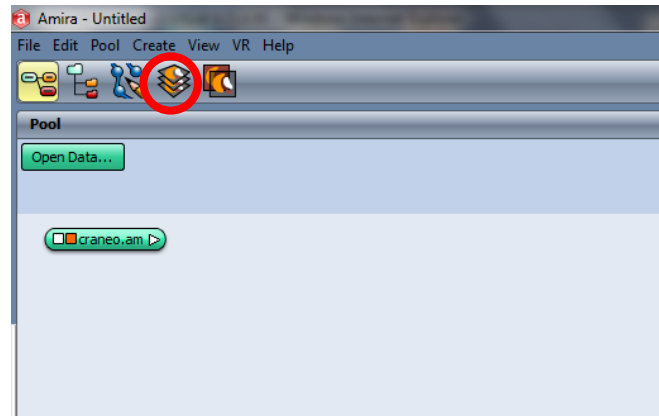


Fig.13: Botón de acceso a la herramienta de segmentación (rodeado de círculo rojo)

Una vez en dicha pantalla procedimos a segmentar en primer lugar el hueso mandibular y posteriormente los dientes permanentes y gérmenes de dientes temporales. Como demuestra la figura 14, podemos trabajar en los tres planos del espacio, delimitados por los cuadrados superiores y el inferior izquierdo. El cuadrado inferior derecho corresponde a una simulación de los tres planos en la que podemos interactuar y visualizar el lugar en el que nos encontramos sumando los tres cortes.

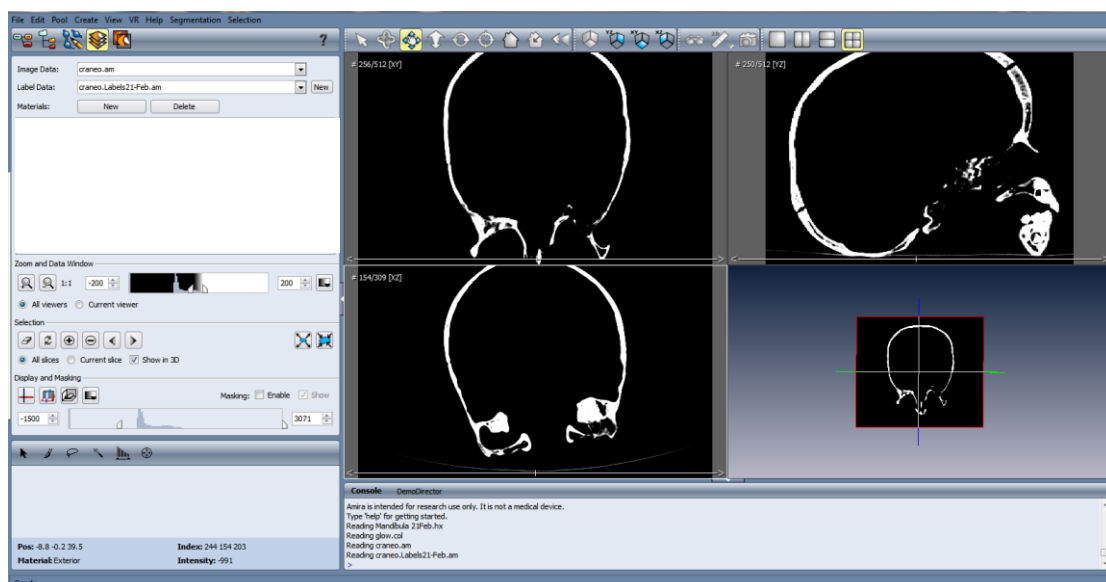


Fig.14: Pantalla de segmentaciones

En nuestro caso utilizamos como corte de partida el sagital, porque opinamos que es en el que se aprecian con mayor claridad en origen las diferentes estructuras.

Para ello obviamos el resto de cortes y en la pantalla colocamos únicamente el axial y ampliamos la imagen para una mayor visualización a la hora de comenzar a segmentar. Con el cursor del ratón vamos dibujando y delimitando estructuras. La figura 15 muestra el inicio de la segmentación mandibular.

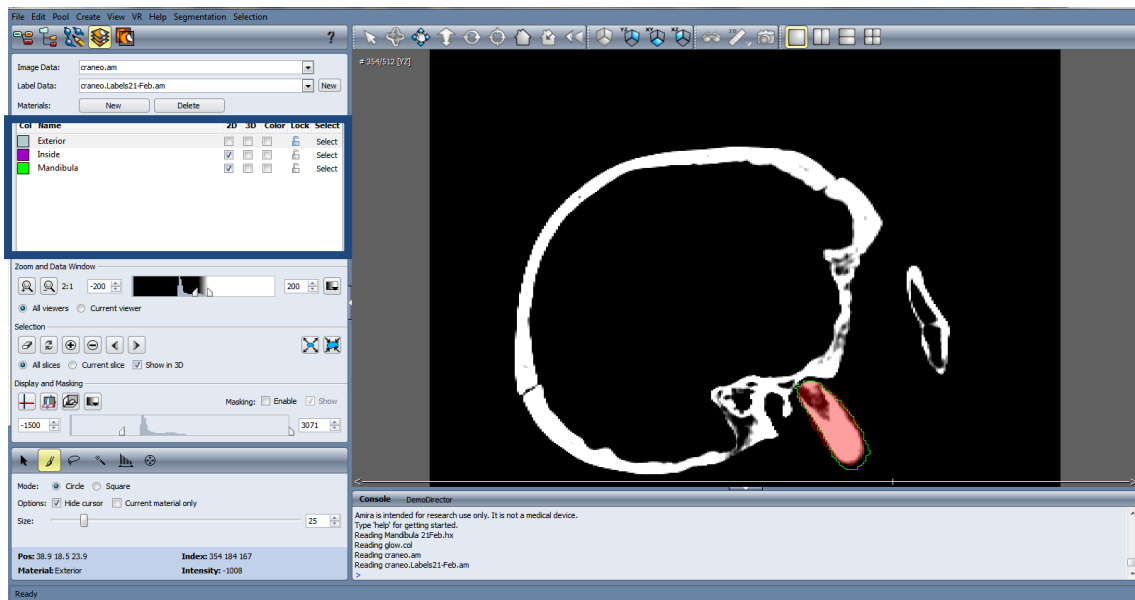


Fig.15: Comienzo de la segmentación mandibular

Como vemos, existe un área roja, que el que vayamos delimitando nosotros y al que asignaremos un nombre y un color (un “label”), que como se aprecia, queda reflejado en la parte superior izquierda de la pantalla. (recuadro azul de la figura). La asignación de nombre y color es arbitraria. En nuestro trabajo se han segmentado un total de veinticinco estructuras, que incluyen el hueso mandibular, la totalidad de la dentición temporal inferior, así como todos los correspondientes gérmenes de los dientes definitivos en sus respectivos estadios evolutivos. La figura 16 resume las estructuras segmentadas, con su etiquetado y asignación cromática.

