



PLANIFICACIÓN VIRTUAL EN CIRUGÍA MAXILOFACIAL

**Estudio para la obtención
Del Título de Especialidad en
Cirugía y Traumatología Oral
Y Maxilofacial**

Residente: José Luciano Monroy Fuentes

Docente Guía: Dr. Marco Nasi Toso

**Cátedra de Cirugía y Traumatología Oral y
Maxilofacial**

**Valparaíso – Chile
2022**

ÍNDICE:

- 1) AGRADECIMIENTOS
- 2) GLOSARIO
- 3) INTRODUCCIÓN.
- 4) OBJETIVOS
- 5) MARCO TEÓRICO
 - a. PLANIFICACIÓN DE IMPLANTES
 - b. PLANIFICACIÓN PARA MANEJO DE ALTERACIONES DENTOFACIALES
 - a) IMAGEN TRIDIMENSIONAL DE TEJIDOS BLANDOS
 - b) PLANIFICACIÓN 3D DE CIRUGÍA ORTOGNÁTICA
 - c. PLANIFICACIÓN 3D PARA CIRUGÍA DE ATM
 - d. PLANIFICACIÓN 3D PARA CIRUGÍA DE TRAUMA
 - e. PLANIFICACIÓN 3D PARA CIRUGÍA ONCOLÓGICA
- 6) DISCUSIÓN
- 7) CONCLUSIÓN
- 8) SUGERENCIAS
- 9) ANEXOS
- 10) BIBLIOGRAFÍA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi familia que sin su apoyo no estaría en este momento escribiendo estas palabras, especialmente a Daniela quien me acompañó en esta experiencia que esta pronto a concluir, soportándome en mis momentos de cansancio y estrés, además de otorgarme la felicidad de ser padre de Laura Emilia.

En segundo lugar, pero no menos importante quiero agradecer al Dr. Marco Nasi Toso quien la primera vez que nos conocimos me recibió en la biblioteca del Hospital Gustavo Fricke, lugar que fue mi segundo hogar por más de dos años, fue él quien me guio en el difícil pero enriquecedor camino de la cirugía maxilofacial, me enseñó los conceptos en cirugía oral y maxilofacial además de tener una paciencia infinita en cada concepto que me costaba entender.

A mi R3 y compañero de innumerables turnos el Dr. Sebastián Vega, junto al equipo del Turno Lunes que a pesar de muchas veces estar sobrepasado por la cantidad de pacientes siempre dio lo mejor de sí y lo importante que es realizar lo que uno desea.

A mis compañeros de especialidad, especialmente a Gonzalo y Nicolas por las innumerables experiencias que vivimos juntos y la forma en que avanzamos a través de nuestras rotaciones donde coincidimos.

Al Dr. Zapata y el resto del equipo del Hospital de Coquimbo quienes a pesar de no conocerme, me acogieron como uno más del equipo y permitieron desarrollar el quehacer de la especialidad, especialmente en planificación en cirugía ortognática aplicando los conocimientos entregados por la Universidad de Valparaíso y en especial el Dr Nasi.

Por eso y mucho más, gracias totales.

GLOSARIO

TAC/CBCT: Tomografía axial computada/ Tomografía computada de haz cónico, ambas son técnicas de imagen médica capaces de adquirir la información de un objeto a través de cortes, en el caso del TAC es a través de cortes milimétricos con una separación estandarizada y el CBCT es una reconstrucción computacional a través de un algoritmo que reconstruye los distintos cortes obtenidos.

Estereolitografía: Técnica a través de láser que emplea una resina líquida fotosensible a la luz UV por lo cual es capaz de reproducir objetos con exactitud de 0,05mm

SLA: Sistema de impresión 3D por polimerización a través de un haz de luz

DLP: Sistema de impresión 3D a base de polimerización en capa

DICOM (Digital imaging and communications in medicine): Formato cerrado específico para visualización de imágenes médicas

VOXEL: Pixel volumétrico en los ejes x,y,z

OPERACIONES BOOLEANAS: operación lógico-matemática en el cual existe una respuesta absoluta de todo o nada y que solo acepta estas dos opciones generando tres formas básicas indispensable para generar o modificar estructuras en tres dimensiones de acuerdo a las siguientes operaciones:

- **ADICIÓN:** suma de ambas estructuras.
- **SUSTRACCIÓN:** resta de una estructura sobre otra.
- **COMPLEMENTO:** exéresis de estructuras solo manteniendo voxeles entre ambas.

INTRODUCCIÓN

La Cirugía Maxilofacial presenta un largo camino incorporando nuevas tecnologías en el tiempo para mejorar las habilidades, estandarizar ciertos procesos y a través de esto mejorar el cuidado de los pacientes que presentan alteraciones complejas ya sea a través de reconstrucción en traumatismos maxilofaciales, desarmonías faciales y maloclusiones severas tratadas por medio de cirugía ortognática y reconstrucciones oncológicas a través de injertos microvasculares o libres según sea la necesidad del caso.¹

Las herramientas de computación, planificación y navegación han permitido diseñar guías específicas para cada pacientes, existiendo una precisión mayor, hasta la alcanzada actualmente que es menor a 0,05 mm de error.^{2,3,4} Por lo cual esta monografía se centrará en las herramientas tecnológicas actuales disponibles para la planificación virtual, así como, los flujos de trabajos utilizados en el postgrado de cirugía maxilofacial de la Universidad de Valparaíso los cuales han logrado un resultado óptimo y satisfactorio en los pacientes operados.

La planificación se inicia a través del protocolo CAD/CAM sin embargo para el territorio maxilofacial es indispensable que el flujo de trabajo comience con la obtención de una imagen tridimensional la cual puede ser obtenida a través de un TAC craneofacial o un CBCT de ventana amplia obteniendo datos en formato DICOM (anexo 1).^{4,5}

Posteriormente la imagen se procesa transformando los archivos DICOM a voxeles y en caso de ser necesario la utilización de una guía con base en la oclusión, en la cual debe utilizarse un escáner óptico ya que habitualmente existe una gran cantidad de artefactos a nivel dentario, posteriormente estos datos se procesan, se define posición del paciente, se comprime y se crea imagen tridimensional, se modifican estructuras y define la cantidad y tipo de guía a utilizar dependiendo del caso clínico, posteriormente se imprime y definen detalles en el paciente de forma clínica para ser utilizada en el acto quirúrgico.^{6,7,8,9}

Por lo anteriormente señalado el objetivo de esta monografía es describir los flujos de trabajo en la planificación virtual de los distintos usos que se realizan principalmente en cirugía maxilofacial de en los centros hospitalarios en los cuales desarrollé mi especialización en cirugía maxilofacial y así compararlos con la evidencia científica actual existente actualmente respecto a planificación virtual, todo esto independiente del programa utilizado.^{10,11,12}

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Realizar un análisis de la evidencia científica actual en planificación virtual definiendo un flujo de trabajo adecuado

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los materiales y herramientas mínimas necesarias para trabajar en cirugía maxilofacial en conjunto con planificación virtual
2. Definir ventajas y desventajas de utilizar planificación virtual
3. Elaborar flujo de trabajo adaptable para ser utilizado en los distintos programas de planificación virtual existentes en la actualidad

MARCO TEÓRICO

Se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos de la Universidad de Valparaíso a través del metabuscador que incluye Clinical Key de Elsevier, Findex, Springer Link y Wiley Online Library que cumplieran con el criterio de inclusión de presentar una antigüedad menor a 15 años, pertenecer a revistas tipo WOS/ISI y estar en idioma inglés, de la cual se seleccionaron 62 publicaciones para cumplir con el objetivo de esta monografía cuyo fin es evaluar los distintos ejes de la cirugía maxilofacial en planificación virtual de implantes dentales, cirugía ortognática, cirugía de ATM especialmente recambio articular, trauma maxilofacial y cirugía oncológica.

A. PLANIFICACIÓN VIRTUAL DE IMPLANTES DENTALES

El posicionamiento de implantes dentales debería ser idealmente con un planteamiento rehabilitador, considerando tanto el diseño (extensión, material) y ubicación de la rehabilitación implantosoportada. El sistema convencional utilizaba en primera instancia radiografías panorámicas que solo entregan información parcial del paciente sin embargo con la aparición del CBCT y programas de evaluación, planificación y diseño de guías quirúrgicas.¹³

Actualmente en la literatura se señala la existencia de dos tipos de guías que se pueden utilizar, la guía estática (estricta y semi estricta) y dinámica, ambas permitiendo incrementar la exactitud y simplificando la rehabilitación en comparación con la instalación de implantes a mano alzada la cual depende en gran medida de la experiencia del cirujano.¹⁴

La planificación virtual en implantología necesita la adquisición de imágenes a través de un CBCT, el cual debe ser de una resolución entre medio a un milímetro, la ventaja del CBCT sobre el TAC es la menor radiación y disponibilidad prácticamente inmediata al momento de solicitarlo, una vez realizado el CBCT se obtienen las imágenes del paciente en formato DICOM las cuales deben ser cargadas a un programa de edición de datos.^{14,15}

Actualmente el programa licenciado pero de carácter pre quirúrgico libre de elección es BLUE SKY PLAN sin embargo existe disponibilidad de otros programas con un flujo de trabajo similar como SIMPLANT o NEMOSCAN3D.

De manera independiente del programa que se utilice se debe elegir de acuerdo con el paciente el tipo de protocolo y guía quirúrgica a utilizar.

Actualmente existe tecnología que permite no depender de guías quirúrgicas fijas sino dinámicas a través de navegación asistida.¹⁶

Además del CBCT se debe escanear ambas arcadas y oclusión del paciente lo cual puede ser de forma simultánea en caso de utilizar un scanner intraoral o diferida si es un escáner de escritorio, existe la posibilidad en caso de utilizar este último de realizar el escáner a través de la impresión cuando se utiliza un material de impresión elastomérico sin necesidad de realizar el vaciado en yeso.¹⁵

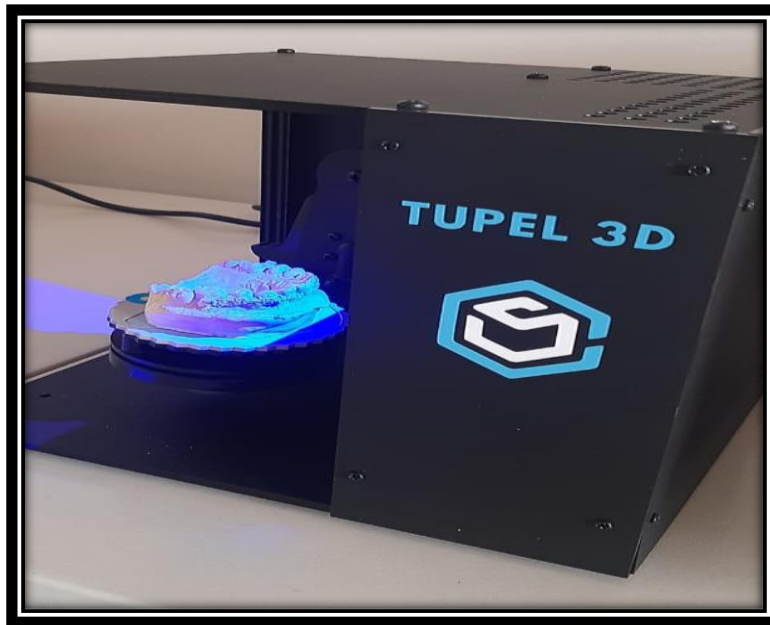


Figura 1.- Escáner de escritorio marca TUPEL 3D comercializado en Chile por PLAB

Un caso especial que debe ser mencionado antes de continuar es el protocolo dual el cual se utiliza en pacientes desdentados para rehabilitación de arco completo, en este caso el primer CBCT es tomado con el paciente con prótesis realizadas especialmente para este fin las cuales deben estar bien ajustadas y confortables, se instalan 4 marcadores radiopacos de 0,5 a 2 mm en cada arcada para posteriormente tomar el registro y obtener los archivos en formato DICOM.¹⁷

Posteriormente se realiza el escáner de ambas prótesis de forma total incluyendo el área mucosoportada para posteriormente obtener los STL y reposicionar, una vez obtenida y fusionados ambos registros el flujo de trabajo continúa de manera similar al protocolo clásico para obtener la guía quirúrgica.^{17,18}

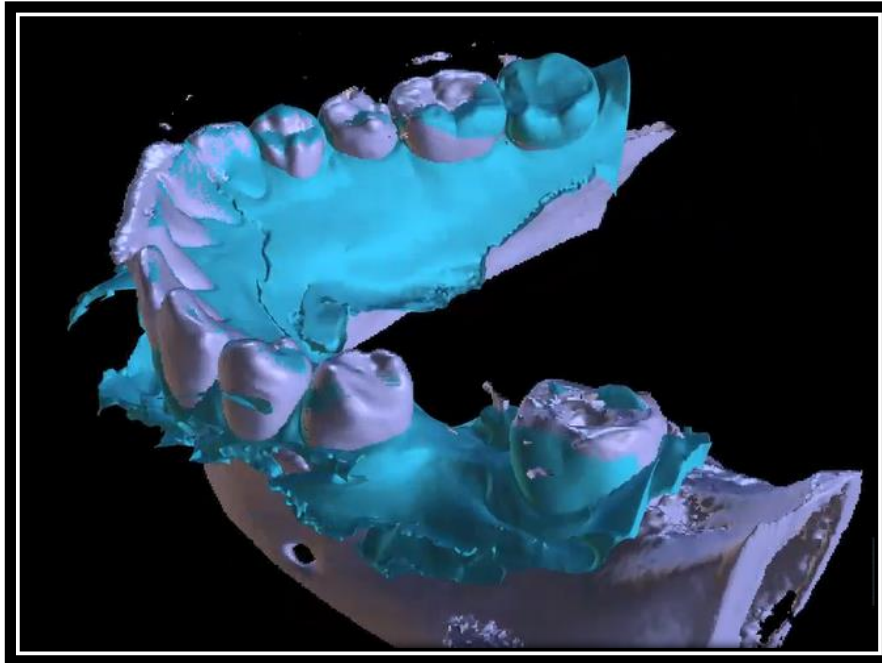


Figura 2.- Fusión de arcada escaneada en CBCT y arcada obtenida con escáner óptico intraoral