Col	Name
Light Blue	Exterior
Purple	Inside
Green	Mandibula
Red	Saco_con_2_Molar_Definitivo_Inf_dcho
Yellow	Saco_con_1_Molar_Definitivo_Inf_dcho
Cyan	Segundo_Molar_Temporal_Inf_dcho
Magenta	Saco_2_Pm_Inf_dcho
Brown	Primer_Molar_Temporal_Inf_dcho
Teal	Saco_1_Pm_Inf_dcho
Dark Green	Saco_canino_inf_Definitivo_dcho
Pink	Canino_Temporal_inf_dcho
Gold	Saco_Incisivo_Lateral_Definitivo_inf_dcho
Dark Blue	Incisivo_Lateral_In_fTemporal_dcho
Dark Red	Saco_Incisivo_Central_Inf-Definitivo_dcho
Light Red	Incisivo_Central_Inf_Temporal_dcho
Light Red	Incisivo_Central_Inf_Temporal_izdo
Dark Blue	Incisivo_Lateral_Inf_Temporal_izdo
Pink	Canino_Temporal_inf_izdo
Brown	Primer_Molar_Inferior_Temporal_izdo
Cyan	Segundo_Molar_Inferior_Temporal_izdo
Dark Red	Saco_Incisivo_Central_Inf_Definitivo_izdo
Gold	Saco_Incisivo_Lateral_Inferior_Definitivo_izdo
Dark Green	Saco_Canino_Definitivo_Inferior_izdo
Teal	Saco_1Pm_Definitivo_Inferior_izdo
Magenta	Saco_2Pm_Definitivo_Inferior_izdo
Yellow	Saco_1_Molar_Definitivo_Inferior_izdo
Red	Saco_2_Molar_Definitivo_Inferior_izdo

Fig.16: Estructuras segmentadas y etiquetadas

Todo este trabajo finalmente conduce a la creación de una estructura tridimensional totalmente interactiva de la mandíbula. Las siguientes figuras demuestran la evolución en la determinación de cada uno de los elementos hasta la final obtención de la plena estructura mandibular.(Figuras 17-23)

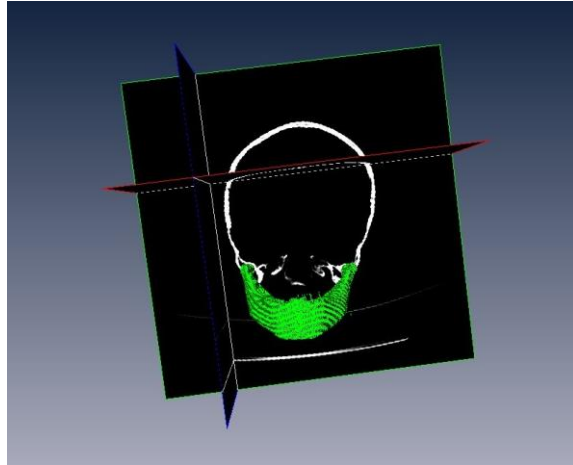


Fig.17: Mandíbula segmentada. Visión 3D

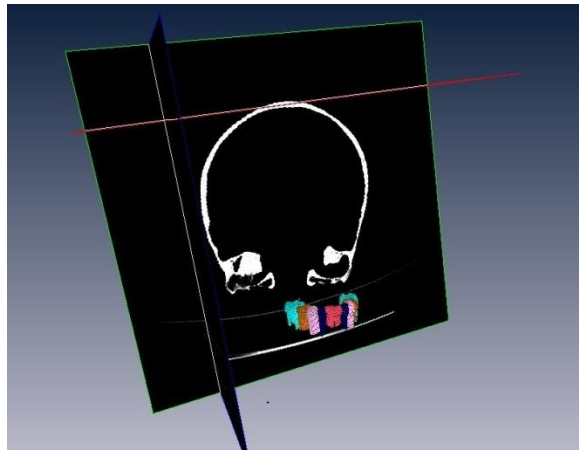


Fig.18: Segmentación de dientes temporales

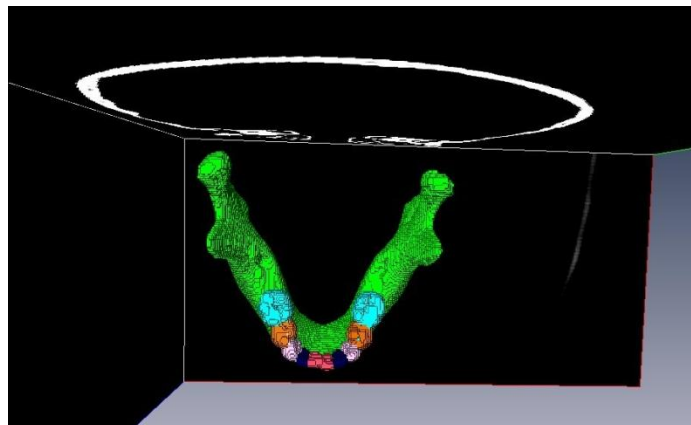


Fig.19: Segmentación de dientes temporales con hueso mandibular

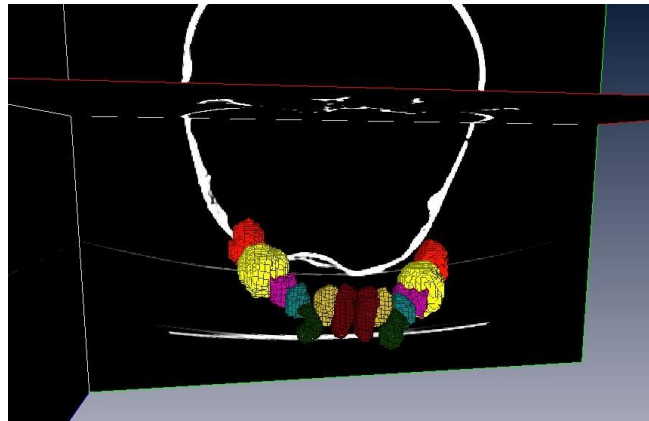


Fig.20: Segmentación de los gérmenes de los dientes definitivos

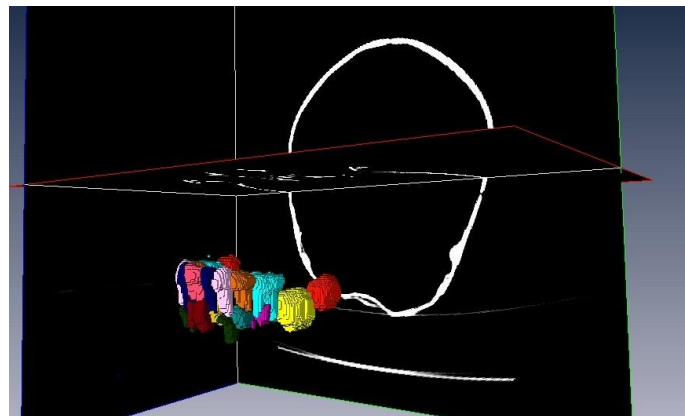


Fig.21: Segmentación de los gérmenes de los dientes definitivos y su relación con los dientes temporales

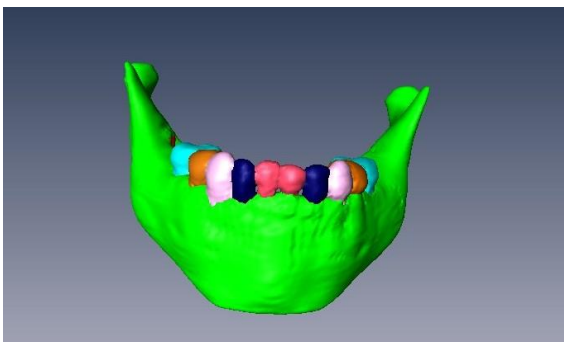


Fig.22: Vista frontal final del modelo

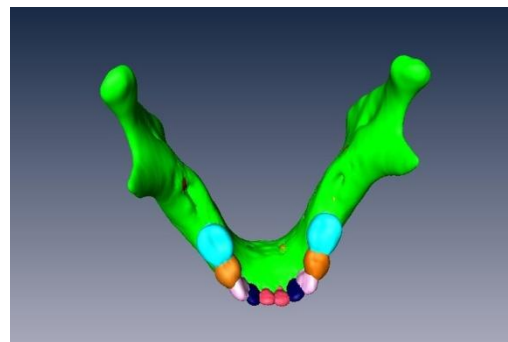


Fig.23: Vista coronal final del modelo

En el apartado de Anexos, adjuntamos en CD- ROM que incluye el programa, así como toda la segmentación, para poder interactuar con él y visualizar el modelo desde todos los planos, que hemos trabajado y elaborado en la presente investigación en aras a que el estudiante de odontología pueda diferenciar desde el punto de vista de una imagen real y tridimensional, el diferente estado de las estructuras dentarias de un ser humano de tres años de edad.

7.- DISCUSIÓN

El aprendizaje de Anatomía de un modo convencional ha estado basado en el empleo de atlas y disecciones. Un atlas proporciona imágenes claras y detalladas de todos los elementos de estudio, pero con la limitación de la visualización en dos dimensiones. Las disecciones ayudan al alumno a familiarizarse con la realidad, permitiendo comprobar la organización espacial de las estructuras de estudio, sus relaciones, inserciones...pero tienen el problema de la temporalidad, la dificultad de la obtención de los especímenes...(1, 2)

Para tratar de acercar al alumno y al profesional sanitario hacia un aprendizaje más dinámico y adaptado a las nuevas tecnologías surgió la idea de crear bases de datos anatómicas, que permitieran, mediante una conexión en red, acceder a un amplio conocimiento sobre especímenes reales previamente digitalizados. Así, en el año 1987 la NLM (National Library of Medicine) planteó la necesidad de crear una biblioteca virtual de imágenes biomédicas. Ésta se basaría en la creación de una base de datos de imágenes completas de un hombre y una mujer; es lo que hoy conocemos como el “*Visible Human Project*”. Este proyecto incluye imágenes tomadas de tomografías computarizadas, resonancias magnéticas y fotografías de criosecciones de cadáveres. En colaboración con la Universidad de Medicina de Colorado, consiguieron la adquisición ya en 1994 del cadáver varón y posteriormente el de la mujer. El varón era un hombre de 38 años sin patología previa (salvo una apendicectomía) que recibió la inyección letal en Texas. Con la intención de evitar un deterioro tisular, el cuerpo fue sometido al tratamiento con formalina y anticoagulantes, hasta llegar a la Universidad donde empezaría el trabajo con él. En primer lugar se le realizó la resonancia magnética (a las 18 horas de la muerte), tomando imágenes en los planos axiales y coronales, para posteriormente ser sometido a la tomografía. Dado que posteriormente el cadáver iba a ser seccionado y congelado para los criosecciones y que las imágenes tomográficas debían corresponderse con las de la criosección, se inmovilizó el cadáver para conseguir dicha reproducibilidad. Se hicieron cortes transversales cada 3 mm. de cabeza y cuello, tórax, abdomen y pelvis, y cada 5 mm. en las extremidades inferiores. Posteriormente el cadáver fue congelado y vuelto a someter a tomografía, esta vez cada 1 mm. para corresponderse con las secciones adquiridas un año después a través de la criosección y que llevarían este espesor.(46) Una vez obtenidas las imágenes de las diferentes fuentes, se procesaron digitalmente, obteniéndose una reconstrucción tridimensional, así como los cortes pertinentes. Igualmente se creó una mujer. La única diferencia es que las

secciones en vez de tomarse cada 1 mm., se tomaron cada tercio de milímetro. (47)
Dada la edad avanzada de la mujer, su útero y ovarios estaban atrofiados.(2)