El procesamiento de los archivos STL debe ser realizado en un editor de mallas a fin de evitar grandes defectos y utilizar una malla continua la cual puede o no estar cerrada, sin embargo se recomienda de acuerdo a la última evidencia la utilización de mallas abiertas ya que permiten una orientación espacial y fusión de forma automática por el programa de planificación a diferencia de una malla cerrada que debe ser reposicionada de acuerdo a coincidencias preestablecidas o puntos elegidos de forma arbitraria reposicionando de manera parcial y con una mayor necesidad de tiempo que la forma automatizada.^{16,18}

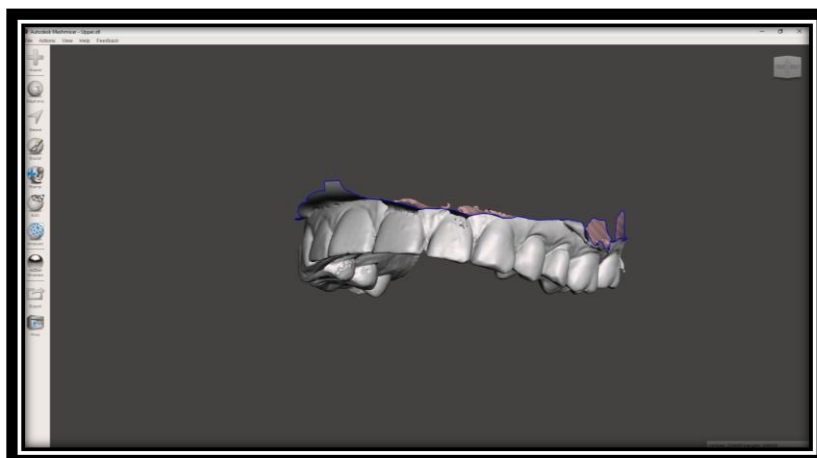


Figura 3: Programa de edición de mallas MESHMIXER

Cuando la fusión de STL ha sido corroborada y aceptada se debe seleccionar que tipo de guía rígida será confeccionada¹⁵:

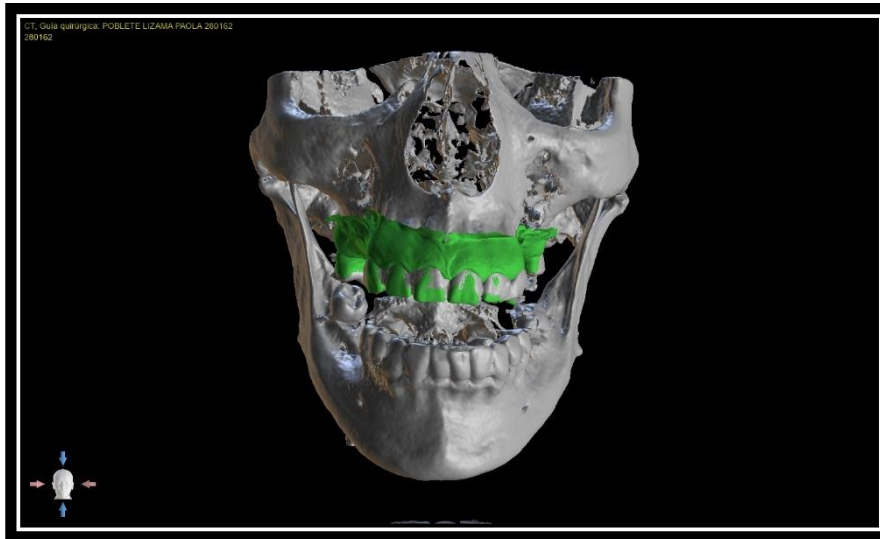


Figura 4. Unión STL macizo facial y arcada maxilar

- Semi estricta: Guía quirúrgica que permite osteotomía y utilización de fresa piloto pero posteriormente debe ser removida para que el implante sea posicionado a mano alzada.
- Estricta: Guía quirúrgica rígida que permite osteotomía, preparación e inserción del implante a través de la guía quirúrgica.

Ambos métodos presentan una exactitud de acuerdo con la literatura mayor a realizar la cirugía de implantes a mano alzada, sin embargo, entre estos dos tipos de guía la estricta posee mayor exactitud al ser utilizada de acuerdo a los protocolos establecidos por los fabricantes en rehabilitaciones complejas.^{13,14}

Aparte del tipo de guía también debe considerarse el tipo de soporte que esta tendrá, ya que de acuerdo con lo mencionado anteriormente el protocolo cambia si es dentosoportada o muco-oseosoportada^{16,17,18}.

Posteriormente se debe analizar el caso clínico de acuerdo a las estructuras críticas especialmente en la ubicación del canal mandibular y proximidad del seno maxilar considerando una proximidad de los implantes mayor a dos milímetros se consideran seguros para no afectar a través de presión hidraulica el nervio dentario inferior provocando una posterior parestesia labiomentoniana. En el caso del seno maxilar se debe evaluar la posibilidad de intalación del implante a utilizar o elevación del seno maxilar^{16,17}.

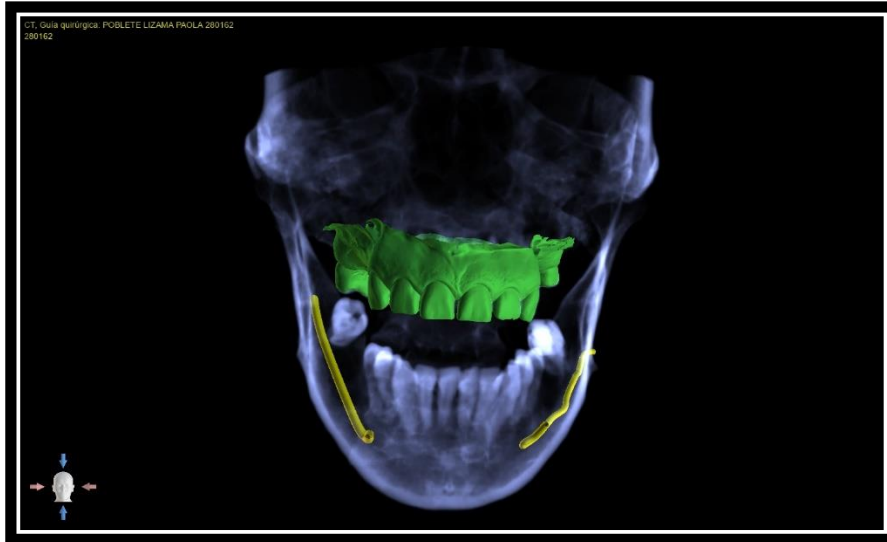


Figura 5. Identificación de nervio dentario inferior

Una vez analizado el caso clínico, decidido el tipo de guía y soporte que se utilizara de acuerdo con el tipo de implante a utilizar, se cargar en el programa la librería correspondiente a los aditamentos del sistema que serán utilizados considerando angulación y ubicación tridimensional respecto a piezas dentarias y otros implantes.^{14,15} Se selecciona el alcance idealmente manteniendo un tripoidismo y se confecciona la guía quirúrgica¹⁵.

Debido a los requerimientos biomecánicos necesarios el material que se utiliza habitualmente es resina de foto activación y el sistema de impresión de acuerdo al volumen puede ser DLA o SLA sin existir una diferencia estadísticamente significativa de acuerdo a la literatura¹⁹.

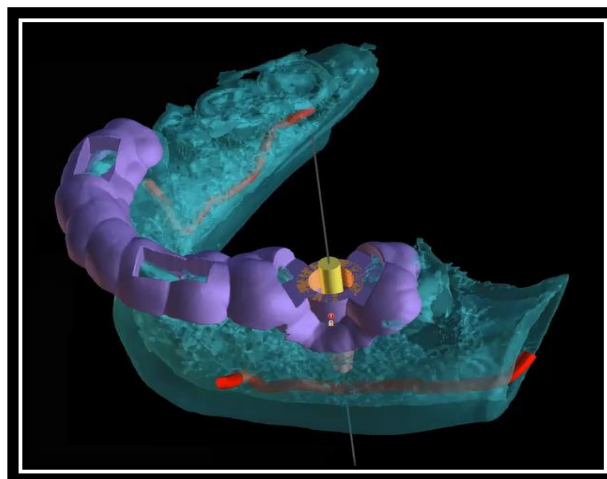
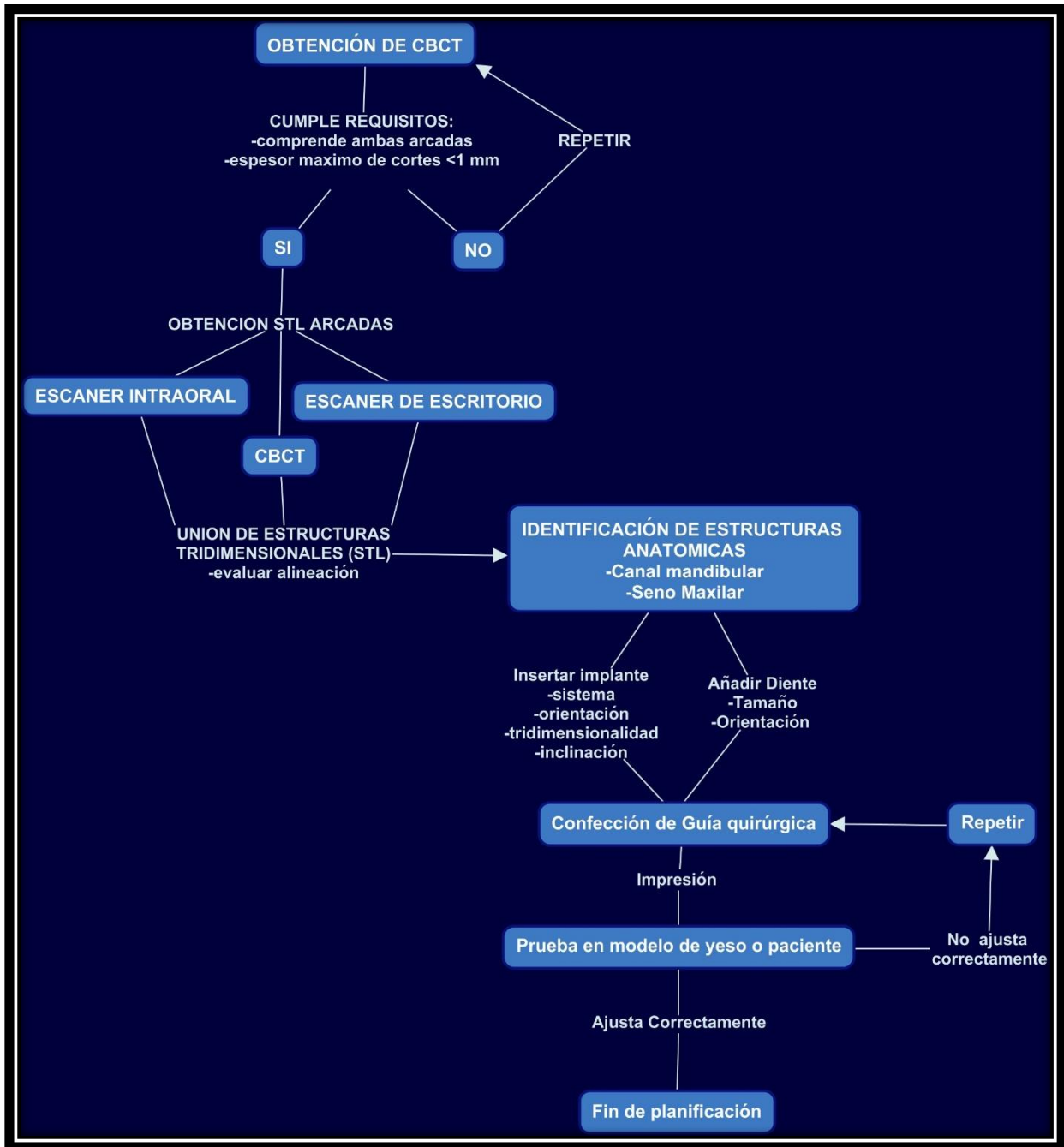


Figura 6: Diseño de guía estricta en programa BLUE SKY

Diagrama 1. Flujoograma de planificación virtual en implantología



B. PLANIFICACIÓN PARA MANEJO DE ALTERACIONES DENTOFACIALES

a) PLANIFICACIÓN 3D DE CIRUGÍA ORTOGNÁTICA

La utilización de planificación virtual en cirugía ortognática al igual que en el resto de planificaciones se inicia con la obtención de imágenes tridimensionales en formato DICOM las cuales deben representar el macizo facial en toda su extensión, se recomienda de acuerdo a la literatura actual que comprenda desde la bóveda craneal hasta la séptima vértebra cervical para que incluya el hioides, elemento importante en la evaluación de vía aérea y como mínimo debe incluir en sentido vertical desde el reborde supraorbitario o un centímetro sobre glabella, hasta el cartílago tiroideos, en sentido sagital debe incluir desde el tip nasal hasta porion o un centímetro por detrás del lóbulo de la oreja y en sentido transversal debe incluir ambos pabellones auriculares.²⁰

Es en este punto donde existe el mayor índice de error y uno de los desafíos mayores en planificación virtual ya que a diferencia de planificación virtual oncológica o de trauma, en cirugía ortognática se debe obtener el registro en posición natural de cabeza con los tejidos blandos relajados, de acuerdo al programa existen distintas formas de obtener esta situación en una primera instancia los cuales pueden ser en el caso de cbct bajo una supervisión estricta y es esta manera la utilizada en el protocolo de la Universidad de Valparaíso o de forma posterior a través de fotografías niveladas y estandarizadas obtenidas con un trípode, cámara reflex, flash circular, twin o speed lite y lente macro adecuado a un metro del paciente método utilizado principalmente si las imágenes se obtienen a través de un TAC.²¹

Sin embargo a pesar de que un TAC entrega mayor detalle en cuanto a tejidos blandos continua de acuerdo a la literatura siendo el CBCT el medio más utilizado para la obtención de una imagen tridimensional por costos y accesibilidad.²²

Es importante destacar que al momento de la obtención del escáner el paciente debe tener una separación de un milímetro entre las arcadas evitando la presencia de contactos oclusales y para esto se puede utilizar un registro de mordida que no presente perforaciones a nivel oclusal pero debe respetar la relación céntrica condilar alterándola lo menos posible especialmente en pacientes deprogramados con una clase esquelética tipo II y/o con alguna alteración en la articulación temporomandibular.^{23,24}

La separación interoclusal si bien es un punto importante que al comienzo del desarrollo de la planificación virtual era indispensable para lograr segmentar maxilar y mandíbula permitiendo el procesamiento de cada una de forma independiente, en la actualidad la literatura nos señala que gracias a los algoritmos recientemente insertados en los programas de planificación solo basta con tener disponible tres puntos para ser utilizados como marcadores para realizar de forma adecuada la segmentación.²³

Posterior a la obtención de las imágenes tridimensionales de cráneo y cara se deben obtener los modelos dentarios ya que la resolución del CBCT o TAC no es adecuada para reproducir al nivel de detalle necesario para ser utilizado como guía o existe una gran cantidad de artefactos provocando que exista una gran dificultad para trabajar

ambos segmentos de forma independiente, por lo cual es de suma importancia obtener de forma aislada los registros dentarios, actualmente existen dos métodos distintos para la obtención de los registros dentarios, el primero y considerado actualmente como gold estándar es la utilización de un escáner intraoral que permite a través de un lente y luz estereoscópica recoger información tridimensional detallada de las arcadas dentarias así como coloración, orientación y oclusión, las cuales son cargadas directamente a la información base del archivo stl para ser ingresadas al programa, el único detalle a considerar es que los archivos presentan mallas abiertas y perforaciones que deben ser resueltas posteriormente para facilitar el flujo de trabajo y evitar aparición de posibles errores que no dejen procesar la información en etapas finales provocando rehacer toda la secuencia hasta este punto.^{23,24,25}

El otro método es a través del escaneo de modelos de yeso o impresiones en cubetas en un escáner óptico de escritorio sin embargo la utilización de este escáner obliga a reposicionar los modelos en un editor de mallas como MESHMIXER o MESHLAB, cerrar las mallas y analizarlas por posibles errores además de reorientar y colisionar ambas arcadas para obtener una oclusión en ventaja como la planificada.

Existe un tercer método pero actualmente es el que hace necesario un mayor procesamiento de la información y de los archivos STL comprendiendo la utilización de operaciones booleanas además de lo señalado anteriormente y que es a través del escaneo de modelos de yeso en el mismo CBCT para obtener un archivo DICOM, posteriormente a través del procesamiento de imágenes y creación de un archivo STL el cual debe ser analizado y procesado en un editor de mallas, colisionado y reorientado para finalmente estar en condiciones de ser utilizado en un programa de planificación virtual como el obtenido con un escáner intraoral.²⁶

Ha comienzo del siglo XXI cuando se estaba iniciando el registro dentario de forma independiente se buscaba a través de la utilización de marcadores externos radiopacos dar una correcta orientación para el reemplazo de estructuras pero actualmente es solo necesario la identificación de tres puntos como mínimo para la reposición y posterior reemplazo de los modelos dentarios en el maxilar y mandíbula previamente segmentados en el caso de utilizar el flujo de trabajo lineal utilizado en PROPLAN o segmentar a través de la delimitación de estructuras dentarias como es el caso de NEMOFAB, es importante señalar que además de ya no ser necesaria por la utilización de los nuevos algoritmos, el que permitió esto fue el tamaño del voxel

obtenido por la nueva generación de escáner que es cercana al 0,05 milímetros por VOXEL.^{2,27,28,29}



Figura 7: escáner modelo intraoral Carestream

La obtención de la información correspondiente a tejidos blandos y su procesamiento será señalado en el capítulo a continuación en más detalle, pero es importante mencionarla en este momento para incluirla en el flujo de trabajo que será desarrollado, los datos pueden ser obtenidos directamente al momento de adquirir la imagen en un CBCT, retocadas por fotografías a través de marcadores o un escáner óptico tridimensional de tejido blando incluyendo incluso el registro en movimiento de las facciones faciales lo cual es considerado 4D^{30,31}.

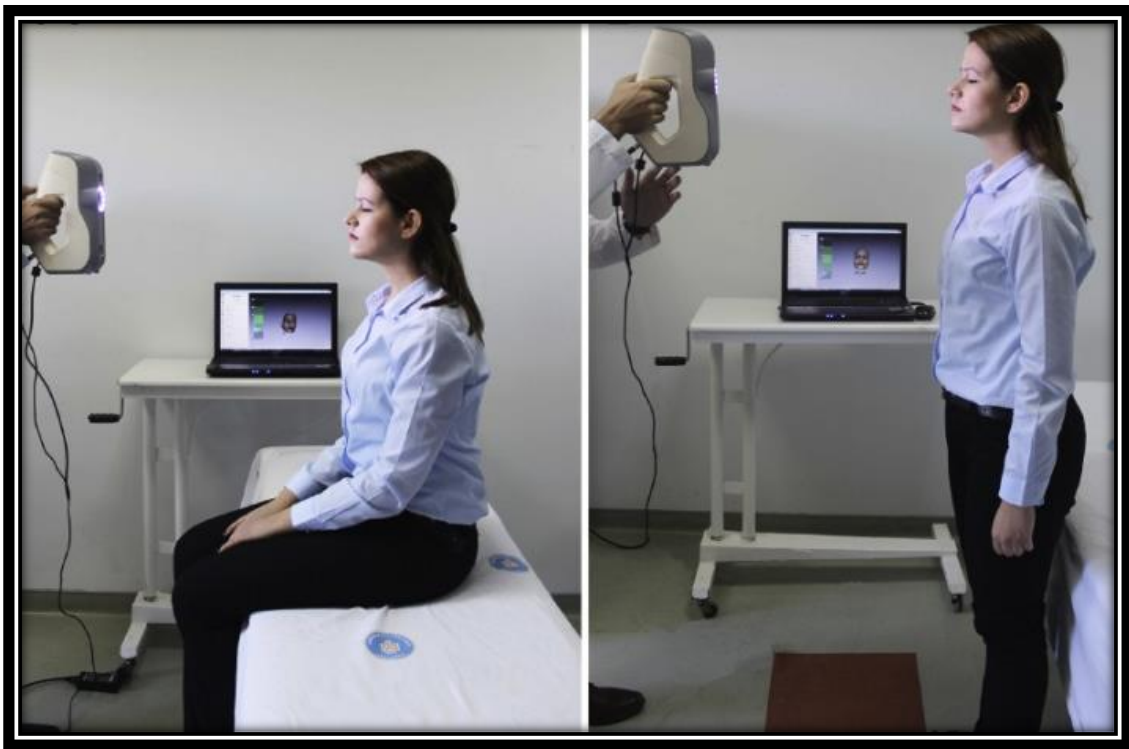


Figura 8: Escáner óptico facial Creality 3D

Una vez obtenido los registros correspondientes a tejido óseo, arcadas dentarias y tejidos blandos se puede confeccionar un modelo anatómico tridimensional del paciente en formato STL el cual puede ser utilizado para comenzar la planificación virtual, a partir de este momento es cuando toma importancia la orientación del paciente obtenida al inicio de la planificación cuando se registró el tejido óseo, o de manera ulterior a través de marcadores clínicos existiendo protocolos distintos que utilizan planos espaciales conocidos y validados, como el plano bi pupilar o de Frankfurt, sin embargo esto último no se encuentra validado debido a que conlleva a errores en la planificación considerando que un paciente con desarmonía dentofacial presenta cierto grado de variación en las estructuras esqueléticas ya sea por compensación o por la misma asimetría alterando estos planos.³¹

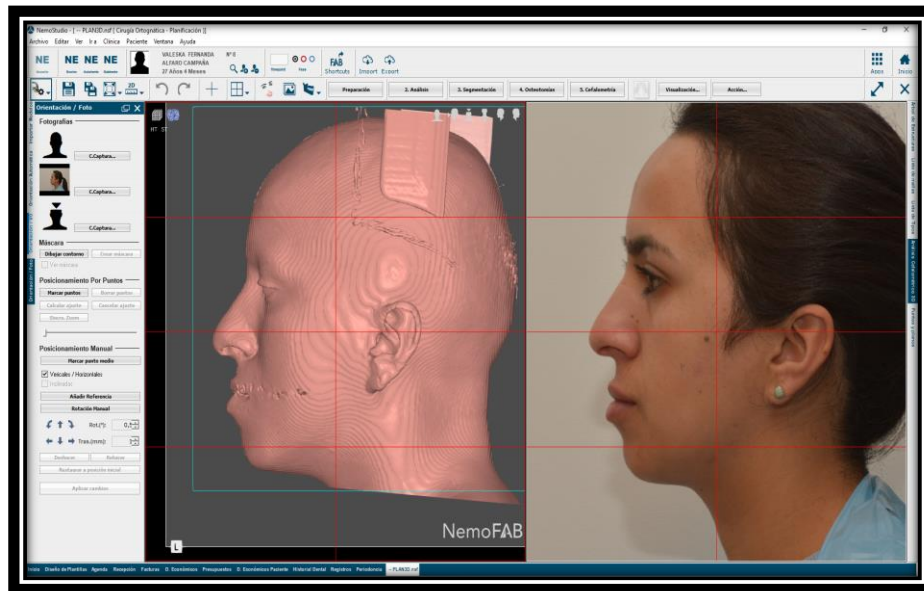


Figura 9: Reposicionamiento a través de imágenes fotográficas estandarizadas, Caso Clínico Cirugía ortognatica del Hospital de Coquimbo

El procesamiento de datos comienza con la utilización de un programa computacional que permita en primera instancia transformar el TAC o CBCT a través de DICOM en una imagen tridimensional compuesta por voxeles de distintas dimensiones de acuerdo a lo solicitado en cada protocolo, el protocolo utilizado por la Universidad de Valparaíso fue confeccionado en conjunto con PLAN3D (anexo 1), dicho voxel debe ser inferior a 0,5 milímetros, en el caso de NEMOFAB, PROPLAN y en la mayoría de programas de planificación el primer registro que se debe cargar es el de tejidos duros obtenido en el CBCT , posteriormente se debe importar el registro dentario obtenido a través de modelos o directamente en el paciente si se utilizó un escáner óptico los cuales son importados en formato STL o DICOM para posteriormente ser procesados a STL si son obtenidos a través de un CBCT^{21,22,23,24,32}.

Posteriormente estas arcadas deben ser alineadas y corregidas, la ventaja de NEMOFAB en comparación a DOLPHIN, PROPLAN o un programa de diseño como RHINOCERO se da principalmente a partir de este momento en el flujo de trabajo, debido a que permite auto reparar las mallas y cierra el proceso evitando la incorporación de nuevos registros, al ocupar los demás programas las mallas obtenidas deben ser reparadas de forma previa con un editor de mallas como MESHMIXER o MESHLAB permitiendo realizar una correcta segmentación y alineamiento lo cual no podría ser desarrollado de forma correcta si se presentan perforaciones^{22,24}.