Unos años después de la creación del VHP, surgieron nuevos modelos con la idea de mejorar lo ya creado. En 2001, la Universidad de Ajou en Korea, en colaboración con el Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología de la Información, crearon el Visible Korean Human (VKH), a partir del cadáver de un hombre de 33 años de edad muerto por leucemia.(5, 6) Con este proyecto pretendía mejorar las imágenes obtenidas en el VHP, ya que por ejemplo las secciones no incluían rangos inferiores a los 0,33 mm., y los colores no eran reales debido a la inyección de formalina para el mantenimiento del cadáver, además de no incluir imágenes segmentadas.(5) Por ello, sometieron el cadáver a resonancia magnética, en primer lugar, realizando cortes de 1 mm. sin dejar ningún tipo de gap entre cada sección, al igual que ocurrió con los cortes tomográficos efectuados cada 1mm. sin gaps intermedios. En ningún momento se inyectó ninguna sustancia conservante en el cuerpo. Posteriormente se realizaron, tras la congelación del cadáver, las criosecciones, esta vez cada 0, 2 mm. Una vez digitalizados todos los datos obtenidos, se procedió a segmentar estructuras importantes (piel, huesos, hígado, pulmones, riñones, arterias, sistema urinario, respiratorio, digestivo, cerebro, corazón), algo que no se había realizado en el VHP.(5, 6)

Con la idea de crear una base de datos anatómica, representativa de la población asiática, surge el Chinese Visible Human (CVH), un proyecto que incluye un hombre y una mujer normales, que surge en 2002, con la creación de CVH varón, y en 2003 con la creación de la mujer. Ambos eran especímenes jóvenes, sanos que se ajustaban a lo que sería una población teórica real. El varón tenía 35 años de edad fallecido por inhalación de monóxido de carbono, y la mujer 22, fallecida por envenenamiento. A diferencia de lo que ocurrió en el proyecto coreano, a los cadáveres chinos se les inyectó una solución de gelatina roja, para mejorar la visualización del circuito arterial y venoso. Las secciones de la resonancia se efectuaron cada 3 mm., mientras que las tomográficas cada 1 mm. Las criosecciones fueron menos precisas que las koreanas, ya que tuvieron un espesor de 0,5 mm. para cabeza y cuello, 0,1 mm. para la base del cráneo y 1 mm para el resto del cuerpo, en el varón y 0,25 mm. para cabeza y 0,5 mm. para el resto del cuerpo en la mujer Posteriormente los datos fueron digitalizados y reconstruidos tridimensionalmente, pero sin segmentarse(1, 2, 48)

En nuestro proyecto, hemos obtenido únicamente las imágenes a partir de cortes tomográficos, a partir de un cráneo que se encuentra en óptimas condiciones de conservación, que cumplen realmente con los objetivos del presente proyecto. Además, cabe destacar que hasta ahora no existe ningún modelo similar sobre espécimen real de un sujeto en edad infantil.

La siguiente tabla resume los datos más relevantes de los estudios mencionados. (tabla 2)

Estudio	Año	Localización	Especimen	Imágenes	Limitaciones	Implicación
VHP	1994	Universidad Colorado	Varón 38 años (Visible man)	Resonancia Magnética	Espesor elevado secciones (5 mm)	Primer estudio sobre espécimen real
		NLM		Tomografía	Tratamiento cadáver	Base para la creación de biblioteca imágenes digital
				Criosecciones		Base para proyectos futuros
VHP	1995	Universidad Colorado	Mujer 59 años (Visible woman)	Resonancia Magnética	Atrofia útero y ovarios	Primer estudio sobre espécimen real
		NLM		Tomografía	Espesor secciones elevado	Base para la creación de biblioteca imágenes digital
				Criosecciones	Tratamiento cadáver	Base para proyectos futuros
VKH	2001	Universidad Ajou	Varón 33 años	Resonancia Magnética	Paciente con leucemia	Segmentación de estructuras
				Tomografía		Espesores más finos y sin gaps
				Criosecciones		
CVH	2002	Universidad de Hong Kong	Varón 35 años	Resonancia Magnética	Tratamiento cadáver	Especimen representativo de población asiática
				Tomografía	No segmentación	Base para proyectos futuros
				Criosecciones		
CHV	2003	Universidad de Hong Kong	Mujer 22 años	Resonancia Magnética	Tratamiento cadáver	Especimen representativo de población asiática
				Tomografía	No segmentación	Base para proyectos futuros
				Criosecciones		
Nuestro proyecto	2011	Universidad Complutense de Madrid	Mujer 3 años	Tomografía	Únicamente cortes tomográficos	Primer modelo sobre espécimen infantil
		Universidad de Salamanca			Sólo esqueleto craneofacial	Utilidad odontológica

Tabla 2: Resumen de estudios y datos más relevantes

A parte de la importancia e innovación que supusieron los trabajos descritos previamente como bases de datos digitales a disposición mundial, un paso más supuso el empleo de las imágenes obtenidas como sustento para modelos volumétricos reales que sirvieran para el aprendizaje de las destrezas diagnósticas, quirúrgicas... Por ejemplo, a partir del VKH, se creó un fantoma en tamaño real, que permitiese simular situaciones quirúrgicas reales, planificándolas en conjunto desde la base de datos digital. (49)

Una revolución al respecto, supuso la creación en el Centro médico Universitario Hamburg-Eppendorf de Alemania, el sistema “*Voxel Man*”.(2) El proyecto surgió previamente a la existencia del VHP, por la inquietud del profesor Karl Heinz Höhne que creó una simulación tridimensional de un cerebro de un sujeto vivo a partir de cortes tomográficos. Pero la revolución se produjo en los años 90 cuando contaron con las imágenes tomográficas y de resonancia del VHP. A partir de ellas crearon sistemas de segmentación y visualización que permitieron la creación de simuladores y navegadores interactivos. Comenzaron por simuladores del cerebro, y

torso, en los que se podían planificar cirugías, recorrer sistemas venosos, arteriales, planificar sistemas diagnósticos con endoscopia, estudiar la anatomo-fisiología de las extremidades... con una aproximación a la realidad inmejorable. Presentan tres simuladores, dentro de lo que los llaman “See and Feel the Difference” uno, del oído medio, otro de endoscopia sinusal y uno dental, en los que el usuario siente y trabaja sobre las reconstrucciones tridimensionales mediante la incorporación de hardwares basados en realidad virtual y un sistemas de detección de presiones, conocidos como hápticos. (7)