La correcta incorporación y alineación de los modelos dentarios es un tema crítico en la planificación virtual debido a la cantidad de artefactos que se proyectan al STL obtenido del CBCT o TAC es imposible que se pueda utilizar para la confección de

guías, sin embargo la alineación si no es realizada con éxito resultara en un fallo al en la planificación que se puede observar en caso de que sea mayor a dos milímetros al momento de confeccionar las guías quirúrgicas o splint (férulas) pero si esta desviación es menor a un milímetro el error no es apreciable clínicamente sin embargo esta exactitud es dependiente del diseñador o cirujano en caso que utilice un programa de planificación como NEMOFAB, DOLPHIN o PROPLAN, la alineación es tanto en el archivo STL del cráneo como en el TAC^{33,34,35}. Existen distintos protocolos para la obtención de una correcta alineación, el protocolo diseñado con una cubeta y marcadores radiopacos estandarizados fue el primero en ser validado así como el diseñado por Swennen de triple CBCT, sin embargo los nuevos algoritmos confeccionados y validados en los programas de planificación actuales volvieron irrelevantes estos protocolos y con la utilización de tres puntos clínicos principalmente cúspides de caninos y mesiovestibular de un primer molar se logra una alineación satisfactorio en caso que el paciente presente una oclusión clase II, si en cambio se presenta una oclusión clase III la cúspide mesiovestibular del primer molar se sustituye por la cúspide distolingual.^{21,22,23,24,28,33,34,35}

A continuación se realiza la incorporación de una imagen virtual la cual puede ser agregada a través de la obtención de cinco fotografías sobreponiéndolas en la imagen tridimensional del tejido blando o directamente a través de una imagen tridimensional obtenida con un escáner de ventana amplia obteniendo una imagen aceptable pero que debe ser posteriormente corregida, igualmente en este punto es posible a través de los registros fotográficos reorientar el cráneo del paciente en caso que aún existan dudas respecto a la posición natural de cabeza.³⁶

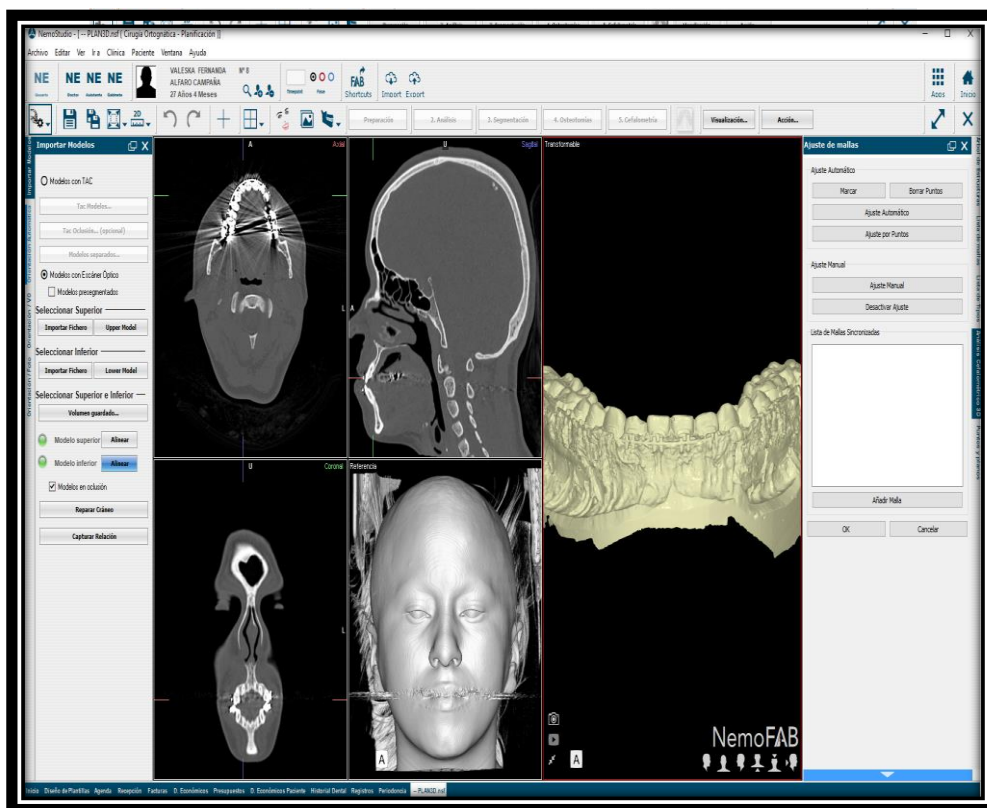


Figura 10 y 11: Tejidos blandos previo a incorporación de registro de arcadas en NEMOFAB, Caso Clínico Cirugía ortognática del Hospital de Coquimbo

El paso siguiente corresponde al análisis de la articulación temporomandibular y se selecciona el punto de rotación en ambos cóndilos, es decir al punto condilion, eje importante para la correcta rotación mandibular y generación del eje de de bisagra utilizado en la inserción del splint intermedio. Se debe analizar vía aérea definiendo los puntos limítrofes y nivel de tolerancia.^{21,22,23,34,35,37}

Posteriormente se realizan las segmentaciones y este es un punto clave para evaluar si la información ha sido correctamente ingresada, ya que de existir errores no se podrá llevar a cabo la segmentación, es posible identificar el error en caso de que se utilicen programas de planificación como NEMOFAB o DOLPHIN, pero al utilizar RHINOCERO estos errores no son detectables.^{37,38}

La definición de las osteotomías que serán replicadas en el intraoperatorio puede ser realizado en este momento, los planos de corte deben ser lo más parecido a la realidad para poder identificar las zonas de colisión y espacios intraóseos que pudieran necesitar la utilización de injertos.^{39,40,41}

Lo planteado anteriormente corresponde a la preparación del caso para comenzar con el diagnóstico y planificación, el diagnóstico de la desarmonía dentofacial es fundamental, es en este punto donde se debe considerar que la planificación virtual es una herramienta para el cirujano maxilofacial y se debe complementar con las demás herramientas que son utilizadas como registros clínicos y fotográficos incluyendo medidas faciales y sus proporciones, estudio de modelos así como mordida en ventaja y los estudios cefalometricos como Ricketts, Arnett, Roth Jaraback, Steiner entre otros de acuerdo a la experiencia del cirujano maxilofacial.^{23,37}

La evaluación tridimensional obtenida a través de CBCT o TAC permite evaluar anomalías dentofaciales en forma conjunta al volumen tridimensional y examen clínico permitiendo un análisis en los tres sentidos del espacio además de la reconstrucción tridimensional que permite evaluar en su conjunto deformidades maxilofaciales, alteraciones condilares, lesiones en tejido óseo, características de los senos paranasales, vía aérea, ramas mandibulares, ubicación del canal mandibular, su recorrido por posibles variaciones anatómicas, presencia de terceros molares y cómo estas estructuras se modifican en el proceso de la cirugía ortognática.³⁷

Actualmente no existe un estudio cefalometrico tridimensional completamente validado pero se pueden utilizar el de Gateno, Swennen o Arnett además de modificarlos de acuerdo a lo que el cirujano maxilofacial quisiera evaluar de acuerdo al tipo de asimetría y experiencia, cada programa presenta uno propio preestablecido de acuerdo a la corriente de sus creadores el cual se puede ampliar permitiendo el control y evaluación de ciertas estructuras además de permitir una reconstrucción tridimensional de estructuras blandas y su modificación de acuerdo a la planificación.^{23,38,42,43}

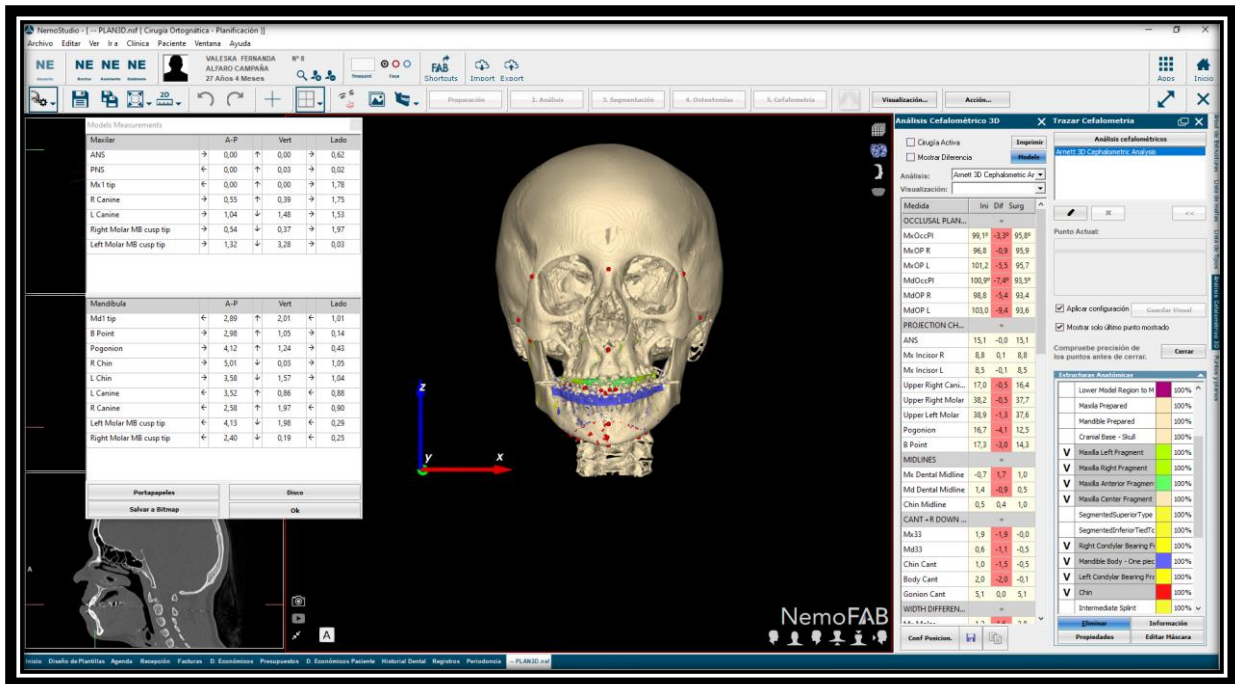


Figura 12: Análisis cefalométrico de Arnett y puntos de movilización de modelos tridimensionales en NEMOFAB

La planificación virtual de la cirugía ortognática tiene como objetivo central la función, posteriormente está la armonización facial y en su conjunto determinan un adecuado plan quirúrgico.³⁸

Una de las principales ventajas de la planificación virtual es la capacidad de observar las estructuras en los tres sentidos del espacios y comparar distintos planes de tratamiento y cómo estos afectan la armonización facial del paciente así como posibles alteraciones en la función, es en este momento donde se recomienda la utilización de un programa de planificación centrado en cirugía maxilofacial a diferencia de un programa de diseño convencional sin embargo de acuerdo a la experiencia de la Universidad de Valparaíso esta falencia es corregida con la habilidad y experticia del cirujano maxilofacial al trabajar en conjunto, indicando las limitaciones de la cirugía ortognática, que son desconocidas por los diseñadores además de permitir un flujo de trabajo adecuado y replicable en la cirugía, siendo este el objetivo de toda planificación.^{21,22,23,34,35,37}

La planificación puede iniciar desde un VTO traspasado a la planificación virtual evaluando puntos en dos dimensiones y replicados en la estructura tridimensional para exportarlo y evaluar cada punto a derecha e izquierda como los que se encuentran en la línea media en sentido sagital y sus relaciones.⁴⁴

Maxilar	A-P	Vert
ANS	-2,22	0,16
PNS	-2,18	3,80
Mx1 tip	0,00	-0,00
Molar MB cusp tip	-0,22	2,16

Mandíbula	A-P	Vert
Md1 tip	-3,03	-0,90
Molar MB cusp tip	-3,26	1,70
B Point	-0,91	-0,20
Pogonion	4,01	-0,09
Genioplastia	4,00	0,14

Models Measurements				
Maxilar	A-P	Vert	Lado	
ANS	→ 0,00 ↑	0,00 →	0,62	
PNS	← 0,00 ↑	0,03 →	0,02	
Mx1 tip	← 0,00 ↑	0,00 →	1,78	
R Canine	→ 0,55 ↑	0,39 →	1,75	
L Canine	→ 1,04 ↓	1,48 →	1,53	
Right Molar MB cusp tip	→ 0,54 ↓	0,37 →	1,97	
Left Molar MB cusp tip	→ 1,32 ↓	3,28 →	0,03	

Mandíbula	A-P	Vert	Lado	
Md1 tip	← 2,89 ↑	2,01 ←	1,01	
B Point	→ 2,98 ↑	1,05 →	0,14	
Pogonion	→ 4,12 ↑	1,24 →	0,43	
R Chin	→ 5,01 ↓	0,03 →	1,05	
L Chin	→ 3,58 ↓	1,57 →	1,04	
L Canine	← 3,52 ↑	0,86 ←	0,88	
R Canine	← 2,58 ↑	1,97 →	0,90	
Left Molar MB cusp tip	← 4,13 ↓	1,98 ←	0,29	
Right Molar MB cusp tip	← 2,40 ↓	0,19 ←	0,25	

Figura 13: Imagen izquierda medidas de modelo bidimensional, Imagen derecha medidas de modelo tridimensional en NEMOFAB

Se comienza con el análisis del plano oclusal y corrección de sus alteraciones en los tres sentidos del espacio los cuales alteran el área paranasal, ángulos goniales, borde mandibular, proyección de tercio medio, borde basilar mandibular y mentón.⁴⁴

En un comienzo se planteaba que la planificación debía iniciar siempre con maxilar centrándose en la posición del incisivo central independiente de cual se iba a operar primero o el tipo de alteración que presenta el paciente, sin embargo aunque esta tendencia se mantiene y ha dado excelentes resultados se plantea que se puede modificar sin alterar estos resultados, cambiando de acuerdo a que estructura será operada primero o a limitaciones al utilizar maxilar primero como impactación anterior del maxilar principalmente en pacientes clase II esquelética provocando una mordida abierta intraoperatoria generando un splint con poca estabilidad. Cuando existe duda en el registro de oclusión o existe dificultad para realizar la fijación intermaxilar o cuando la fijación del maxilar no es totalmente rígida por ejemplo al existir un maxilar demasiado delgado y frágil ya que esta será el punto fijo del cual se guiará el resto de la cirugía, Cuando se realiza en conjunto cirugía en la articulación temporomandibular.⁴⁵

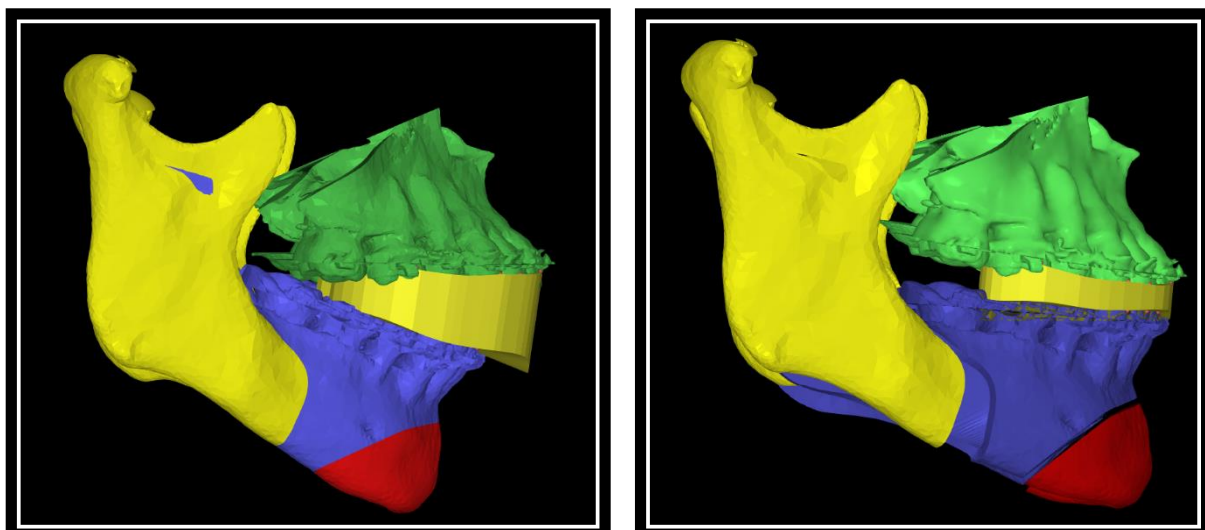


Figura 14: Confección splint intermedio paciente clase II con rotación antihoraria Hospital San Pablo de Coquimbo. Imagen izquierda: Planificación Maxilar primero. Imagen Derecha: Planificación Mandíbula primero

Por lo cual sucederá la planificación de la siguiente manera de acuerdo a que estructura sea primero:

Mandíbula primeros:

1. Comprobar orientación de la estructura tridimensional
2. Importar planificación cefalométrica bidimensional o tridimensional
3. Reposicionamiento mandibular evaluando posición de incisivo central inferior derecho en los tres sentidos del espacio
 - a. Línea media interincisal mandibular respecto a línea media facial
 - b. Corrección de canteo
 - c. Corrección de yaw evaluando centrado de colas mandibulares
4. Reposicionamiento maxilar y evaluación de segmentaria
 - a. Evaluar movimientos laterales
 - i. Overbite y overjet de incisivos
 - ii. Overbite de molares
 - b. Evaluar movimientos frontales
 - i. Alinear línea media maxilar
 - ii. Evaluación de canteo y posición de caninos en línea facial horizontal
 - iii. corrección de yaw con fulcrum anterior a través de centrado de colas en conjunto con traslación maxilar
5. Reposicionamiento de mentón en los tres sentidos del espacio
6. Ajuste de ramas mandibulares
7. Ajuste fino oclusal en los tres sentidos del espacio y comprobación de movimientos
8. Morphing tridimensional de tejidos blandos

Maxilar primero:

1. Comprobar orientación de la estructura tridimensional
2. Importar planificación cefalométrica bidimensional o tridimensional
3. Reposicionamiento maxilar en los tres sentidos del espacio
 - a. Movimientos laterales
 - i. posición anteroposterior de incisivo central superior
 - ii. Posición vertical de incisivo central superior
 - iii. Angulación de incisivo central superior
 - b. Movimientos Frontales
 - i. Alineación de línea media
 - ii. Corrección de canteo
 - iii. Corrección de yawMandi

- c. Movimientos de segmentos maxilares en caso de segmentaria en los tres sentidos del espacio centrado en segmento anterior
- 4. Ajuste de oclusión y reposicionamiento mandibular
- 5. Reposicionamiento de mentón en los tres sentidos del espacio
- 6. Ajuste de ramas mandibulares
- 7. Ajuste fino oclusal en los tres sentidos del espacio y comprobación de movimientos
- 8. Morphing tridimensional de tejidos blandos

Medida	Ini	Dif	Surg
OCCLUSAL PLANES			
MxOccPI	99,1º		99,1º
MxOP R	96,8		96,8
MxOP L	101,2		101,2
MdOccPI	100,9º		100,9º
MdOP R	98,8		98,8
MdOP L	103		103
PROJECTION CHANGES			
ANS	15,1		15,1
Mx Incisor R	8,8		8,8
Mx Incisor L	8,5		8,5
Upper Right Canine	17		17
Upper Right Molar	38,2		38,2
Upper Left Molar	38,9		38,9
Pogonion	16,7		16,7
B Point	17,3		17,3
MIDLINES			
Mx Dental Midline	-0,7		-0,7
Md Dental Midline	1,4		1,4
Chin Midline	0,5		0,5
CANT +R DOWN -LDOWN			
Mx33	1,9		1,9
Md33	0,6		0,6
Chin Cant	1		1
Body Cant	2		2
Gonion Cant	5,1		5,1

Figura 15: Tabla de medidas a evaluar posterior a planificación mandibular o maxilar pre y post planificación quirúrgica

Una vez realizada una o ambas planificaciones para evaluar el tipo de comportamiento de los tejidos duros y blandos se deben analizar las modificaciones de las estructuras y sus proporciones en la cefalometría tridimensional y su resultado final, el que puede ser utilizado como guía para realizar ciertas modificaciones en cuanto a la inclinación del plano oclusal o proyección de tejidos blandos, cuando la planificación es visada y aprobada por el cirujano maxilofacial esta debe ser comunicada al resto del equipo y al paciente precisando lo que se realizara y el resultado que se pretende obtener sin dejar de considerar que esto es solo una previsualización que puede sufrir modificaciones en el intraoperatorio y que como se verá más adelante la simulación tridimensional de tejidos blandos aún está en desarrollo^{21,22,23,34,35,37,45}.

La confección del Splint quirúrgico es diferente de acuerdo con la planificación escogida, si es maxilar primero se utiliza como punto fijo la mandíbula, se estima el giro de apertura y el eje en bisagra de forma arbitraria basado en la posición del punto condilion, o viceversa si se utiliza mandíbula primero. Entre las ventajas de la utilización de splint quirúrgico es la posibilidad de maximizar la exactitud de la planificación y resultados a posterior sin embargo no se debe olvidar que los splint no permiten posicionar el complejo maxilo-mandibular en sentido vertical siendo

necesaria la utilización de un marcador en este sentido como pin frontal o canto interno del ojo. Aunque actualmente existen férulas tridimensionales con apoyo no solo oclusal sino esquelético que permiten tanto la realización de cortes como la utilización de osteosíntesis personalizada, sin embargo, presentan como limitación la amplitud del abordaje necesario para su utilización, así como alto costo facilitando la transferencia total de la planificación al intraoperatorio^{30,32,39,40,41}.

Los programas de planificación virtual tridimensional de ortognática contemporáneos inician el flujo de trabajo a través de la adquisición de las imágenes DICOM delimitando el área de interés, habitualmente las imágenes se obtienen a través de un CBCT sin embargo para el análisis y reconstrucción de tejidos blandos es recomendable la utilización de un TAC⁵².

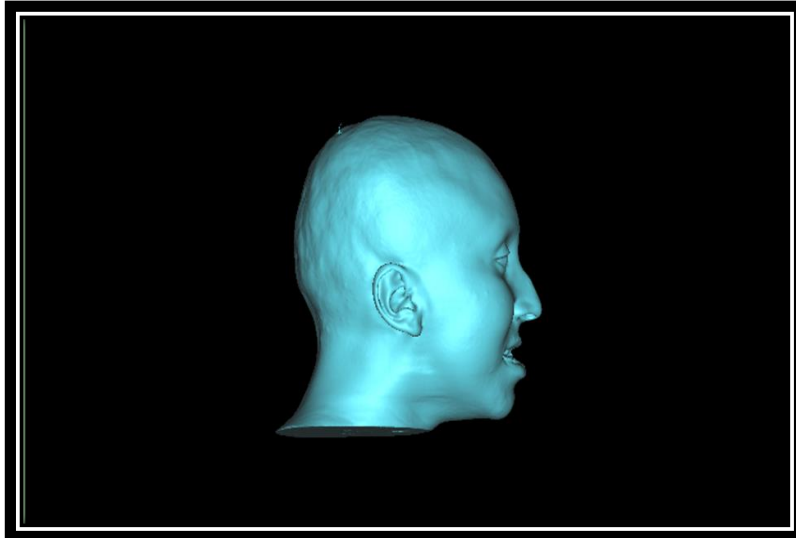


Figura 17: imagen tridimensional de tejidos blandos obtenidos de un TAC procesados en programa PROPLAN.

Posteriormente estas imágenes deben ser procesadas, como información anecdótica el primer motor de visualización fue FACEGEN⁵¹ que integraba imagen tridimensional y permite modificarlo de acuerdo a lo planteado por el cirujano, sin embargo esta tecnología así como el logaritmo que se utiliza ha sido modificado en múltiples ocasiones permitiendo ser integrado por los programas de planificación virtual tridimensional de cirugía ortognática como NEMOFAB, BLENDER, MATERIALISE (PROPLAN), entre otros, el procesamiento de imágenes permite crear un STL que representa los tejidos blandos en conjunto los cuales deben ser analizados a través de marcadores, es aquí cuando toma importancia la cefalometría tridimensional ya que permite precisar y acoplar la estructura ósea con la blanda de acuerdo a los puntos marcados y definir en caso de que el programa lo permita el porcentaje de movimiento que será reproducido por el tejido blando identificando a través de un mapa tridimensional colorimétrico el nivel de desplazamiento de cada estructura, además es posible en este paso incluir la imagen fotográfica del paciente la cual puede ser obtenida tridimensionalmente o fusionada de varias fotografías en dos dimensiones⁵².

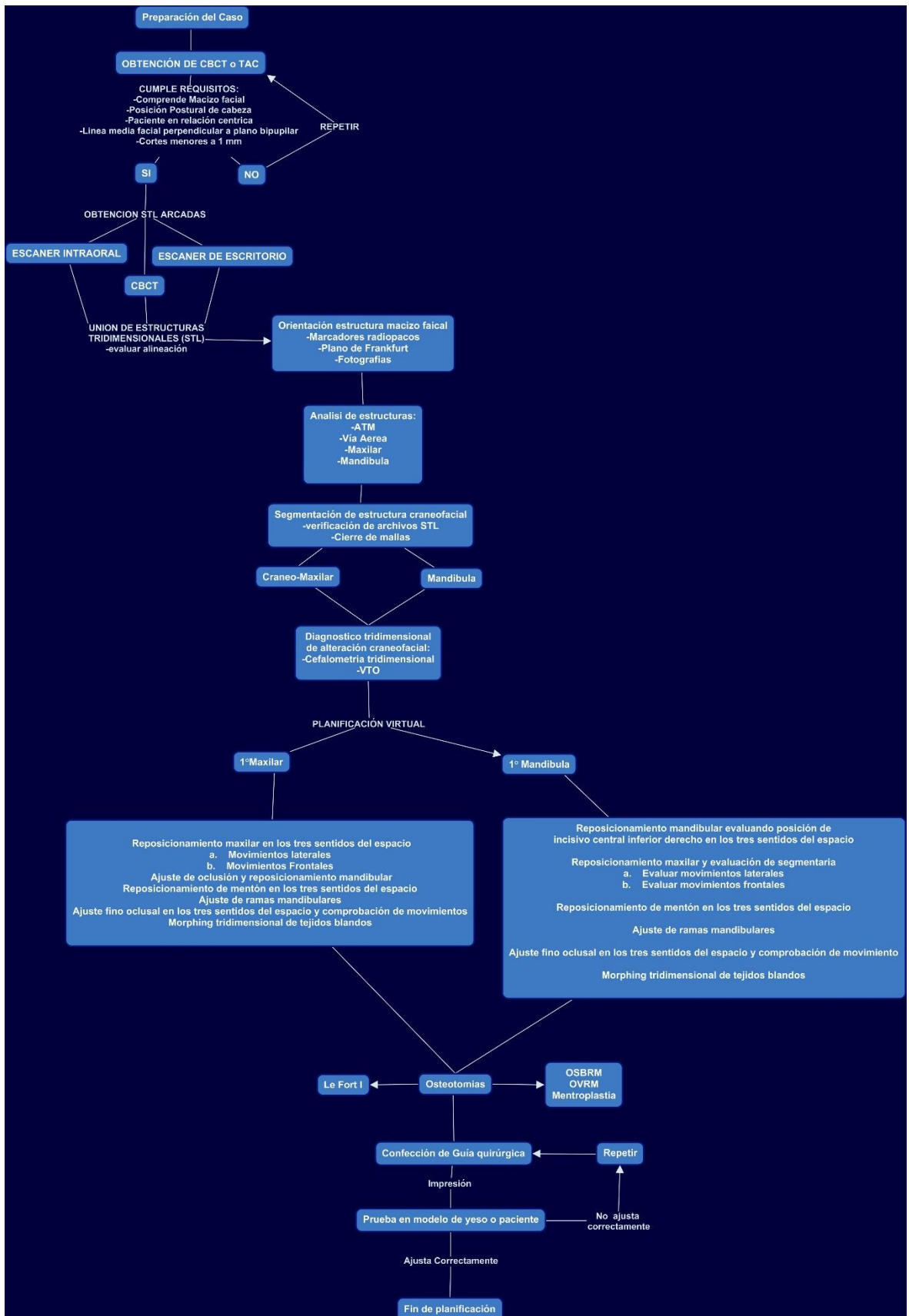
Finalmente se realizan los movimientos ortodóncicos quirúrgicos en la planificación y posteriormente se renderiza las modificaciones de acuerdo al porcentaje que el cirujano seleccionó a través del algoritmo de visualización, sin embargo debido a los distintos factores mencionados inicialmente la imagen tridimensional de la planificación no presenta una exactitud completa dejando al estado del arte de

acuerdo a la literatura el resultado final postquirúrgico por lo cual actualmente aún se encuentra en desarrollo y validación^{53,54,55}