Desde el año 2009 el modelo dental interactivo está permitiendo una enseñanza de la operatoria dental a partir de un sistema feedback. Para ello crearon un modelo virtual a base de cortes tomográficos del que segmentaron los dientes y maxilares y se trabajó para crear un modo estereoscopio, de tal modo que se viesan en tres dimensiones a través de la pantalla, si el usuario contaba con gafas especiales para su visualización. Igualmente se asociaba al equipo un instrumento rotatorio con movimiento en las tres dimensiones y con un sistema de feedback, que permite de una forma fidedigna sentir la aplicación de fuerza aplicada sobre el diente o hueso, apreciándose las diferencias entre esmalte, dentina, tejido cariado. Igualmente se dota de un pedal, que permite ajustar la velocidad del instrumento, y crear situaciones reales, tales como caries, cirugías periapicales...(7, 50)

A nivel de simulación del macizo maxilofacial encontramos en la literatura más ejemplos que demuestran que los modelos tridimensionales son una herramienta novedosa y bastante útil. A partir del Virtual Chinese Human, se creó un modelo de mandíbula similar al de nuestro proyecto, pero empleando como programa auxiliar Photoshop, y sin proceder a la segmentación de las estructuras.(51) Con una metodología similar a la nuestra, en la Universidad de Ontario se construyó un modelo de cabeza y cuello a partir de un cadáver de un varón edéntulo, basándose en imágenes tomográficas. Utilizando el programa Amira segmentaron y etiquetaron las diferentes estructuras y procedieron a la reconstrucción tridimensional del mismo. Llegaron a segmentar setenta estructuras, incluidas estructuras blandas (músculos, glándulas...) que se pueden ir añadiendo y quitando para un correcto estudio anatómico.(52) Dado que las imágenes parten de un estudio tomográfico creemos que las segmentaciones referentes a tejidos blandos han sido simuladas. No obstante, y como describen los autores, creemos que es una herramienta de gran utilidad, ya que el dinamismo, la

interactividad... hacen que el aprendizaje sea más eficaz. Este tipo de herramientas, permiten cambiar tamaños, girar los modelos para una mejor visualización de las estructuras, modificar densidades para ver relaciones anatómicas, interactuar en los diferentes planos, trabajar en dos y tres dimensiones...(52)

A nivel anatomo-fisiológico, es interesante el trabajo llevado a cabo en la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda), donde crearon un modelo virtual para el estudio del sistema masticatorio. Para ello, generaron un hipotético modelo óseo basado en las mediciones antropométricas de más de 1000 varones de diecisiete etnias de edades entre veinte y treinta años que supondría. Una vez obtenida la estructura ósea digital, las piezas dentarias derivaron del escaneo de las superficies coronarias de un sujeto, cuyas caras oclusales fueron trazadas de forma aproximada. Dado que el objetivo de este estudio es la valoración del sistema temporomandibular, sobre todo a nivel muscular y articular, los autores recalcan que la precisión en el trazado dentario no es un elemento fundamental. Un punto importante es la simulación de las estructuras musculares que fueron tomadas de los archivos del Visible Human Project y ajustados con la ayuda de anatomistas.(53)

Los modelos virtuales también pueden ser empleados para el aprendizaje de destrezas clínicas. Con los simuladores y navegadores del Voxel Man, muchos cirujanos han planificado cirugías, endoscopias... Diversos estudios comparan la eficacia de trabajar sobre modelos basados en cadáver o modelos virtuales, obteniéndose muy buenos resultados al trabajar sobre el sistema virtual, ya que permite una mejor visualización, la reproducibilidad de las situaciones, un menor coste...(54) Si al software o a los fantasmas les asociamos un sistema háptico, que permita el control del tacto y las presiones ejercidas, así como dotarlo de propiedades estereoscópicas, tendremos una situación similar a un modelo real.(7, 55)

A nivel odontológico, tradicionalmente se ha trabajado sobre fantasmas con tipodontos de plástico, que si bien se acercaban a la realidad, flaqueaban en algunos aspectos. Por ello, se originaron simuladores virtuales que tenían como ventaja la facilidad de evaluación del trabajo realizado, mediante su visualización en el ordenador, pero sobre todo el efecto feedback.(56) El DentSim es un simulador creado en los años 90, que consiste en un maniquí con cabeza y torso con tipodontos de la marca Kavo, una turbina y pieza de mano Kavo, una bandeja ajustable, una jeringa de aire y agua,

aspiración, lámpara; y un ordenador para generar la realidad virtual. Mientras el estudiante prepara la cavidad sobre los tipodontos, el software crea una imagen virtual de la preparación en el ordenador según se va realizando, además de permitir visualizarla en 3D y otorgarle una calificación. Con ello el estudiante puede evaluar de una forma rápida sus errores, mejorarlos, ver su evolución,...(57) Diversos estudios han valorado la eficacia de este sistema como instrumento de aprendizaje de destrezas en cuanto a preparación d cavidades. En el año 1998 la Universidad de Pensylvania comenzó a utilizarlo con los estudiantes de pregrado, obteniendo resultados satisfactorios.(58) Un estudio realizado en la universidad de Columbia demostró la eficacia del DentSim al evaluar la progresión en el aprendizaje en un menor tiempo entre un grupo control que realizaba las cavidades sobre un fantoma tradicional, y un grupo estudio que las realizaba sobre el simulador. Ellos lo atribuyen sobre todo a la autoevaluación inmediata que data el software, ya que con el método tradicional los estudiantes tienen que pasar tiempos de espera hasta que el profesor acude a evaluar, perdiendo así la posibilidad de efectuar más práctica en el mismo tiempo.(59)