Figura 18 y 19: reposicionamiento de imagen tridimensional y fotografía en programa DOLPHIN

Diagrama 2. Flujoograma de planificación virtual en cirugía ortognática



C. PLANIFICACION 3D PARA CIRUGÍA DE ATM

Entre las cirugías de mayor complejidad de la articulación temporomandibular (ATM) esta el recambio articular por anquilosis de la articulación que consiste en la unión de las estructuras óseas del cóndilo mandibular y la porción articular de la base del cráneo correspondiente al temporal. Las causas de esta enfermedad son variadas desde la más común que corresponde a trauma por ejemplo fracturas intracapsulares hasta complejas de etiología idiopática. Esta alteración produce hipomovilidad de la articulación de manera progresiva alterando la rotación y traslación de la articulación provocando asimetría facial, disminución de la apertura oral, maloclusión e hipo desarrollo mandibular que puede ser unilateral o bilateral resultando en una mordida abierta anterior.⁵⁶

Además, dependiendo del tiempo y momento en que se manifiesta la alteración temporomandibular puede estar asociada a asimetrías compensatorias del tercio medio facial alterando varias estructuras y comprometiendo las funciones asociadas como del habla o respiratoria.^{56,57}

Por lo cual un enfoque en el tratamiento de esta patología basada tanto en la etiología como en la corrección de la alteración de las estructuras y funciones comprometidas es crítica y por lo tanto habitualmente quirúrgica.^{56,57}

El objetivo principal es la restauración del movimiento mandibular, la función y armonía facial además de prevenir una nueva anquilosis.⁵⁷

El tratamiento quirúrgico es variado desde artroplastia con la utilización de injertos intraarticulares hasta la reconstrucción de la articulación con injertos libres o el reemplazo total de la articulación con un material aloplástico, este último presenta la complicación de que la reconstrucción se ve alterada por el gran compromiso en la anatomía de las estructuras además de la posibilidad de lesionar estructuras de la fosa craneal media por su proximidad provocando hemorragias por daño a la arteria maxilar interna, exposición de líquido cefalorraquídeo, lesiones neurológicas sumando a esto señala que para evitar una nueva anquilosis debe generarse una resección ósea que tenga un margen de seguridad entre quince a veinte milímetros y además las referencias óseas están ausentes habitualmente.^{58,59}

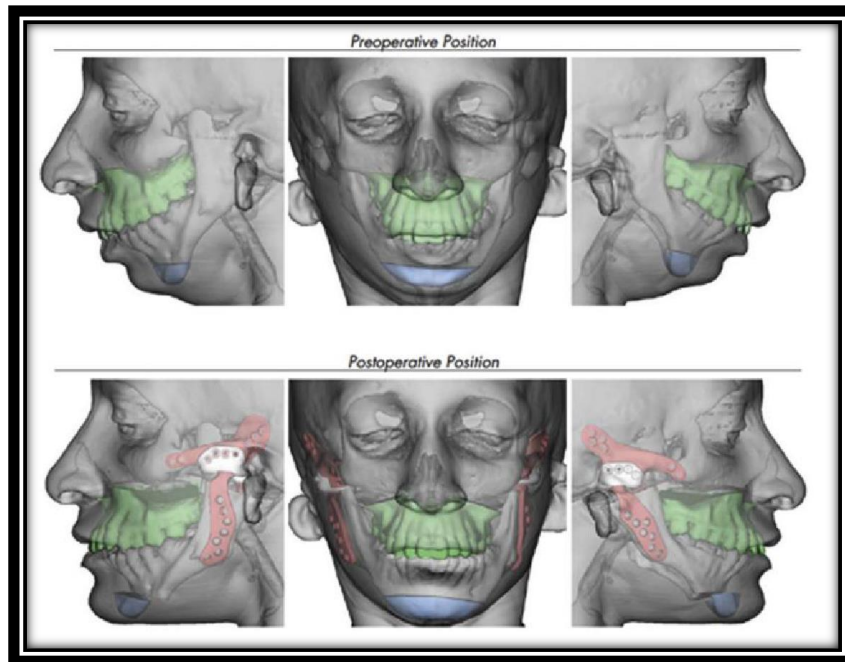


Figura 20: Recambio articular en paciente sindrómico

Por lo cual en la cirugía de ATM existen altas probabilidades de que ocurran errores obteniendo resultados no óptimos basados en la utilización de imágenes bidimensionales ya que las estructuras están sobrepuestas originando una imagen alterada de los contornos óseos principalmente del polo medial del cóndilo mandibular y la eminencia glenoidea, alteraciones en la oclusión de los pacientes, posición postural alterada por compensación, en consecuencia los avances en la planificación virtual en cirugía maxilofacial principalmente en el tratamiento quirúrgico de alteraciones en la articulación temporomandibular han permitido una mejora en la capacidad de los cirujanos para devolver forma y función a pacientes que sufren de anquilosis en la articulación de una manera más precisa, predecible y segura inclusive innovado en tecnologías de navegación asistida las cuales en un principio por su alto costo no se utilizaban y estaban reservados para neurocirugía o radioterapia pero que actualmente se han incorporado a programas de planificación virtual en cirugía maxilofacial como MATERIALISE a través de MIMICS permitiendo incorporar los datos en formato DICOM obtenidos a través de un TAC generando una representación tridimensional precisa tanto de tejidos duros como blandos.^{60,61,62}

Actualmente la planificación virtual de pacientes con diagnóstico de anquilosis de ATM incluye la planificación preoperatoria, fabricación de guías de corte y/o navegación intraoperatoria⁶⁰.

La planificación preoperatoria comienza con la obtención de los datos en formato DICOM los cuales son cargados a un programa de planificación para crear una imagen tridimensional en formato STL del cráneo del paciente el cual puede ser segmentado para una mejor manipulación mejorando la visualización, orientación y diagnóstico pudiendo realizar mediciones lineales como volumétricas de acuerdo a los voxels que presente el archivo creado cuantificando la distancia a estructuras

importantes como la arteria maxilar interna o la salida del nervio facial a través del agujero estilomastoideo permitiendo la realización de márgenes de resección, los cuales posteriormente serán utilizados en las guías de corte a través de simulaciones quirúrgicas⁶⁰.

Una vez realizada la simulación se diseña y fabrican guías de corte específicas para el paciente que permiten realizar osteotomías precisas durante la cirugía, además estas pueden ser utilizadas en conjunto con cirugía ortognática, incluso permite la confección de modelos estereolitograficos para diseñar prótesis articular customizadas las cuales presentan como punto de evaluación una guía oclusal permitiendo a través de estas, una transferencia de información precisa y un resultado optimo.⁶³

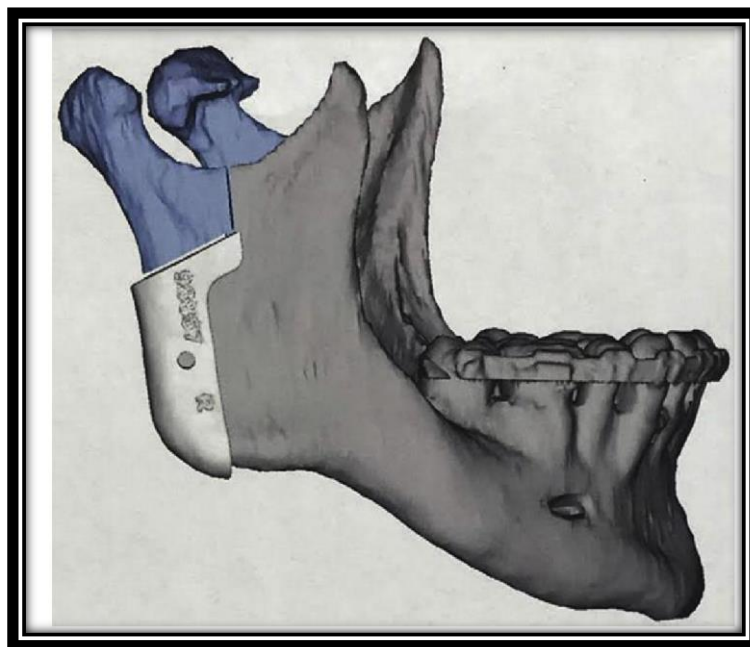


Figura 21: Guía de corte diseñada en MIMICS

En caso que el paciente además de la anquilosis mandibular presente una oclusión inestable el TAC debe ser tomado con el mismo protocolo que en una cirugía ortognática, sin embargo si este no es el caso es posible tomar el TAC en oclusión idealmente fijada con un bloqueo intermaxilar⁶².

La principal desventaja es el alto costo de realizar la planificación, fabricación de modelos, guías de corte, Splint y prótesis articular, de este modo en caso que no sea factible completar todo el proceso se sugiere utilizar un flujo de trabajo más acotado a partir de la impresión de modelos estereolitograficos que permitirán evaluar la anatomía condilar y fosa glenoidea, especialmente el punto de anquilosis y visualizar de mejor manera los contornos y márgenes quirúrgicos que se realizaran, en caso que se requiera recambio articular permite realizar de forma precisa la utilización de una prótesis articular estándar no customizada como la utilizada por Zimmer Biomet⁵⁹.

En casos complejos como cuando existe una reanquilosis se puede utilizar un protocolo de planificación modificado consistente en dos etapas, en la cual la primera es para preparar las estructuras óseas asegurando una separación mínima de quince milímetros e interponer un espaciador, para posteriormente realizar un bloqueo intermaxilar para evitar la movilización del espaciador. En la segunda etapa se realiza un TAC para generar un modelo tridimensional en el cual se realiza la planificación virtual mencionada, para posteriormente en una segunda cirugía retirar el espaciador e instalar la prótesis articular de forma precisa⁶².

Además de la utilización de guías de corte y splint en la planificación virtual en cirugía craneomaxilofacial existe la navegación intraoperatoria la cual permite la realización de casos complejos en una sola etapa especialmente cuando además de la cirugía articular se realizará cirugía ortognática presentando un margen de error menor a un milímetro en la posición de las estructuras óseas entre la planificación prequirúrgica y los resultados post quirúrgicos.^{61,63}