Un paso adelante, supone la incorporación de sistemas hápticos a estos simuladores virtuales. Los sistemas hápticos permiten al operador y al ordenador intercambiar energía mecánica. La mayoría de los sistemas se basan en joysticks, dedales o bolígrafos, que dependiendo del tiempo y de la posición en la que se encuentren dan información sobre la textura y superficie en la que virtualmente se está trabajando. Tradicionalmente estos sistemas se han utilizado en cirugías. La Universidad de Odontología de Iowa en colaboración con la Escuela de Ingenieros crearon un sistema háptico basado en un ordenador conectado a un maniquí. En la pantalla se habían generado las secciones de dos dientes, uno con una preparación y otro con caries en el esmalte. Se fabricó un joystick a modo de instrumento rotatorio con propiedades hápticas. Los usuarios afirmaron que era bastante realista la sensación de trabajo sobre los diferentes tejidos dentarios, notándose las diferentes texturas, vibraciones... hecho que demuestra que estos sistemas pueden ser de gran utilidad docente.(60) Este tipo de sistemas se han extendido a las diferentes áreas de la odontología, mostrando gran utilidad en el campo de la implantología, periodoncia, endodoncia, incluyéndose tejidos como el óseo, el ligamento periodontal...como objetos de trabajo.(61-64) Es interesante el trabajo realizado en la Universidad de Tesalónica, donde crearon un modelo virtual de cabeza a partir de las imágenes de

criosecciones del Visible Human Project, que se podía modificar en función del paciente a partir de la toma de dos fotografías del sujeto. Además permitía modelar los dientes, obtener diferentes visiones, elegir la fresa de trabajo... generando una situación cien por cien real(65).

Un trabajo interesante es el propuesto por Konucseven y cols. (66) en Turquía, quienes crearon un completo sistema virtual de aplicaciones dentales. El usuario, en una interface puede modificar la rigidez, amortiguación, coeficiente de fricción, módulos de elasticidad... de los diferentes tejidos, para ser aplicados al sistema háptico incorporado. El modelo dental se creó basándose en un sistema de vóxeles en donde cada capa de tejido fue correctamente segmentada, incluido el tejido cariado cuando así se requería, al igual que los huesos maxilares. La visualización en todos los planos, así como cualquier tipo de variación en el ángulo de apertura de la mandíbula, aumentos y reducciones, son herramientas incorporadas al software. Además se diseñaron virtualmente instrumentos similares a los usados en operatoria, una turbina con fresa de cavidades, una sonda exploradora, una cucharilla, y un atacador, que se sincronizaría con el sistema háptico. Tras enseñar a un grupo de estudiantes el cómo utilizarlo, familiarizándose en primer lugar con el manejo de este tipo de sistemas, la detección del tejido cariado, su remoción, se les pasó un cuestionario para que opinaran al respecto. La mayoría de los usuarios consiguió una remoción y detección de la caries de una manera satisfactoria, sin embargo encontraron un poco engorroso el sistema en cuanto a la familiarización con el empleo del sistema háptico asociado al sistema de realidad virtual.

Empleando el simulador dental del Voxel Man, Pohlenz y cols, crearon un modelo con infecciones periapicales en determinados dientes. Utilizando los sistemas hápticos asociados, un “bolígrafo” a modo de pieza de mano y un pedal para regular la fuerza, los usuarios procedían a realizar las apicectomías de dichos dientes. En todo momento el usuario podía comprobar la orientación de la fresa, las relaciones con las diferentes estructuras mediante los diferentes cortes tomográficos... Tras realizar una encuesta en cuanto a satisfacción en su uso, la mayoría de los participantes encontraron muy útil el sistema y con un realismo absoluto.(50) Creemos que este sistema es de suma importancia ya que no se basa en sistemas finitos o reconstrucciones digitales, las imágenes se han obtenidos a partir de cortes tomográficos reales que son una fuente fidedigna de datos.

Hasta ahora, hemos podido comprobar que los estudios basados en modelos virtuales suponen una herramienta de gran utilidad tanto en el campo de la anatomía como en la adquisición de destrezas manuales. Pero los sistemas encontrados están basados en especímenes adultos. Por ello, creemos que nuestro proyecto supondría un avance, un paso más en estas áreas. El estudio de una mandíbula en desarrollo, la evolución en la secuencia eruptiva, la formación de los gérmenes dentarios... son aspectos fundamentales en el aprendizaje de la anatomía del macizo maxilofacial, así como en Odontopediatría.

Como idea de futuro, nos gustaría segmentar y etiquetar el maxilar, para poder así crear un modelo masticatorio completo. Igualmente sería interesante generar un software de simulación similar al del *Voxel Man*, en su versión dental, que sería pionero a nivel de sujeto infantil. Creemos además que el empleo del programa Amira es un avance en cuanto a interactividad, y no sólo como herramienta de trabajo encargada de segmentar y etiquetar. Con él, el alumno podría manejar los tres planos del espacio de una forma intuitiva y sencilla.

En aras a mejorar la aplicación clínica anatómica se encuentra en las ideas futuras de nuestro grupo el poder crear una herramienta con sistemas hápticos similares a los empleados en Alemania, Turquía o Iowa, sin perder de vista que trabajaríamos sobre un modelo infantil, único hasta la actualidad en este campo.

8.- CONCLUSIONES

1. La llegada del sistema educativo basado en el Plan Bolonia es una realidad. El autoaprendizaje basado en ensayo y error, es una estrategia de suma utilidad para el estudiante. Con un modelo interactivo, el alumno es capaz de valorar sus conocimientos instantáneamente, sin que sea imprescindible la presencia física del profesor.
2. A través de este modelo real, hemos descrito el estudio anatómico de la dentición temporal, así como sus interacciones con la dentición permanente en desarrollo, de una forma tridimensional.
3. Las imágenes conseguidas sobre los gérmenes de los dientes permanentes en desarrollo en este trabajo de investigación, nos permiten evaluar estas estructuras de forma individual y tridimensional en un sujeto humano de tres años de edad.
4. Nuestros objetivos de cara a futuros trabajos, irán dirigidos a la creación del modelo maxilar para así poder contar con el complejo maxilo-mandibular completo, siendo interesante asimismo, la posibilidad de otorgar mejoras en los avances tecnológicos, como la inclusión de sistemas hápticos para la aplicación clínica a la enseñanza en Odontología .