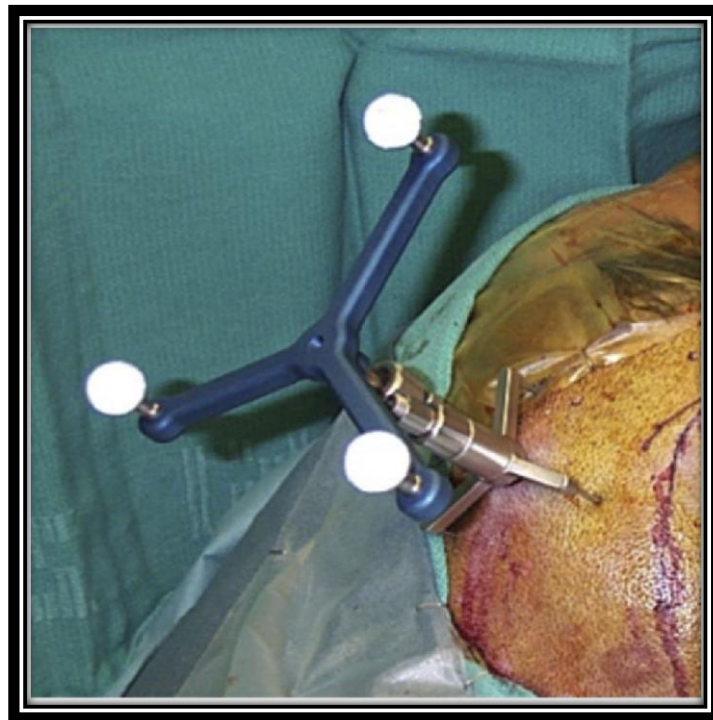
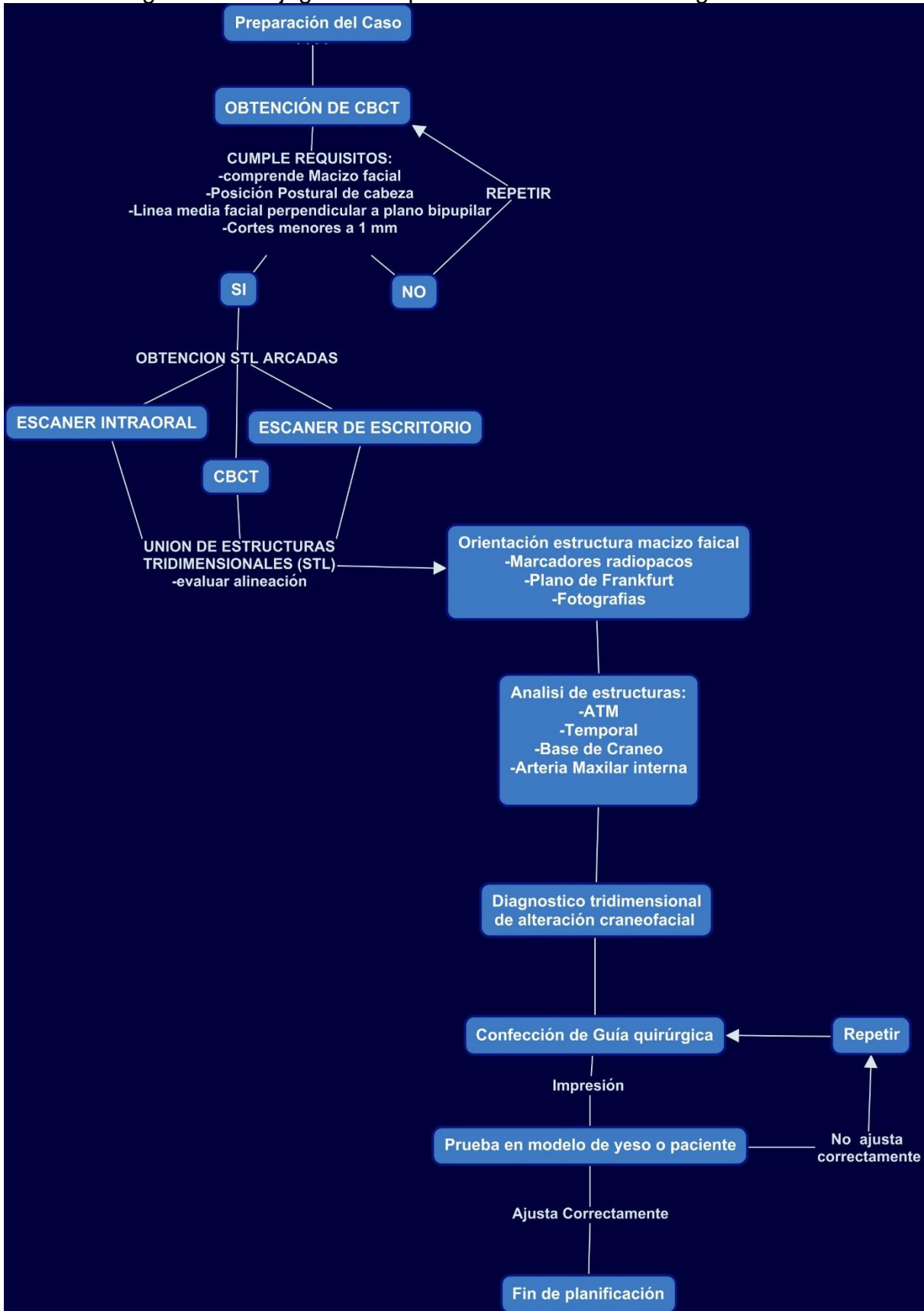


Figura 22: Posicionador tridimensional para navegación asistida.

Diagrama 3. Flujograma de planificación virtual en cirugía de ATM



D. PLANIFICACION 3D PARA CIRUGIA DE TRAUMA MAXILOFACIAL

La planificación virtual tridimensional ha evolucionado en las últimas décadas en conjunto con la tecnología y el desarrollo de flujos de trabajo principalmente en la cirugía de implantes y ortognática, sin embargo con el paso del tiempo también ha avanzado hacia la cirugía de trauma con el fin de mejorar la precisión y de este modo el resultado quirúrgico, en la recuperación de las características de la órbita, o asimetrías faciales que son difíciles de manejar completamente en el contexto en que se reciben y tratan pacientes politraumatizados, produciendo resultados no óptimos al no ser capaz de visualizar completamente la estructura ósea, ni lograr una fijación interna rígida exacta, lo cual produce una acumulación de errores intraoperatorios que dan como resultado un paciente asimétrico existiendo la posibilidad que se produzcan diplopía o maloclusiones en pacientes demasiado complejos⁶⁴.

Por lo cual es importante considerar la planificación virtual tridimensional como una herramienta tanto para el trauma agudo como en un tratamiento secundario, siendo importante definir el flujo de trabajo en caso que se decida utilizar, debido al contexto del paciente principalmente en traumatismo agudo el TAC de ingreso no cumple con las características para ser utilizado y se deberían repetir los cortes ya que no deben ser mayores a un milímetro, una vez obtenidos los datos DICOM estos son procesados en un programa de renderización para obtener un objeto tridimensional en formato STL el cual puede ser utilizado en la planificación dependiendo del caso a través de las operaciones booleanas^{64,65}.

Es por esto que se considera una buena herramienta el diseño de un flujo de trabajo que permita obtener directamente un TAC de 1.0 mm y no repetirlo, evitando aumentar el tiempo de exposición del paciente, del equipo de urgencias y finalmente del cirujano que debe gestionar la repetición del estudio imagenológico⁶⁵.

La opción más simple es que se permita al cirujano manipular el objeto de acuerdo a lo que desea realizar intra operatoriamente a través de duplicación, segmentación, rotación o traslación de la estructura estableciendo un plan de trabajo y posterior confección de un modelo estereolitografico, el cual será utilizado para personalizar el material de osteosíntesis contorneando y pre doblándolo para esterilizarlos previo a la cirugía permitiendo mejorar la precisión y disminuyendo el tiempo intraoperatorio⁶⁵.



Figura 22: Pre contorneo de osteosíntesis en practico realizada por Universidad de Valparaíso

Otra aplicación de la planificación virtual es la confección de osteosíntesis personalizada posterior a reconstrucción tridimensional del paciente en casos complejos como conminución, solución de continuidad, desplazamientos severos, perdida de referencias como de la dentición, quedando con una oclusión inestable la cual evita una correcta planificación y es un desafío mayor al cual deben afrontar tanto el cirujano maxilofacial como el equipo de planificación debido a que el modelo estereolitografico no reproduce densidad del tejido óseo, lo cual dificulta la elección del sitio donde irán los tornillos de osteosíntesis, además de que al no existir una oclusión estable aumenta la probabilidad al utilizar la guía quirúrgica que se produzcan contactos prematuros o interferencias dando como resultado una mordida abierta anterior a pesar de una correcta adaptación de la placa de reconstrucción⁶⁶.

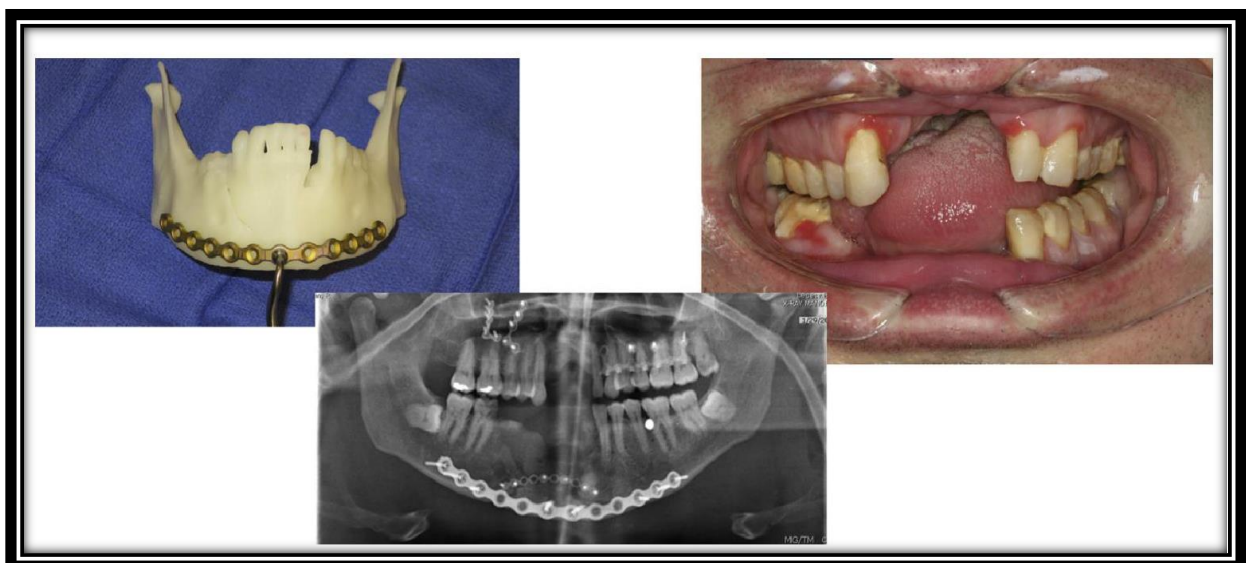


Figura 23: Caso clínico, imagen izquierda: pre contorneo de osteosíntesis, imagen central: radiografía panorámica de control, imagen derecha: mordida abierta post quirúrgica con contactos prematuros

La utilización de planificación virtual en trauma presenta ventaja de disminuir el tiempo de la cirugía, mejora la precisión y en algunos casos disminuye la complejidad, sin embargo, aun presenta la desventaja principal del alto costo especialmente al utilizar osteosíntesis personalizada y el aumento del tiempo de planificación y fabricación de la osteosíntesis⁶⁶.

Diagrama 4. Flujograma de planificación virtual en cirugía de trauma maxilofacial



E. PLANIFICACION 3D PARA CIRUGIA ONCOLOGICA

La cirugía oncológica, especialmente en cabeza y cuello debe cumplir tanto objetivos funcionales como estéticos lo cual complejiza la reconstrucción al deber restaurar la cara y sus subunidades, este tipo de cirugías tiene gran importancia en la identidad de la persona afectando su desarrollo psicosocial por lo que el objetivo estético es obtener simetría y proyección de estructuras de forma adecuada y en el ámbito funcional recuperar el habla, deglución y visión⁶⁷.

La utilización de osteosíntesis rígida así como injertos locoregionales y microvasculares actualmente son las herramientas con que cuenta el cirujano maxilofacial para la reconstrucción de defectos originados por el tratamiento del cáncer, además la planificación virtual tridimensional se ha convertido en un pilar en la reconstrucción con el avance de la tecnología ayudando al cirujano tanto en la planificación quirúrgica como en aumentar la precisión intraoperatoria incluso utilizando navegación intraoperatoria principalmente cuando la reconstrucción se encuentra cerca de la base del cráneo próximo a estructuras críticas además de ayudar con los márgenes de la resección⁶⁷.

El flujo de trabajo es considerado el más complejo en cirugía maxilofacial al involucrar la planificación tanto de tejidos duros como blandos incluyendo la utilización de implantes dentarios, comienza con la adquisición de datos los cuales se recomienda a través de un TAC de cortes finos máximos de un milímetro en conjunto con imágenes del sitio donante en caso de reconstrucción ósea por ejemplo fíbula, radio o escapula entre los más utilizados y recomendados por la literatura. Además puede incluir un angiografía tomográfica de las extremidades inferiores o TAC de tórax, también se debe obtener el registro dental el cual puede ser a través del escáner de modelos de yeso o directamente con un escáner óptico intraoral los cuales se combinan para obtener un objeto tridimensional de las estructuras a receptoras y donantes inclusive es posible para obtener un mayor nivel de detalle la utilización de escáner tridimensional de cara o resonancia nuclear magnética para definir los márgenes de las estructuras involucradas^{68,69}.

Posterior a la obtención del archivo STL el cual puede ser obtenido y procesado en los programas de planificación virtual a través de los archivos DICOM corresponde la segmentación de las estructuras de interés que gracias a la gran cantidad de información recopilada anteriormente puede incluir tejido óseo, nervios, vasos y la lesión tumoral, el cual inicialmente se realizaba por la distinta radiopacidad expresada en unidades de Hounsfield pero actualmente por el algoritmo computacional utilizado se puede realizar de forma automática por el programa solo seleccionando un punto de interés y abstrayendo la estructura con características similares dentro de cierto rango preestablecido⁷⁰.

La planificación preoperatoria una vez se ha segmentado se debe delinear la lesión, establecer márgenes de seguridad identificando e intentando preservar estructuras vitales como nervios, de acuerdo a la extensión de la lesión a resear se puede utilizar el lado contralateral para reflejar la estructura permitiendo recuperar el contorno óseo, posteriormente se realizan las guías de corte considerando su adaptación en el tejido óseo o en caso de presentar dientes puede ser confeccionada una guía con soporte

oclusal pudiéndose incorporar orificios predictivos para la perforación posterior de los tornillos de osteosíntesis de las placas de reconstrucción, permitiendo estos realizar bloqueo intermaxilar de ser necesario, además en caso de utilizar un injerto libre o colgajo microvascularizado se puede realizar una guía de corte para la obtención de estos y ajustar al defecto, la planificación de rehabilitación dental en caso de ser necesaria también puede ser realizada en este punto planificando la utilización de implantes en un peroné micro vascularizado por ejemplo^{70,71}.