9.- BIBLIOGRAFÍA

1. Zhang SX, Heng PA, Liu ZJ, Tan LW, Qiu MG, Li QY et al. Creation of the Chinese Visible Human data Set. *Anat Rec B New Anat* 2003;275(1):190-5.
2. Yuan Y Qi L, Luo S. The reconstruction and application of virtual Chinese human female. *Comput Methods Programs Biomed* 2008;92(3):249-56.
3. López MLL. Procedimiento Informático para la Generación de Estructuras Cerebrales Tridimensionales. Salamanca: Universidad de Salamanca; 2003.
4. Jin SP, Min S, Sung BH, Byenong-Seok S, Park HS. Visible Korean human: its techniques and applications. *Clin Anat* 2006;19:216-24.
5. Park JS, Chung MS, Hwang SB, Lee YS, Har DH, Park HS. Visible Korean Human. Improved serially sectioned images of the entire body. *IEE Trans Med Imaging* 2005;24(3):352-60.
6. Park JS Chung MS, Hwang SB, Lee YS, Har DH, Park HS. Visible Korean Human: Its Teechniques and Applicarions. *Clin Anat* 2006;19:216-24.
7. Voxel Man. Hamburgo: voxel-man.de;2001 (acceso en marzo de 2011). Disponible en: <http://www.voxel-man.de>.
8. Rubio AM. La historia de la informática. 1ª ed. Madrid: Anaya Multimedia; 1996.
9. Ureña LA, Sánchez AM, Martin MT, Maulas JM. Fundamentos de la informática. 1ª ed. Madrid: RA-MA;1997.
10. Alcalde E. García M. Informática Básica. 2ª ed. Madrid: Mc Graw Hill; 1994.
11. Bretón P. Historia y crítica de la informática. 1ª ed. Madrid: Ediciones Cátedra S.A; 1989.
12. El Khalili N. 3D Web- Based Anatomy Computer- Aided Learning Tools. *Int Arab J Inf Tech* 2005;2(3):248-52.
13. Park C. Computer assisted instruction in medical education. *Ann R Coll Phys Surg Can* 1981;14:374-7.
14. Kuszyk BS Calhoun PS, Soyer PA, Fishman EK. An interactive computer-based tool for teaching the segmental anatomy of the liver: usefulness in the edducation of residents and fellows. *AJR Am J Roentgenol* 1997;169:631-4.
15. Jacoby CG Smith WL, Albanese MA. An evaluation of computer-assisted instruction in radiology. *AJR Am J Roentgenol* 1984;143:675-7.
16. Piemme TE. Computer-assisted learning and evaluation in medicine. *JAMA* 1988;260:367-72.
17. Jaffe CC, Lynch PJ. Computer-aided instruction for radiologic education. *RadioGraphics* 1993;13:931-7.

18. Glenn J. A consumer-oriented model for evaluating computer-assisted instructional materials for medical education. *Acad Med* 1996;71:251-5.
19. Torales OE. Diseño y evaluación de una aplicación multimedia para la enseñanza de radiología a alumnos de Medicina (AMERAM) Málaga: Universidad de Málaga; 2008.
20. Solano E, Mendoza A. Crecimiento craneofacial y desarrollo de las arcadas dentarias. En: Boj JR, Catalá M, García- Ballesta C, Mendoza A, Planells P. *Odontopediatría La evolución del niño al adulto joven*. 1ª ed. Madrid: Ripano; 2010. p. 45.
21. Berkovitz BKB, Holland GR, Moxhan BJ. Development of the face. En: Berkovitz BKB, Holland GR, Moxhan BJ. *Oral anatomy, histology and embryology*. 4ª ed. UK: Mosby Elsevier; 2009. p. 278-9..
22. Nanci A. Embriology of the Head, Face and Oral Cavity. En: Nanci A. *Ten Cate's Oral Histology: Development, Structure, and Function*. 7ª ed. St. Louis: Mosby Elsevier; 2008. p. 32-56.
23. Berkovitz BKB, Holland GR , Moxhan BJ. Development of the jaws. En: Berkovitz BKB, Holland GR , Moxhan BJ. *Oral anatomy, histology and embryology*. 4ª ed. UK: Mosby Elsevier; 2009. p. 293-5.
24. Enlow D. The Facial Growth process. En: Enlow D. *Facial Growth*. 3ª ed. Philadelphia: Saunders Company; 1990. p. 58-148.
25. Mérida JR, Rodríguez J, Mérida JA, Sánchez I, Espín J, Jiménez J. Development of the human temporomandibular joint. *Anat Rec* 1999;255(1):20-33.
26. Ruvière H, Delmas A. *Anatomía humana. Descriptiva, topográfica y funcional*. 10ª ed. Barcelona: Masson; 2001. p. 73.
27. Sobotta J. Cabeza y cuello. En: Sobotta J. *Atlas de Anatomía Humana*. 20 ed. Madrid: Ed. Médica Panamericana; 1993. p. 28-159.
28. Ruvière H, Delmas A. *Anatomía humana. Descriptiva, topográfica y funcional*. 10ª ed. Barcelona: Masson; 2001. p. 87-94.
29. Nanci A. Development of the Tooth and Its Supporting Tissues. En: Nanci A. *Ten Cate's Oral Histology: Development, Structure, and Function*. 7ª ed. St. Louis: Mosby Elsevier; 2008. p. 79-107.
30. Thesleff I, Vaahtokari A, Vainio S. Molecular changes during determination and differentiation of the dental mesenchymal cell lineage. *J Biol Buccale* 1990;18:177-88.
31. Kitamura H. Early development of the teeth. En: kitamura H. *Oral embryology and pathohistology*. 1ª ed. Tokio: Ishiyaku EuroAmerica; 1998. p. 1-37.

32. Mjör IA, Pindborj JJ. Odontogénesis. En: Mjör IA, Pindborj JJ. Histología del diente humano. 1ª ed. Barcelona: Labor; 1973. p. 17-32.
33. Lumsden AG. Spatial organization of the epithelium and the role of neural crest cells in the initiation of the mammalian tooth germen. *Development* 1988;103:155-69.
34. Thesleff I. Tooth development. *Dental Update* 1991:382-6.
35. Ranly DM. Synopsis of Craniofacial Growth. En *Development of the human dentition*. 2ª ed. California 1988. Ed. Applenton & Lange p. 165-79.
36. Mjör IA Fejerskov O. *Embriología e Histología Oral Humana*. 1ª ed. Barcelona: Salvat Editores; 1989
37. Weiss K, Stock D, Zhao Z, Buchanan A, Ruddle F, Shashikant C. Perspectives on genetic aspect of dental patterning. *Eur J Oral Sci* 1998;106 Suppl 1:55-63.
38. Thomas BL, Sharpe PT. Patterning of the murine dentition by homeobox genes. *Eur J Oral Sci* 1998;106 Suppl 1:48-54.
39. Thomas BL, Tucker AS, Ferguson C, Qiu M, Rubenstein JL, Sharpe PT. Molecular control of odontogenic patterning: positional dependent initiation and morphogenesis. *Eur J Oral Sci* 1998;106 Suppl 1:44-7.
40. Moyers R. *Manual de Ortodoncia*. 4ª ed. Buenos Aires: Ed. Panamericana; 1992; p. 166-94.
41. Logan WHG, Kronfeld R. Development of the human jaws and surrounding structures from birth to age fifteen. *J Am Dent Assoc* 1933;20:379.
42. Schour I, Massler M. *Studies in tooth development: The growth pattern of human teeth*. Part II. *J Am Dent Assoc* 1940;27:1918-31.
43. Morres CFA. Normal Variation in dental developments determined with reference to tooth eruption status. *J Dent Res* 1965;44:161-73.
44. Tanguay R, Demirjian A, Thibault HW. Sexual Dimorphism in the emergence of the deciduous teeth. *J Dent Res* 1984;63(1):65-8.
45. Mendoza A, Solano E. Desarrollo y erupción dentaria. En: Boj JR, Catalá M, García- Ballesta C, Mendoza A, Planells P. *Odontopediatría La evolución del niño al adulto joven*. 1ª ed. Madrid: Ripano; 2010. p. 69-84.
46. Spitzer V, Ackerman MJ, Scherzinger AL, Whitlock D. The Visible Human Male: A Technical Report. *J Am Med Inform Assoc* 1996;3:118-30.
47. The Visible Human Project. US National Library of Medicine. Bethesda. NLM; 1997 (acceso en diciembre de 2010). Disponible en: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.

48. Zhang SX, Heng PA, Liu ZJ, Tan LW, Qiu MG, Li QY et al. The Chinese Visible Human (CVH) datasets incorporate technical and imaging advances on earlier digital humans. *J Anat* 2004;204:165-73.
49. Bichlmeier C, Ockert B, Kutter O, Rustae M, Heining SM, Navab N. The Visible Korean Human Phantom: Realistic Test & Development Environments for Medical Augmented Reality. *International Workshop on Augmented environments for Medical Imaging including Augmented Reality in Computer-aided Surgery*. New York (USA) 2008.
50. Pohlenz P, Gröbe A, Petersik A, von Sternberg N, Pflesser B, Pommert A et al. Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *J Craniomaxillofac Surg* 2010;38(8):560-64.
51. Zhang Y, Tang L, Chen M. Construction of a three-dimensional mandible model containing teeth based on the Virtual Chinese Human data. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao* 2008;28(8):1449-51.
52. Nguyen N, Wilson TD. A head in virtual reality: Development of a dynamic head and neck model. *Anat Sci Educ* 2009;2:294-301.
53. Van Essen NL, Anderson IA, Hunter PJ, Carman JB, Clarke RD, Pullan. Anatomically based modelling of the human skull and jaw. *Cells Tissues Organs* 2005;180:44-53.
54. Reddy-Kolanu G, Alderson D. Evaluating the effectiveness of the Voxel- Man TempoSurg virtual reality simulator in facilitating learning mastoid surgery. *Ann R Coll Surg Engl* 2011;93(3):205-8.
55. Park JS, Jung YW, Lee JW, Shin DS, Chung MS, Riemer M et al. Generating useful images for medical applications from the Visible Korean Human. *Comput Methods Programs Biomed* 2008;92:257-66.
56. Gal GB, Weiss EI, Gafni N, Ziv. Preliminary assessment of faculty and student perception of a haptic virtual reality simulator for training dental manual dexterity. *J Dent Educ* 2011;75(4):496-504.
57. Rose JT, Buchanan JA, Sarrett DC. The DentSim system. *J Dent Educ* 1999;63(5):421-3.
58. Buchanan JA. Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures. *J Dent Educ* 2004;68(12):1258-65.

59. Jasinevicius TR, Lander M, Nelson S, Urbakova A. An evaluation of two dental simulation systems: virtual reality versus contemporary non-computer-assisted. *J Dent Educ* 2004;68(11):1151-62.
60. Thomas G, Johnson L, Dow S, Stanford C. The design and testing of a force feedback dental simulator. *Comput Methods Programs Biomed* 2001;64(1):53-64.
61. Kusumoto N, Sohmura T, Yamada S, Wakabayashi K, Nakamura T, Yatani H. Application of virtual reality force feedback haptic device for oral implant surgery. *Clin Oral Implants Res* 2006;17(6):708-13.
62. Steinberg AD, Bashook PG, Drummond J, Ashrafi S, Zefran M. Assessment of faculty perception of content validity of PerioSim, a haptic-3D virtual reality dental training simulator. *J Dent Educ* 2007;71(12):1574-82.
63. Ohtani T, Kusumoto N, Wakabayashi K, Yamada S, Nakamura T, Kumazawa Y et al.. Application of haptic device to implant dentistry-accuracy verification of drilling into a pig bone. *Dent Mater J* 2009;28(1):75-81.
64. Suebnukarm S, Haddawy P, Rhienmora P, Gajananan K. Haptic virtual reality for skill acquisition in endodontics. *J Endod* 2010;36(1):53-5.
65. Marras I, Nikolaidis N, Mikrogeorgis G, Lyroudia K, Pitas I. A virtual system for cavity preparation in endodontics. *J Dent Educ* 2008;72(4):494-502.
66. Konukseven EI, Önder E, Mumcuoglu E, Kisnisci RS. Development of a visio-haptic integrated dental training simulation system. *J Dent Educ* 2010;74(8):880-91.

10.- ANEXO

CD- ROM con el programa Amira 5.3.0. y con el modelo mandibular segmentado y etiquetado en su totalidad.