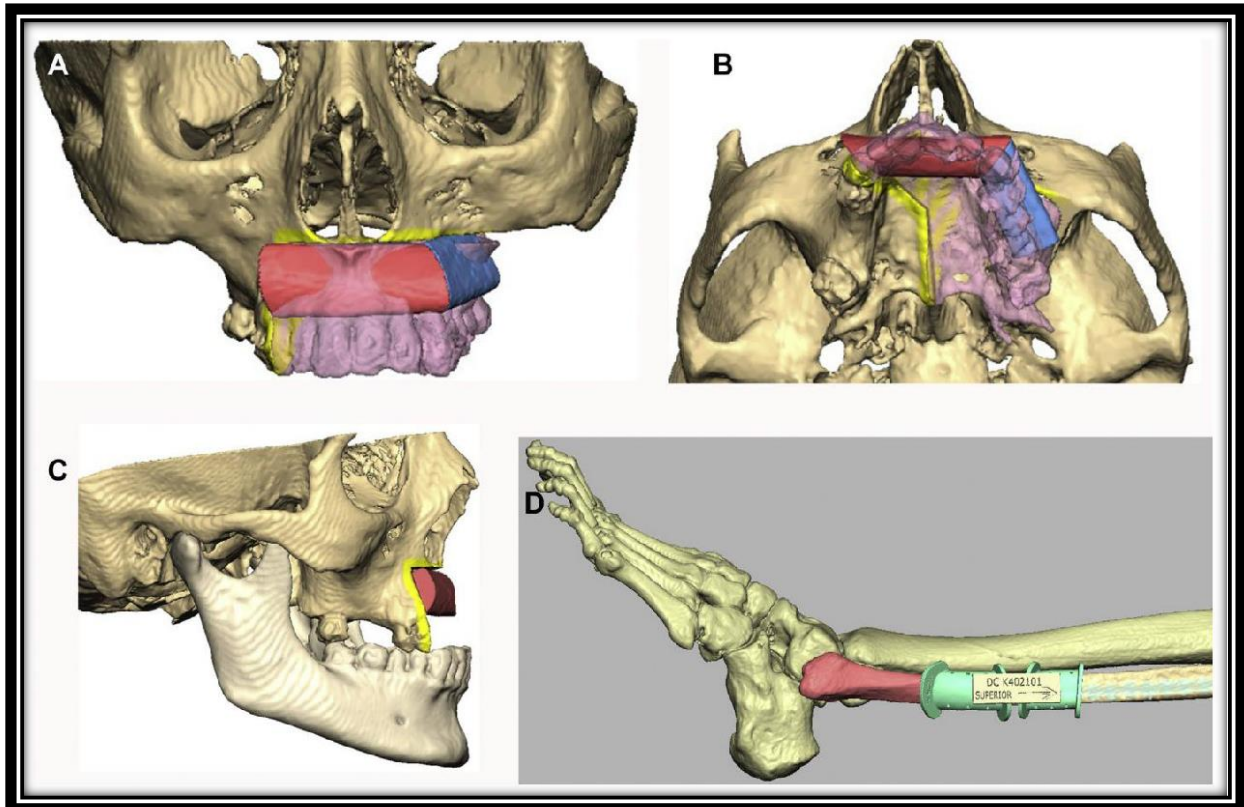


Figura 24: Caso clínico de reconstrucción maxilar con fíbula
Imágenes A,B,C planificación tridimensional en visualizado anterior, lateral derecho e inferior respectivamente. Imagen D: Planificación guía de corte injerto microvascular

Una vez terminada la planificación preoperatoria se fabrican los modelos estereolitograficos, guías de corte y de acuerdo con el caso y posibilidad económica placas personalizadas permitiendo disminuir el tiempo operatorio y aumentando la precisión de la reconstrucción.⁷¹



Figura 25: Caso clínico de reconstrucción mandibular con injerto de fíbula e implantes dentarios. Imagen izquierda: Guía personalizada para resección. Imagen central: Guía de corte personalizada para osteotomía de peroné. Imagen derecha: Guía y colgajo microvascularizado para posicionamiento de implantes.

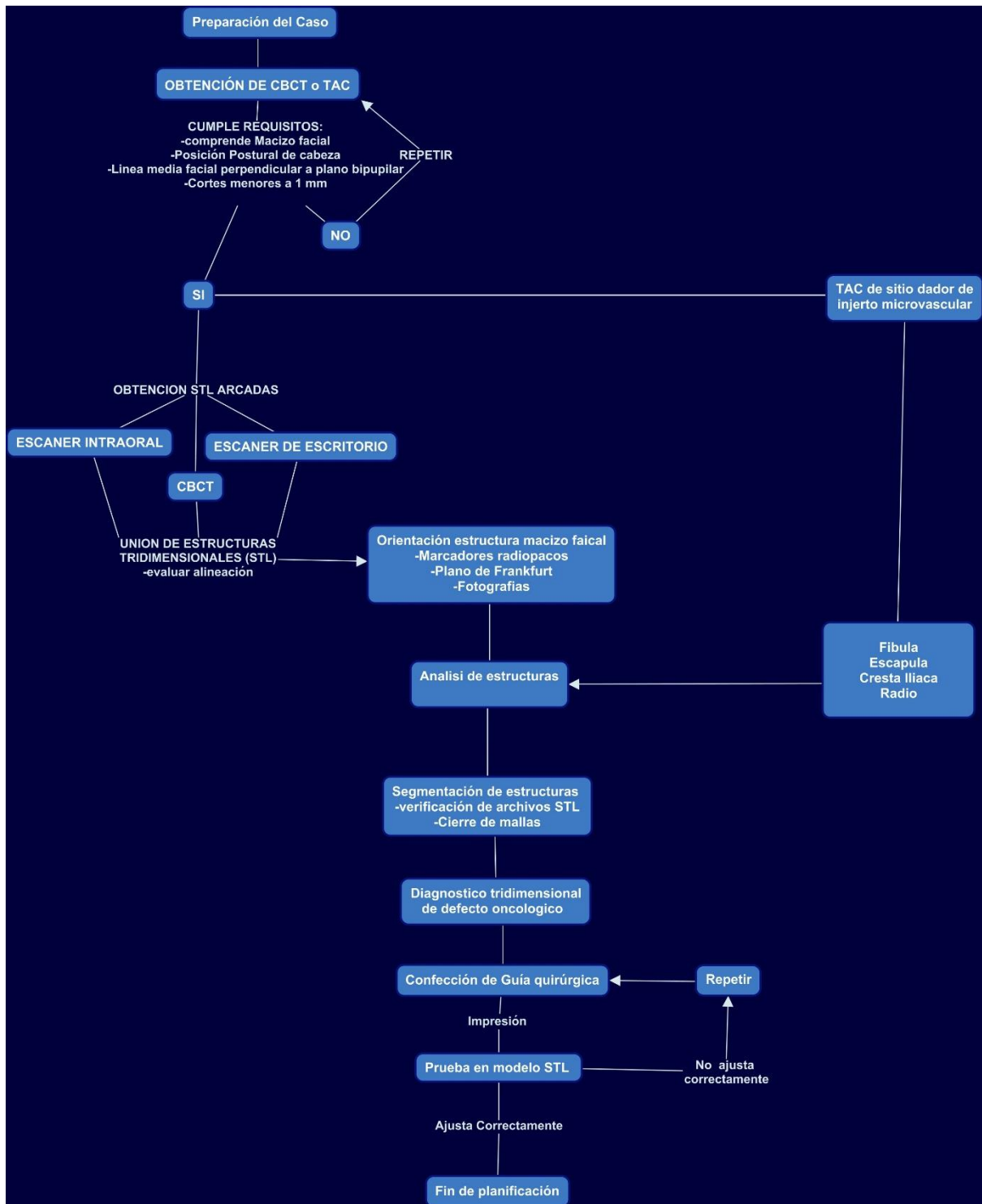


Figura 26: Caso clínico de reconstrucción mandibular con injerto de fíbula e implantes dentarios. Imagen superior izquierda: guía personalizada para resección. Imagen izquierda: colgajo microvascular con implantes instalados. Imagen central: Colgajo microvascularizado con implantes dentarios posicionado intraoral. Imagen derecha: Paciente rehabilitado

En el caso que la planificación virtual sea complementada con navegación se debe realizar el registro del paciente prequirúrgico al programa de navegación asistida utilizando marcados preestablecidos.⁷²

Posteriormente se realiza la cirugía utilizando un abordaje apropiado que debe considerar la utilización de guías de corte que habitualmente significa una mayor extensión en el, las guías se fijan con tornillos mono-corticales, posteriormente se realiza la resección y se extrae el colgajo óseo o injerto microvascularizado dependiendo del caso en particular, es en esta etapa donde se puede realizar la instalación de implantes dentales. La placa de reconstrucción se puede fijar previo a la transferencia facilitada por la utilización de los orificios preestablecidos. En el caso de navegación es posible además evaluar intraoperatoriamente sin necesidad de estudios imagenológicos la correcta ubicación del colgajo o injerto utilizado.⁷⁰

Diagrama 5. Flujograma de planificación virtual en cirugía oncológica en territorio maxilofacial



DISCUSIÓN

De acuerdo con lo planteado por Deeb et al el 2019 la planificación virtual es la nueva forma de diseñar ya que permite analizar posibles alteraciones que de otra manera hubieran pasado por alto, Swennen en 2019 como Baker el 2012 quien señala el tratamiento de alteraciones de simetría especialmente en el eje vertical solo visualizables con planificación virtual, ya que en la forma tradicional el análisis cefalométrico bidimensional no es capaz.^{2,4,6,7,8}

El primer paso en todos los protocolos de planificación es la obtención de una imagen a través de formato DICOM con las características señaladas en el anexo 1 el cual es ocupado actualmente por el equipo de diseñadores que trabajan en conjunto con la Universidad de Valparaíso siendo referentes a nivel nacional, el cual ha sido estandarizado para ser utilizado en cualquiera de los flujos de trabajo, la imagen puede ser obtenida tanto en un tomógrafo axial computarizado como en uno de haz cónico sin embargo se deben tener en cuenta las características en la obtención de ambos, Pérez y garza el 2019 señalan que es el paso fundamental una vez traspasado las imágenes a formato STL conformando un objeto tridimensional que incluye tejidos duros y blandos, pudiéndose analizar en los tres sentidos del espacio y permitiendo realizar múltiples operaciones de diseño es la posición natural de cabeza, la cual habitualmente es pasada por alto, pero es desde este punto donde todo debe ser iniciado, ya que una alteración en esta posición desencadena error en todos los movimientos y operaciones realizadas comprometiendo la exactitud y el resultado final de la planificación hasta en once grados.^{11,61}

El cirujano maxilofacial puede analizar la anatomía durante la planificación virtual, planificar el tipo de abordaje, la utilización de osteosíntesis o implantes, identificar y preservar estructuras importantes y el comportamiento de los fragmentos en caso de ser movilizados, esto es cercano al 90% en cirugía que compromete ambos maxilares especialmente mandíbula según Farrel y cercana al 98% en el caso de utilizar planificación virtual solo para el tratamiento de implantes dependiendo del tipo de guía o utilización de navegación virtual.⁴⁴

En el caso específico de cirugía ortognática, la cual es la planificación virtual más utilizada y ha dado la pauta para la realización en su gran mayoría de los flujos de trabajo, la planificación virtual permite analizar en programas como NEMOFAB el comportamiento de las estructuras desde cómo se comportaría una osteotomía sagital de rama mandibular (OSRB) , que sucedería con el segmento distal y si existe la posibilidad de un tope, en cual caso se puede considerar la realización de una osteotomía adicional en la zona retromolar, necesidad de utilización de injertos óseos, corrección de asimetrías evaluando a través de mediciones precisas que permiten dimensionar que estructuras están afectadas de acuerdo a lo planteado por Swennen en sus diversas publicaciones desde 2009 a 2019.^{2,4,6,7,8,31}

En el aspecto funcional la planificación virtual permite evaluar alteraciones en la oclusión y articulación temporomandibular, esta última incluso se ha visto beneficiada de la evolución de la tecnología al permitir un recambio articular con consideración de estructuras adyacentes, desgaste de superficies, guías de corte y prótesis customizadas según lo señalado por Keyser y Zahid el 2019.⁴⁴

La planificación virtual además presenta la ventaja de permitir una vez toda la información cargada realizar múltiples planes de trabajo pudiendo ser almacenados en formato físico como en servidores lo que permite visualizar y compartir esta información tanto con el paciente como con los demás miembros del equipo quirúrgico e incluso analizar a través de imagenología tridimensional el grado de resultado de la planificación y analizar la evolución de los pacientes.

El tiempo utilizado en planificación virtual es un tema importante en la discusión debido a que en la literatura del año 2019 aún es una controversia, Swennen, Gateno y Farrel consideran que existe una disminución en el tiempo operatorio al comparar planificación virtual versus una planificación tradicional sin embargo Brian y Harrison consideran que en el tiempo total que se debe utilizar considerando preoperatorio e intraoperatorio con planificación virtual hay una mayor cantidad de horas de trabajo involucradas, a pesar de reconocer que con el tiempo estos tiempos se reducen.^{2,4,5,8,44,61,52,}

La precisión y exactitud de la planificación virtual ha sido validada en el tiempo, especialmente en tejidos duros sin embargo aún se encuentra en validación respecto al tejido blando dependiendo de que algoritmo utilice el programa de planificación y las características de los pacientes incluyendo raza, sexo, edad. Con la incorporación de escáner ópticos con sistema de cámaras de cuatro dimensiones que permiten obtener imágenes tridimensionales en movimiento la exactitud en la predicción del movimiento y proyección se ha ido acercando a la del tejido duro especialmente en los que se han basado en la utilización del programa DOLPHIN.³⁷

Entre las desventajas que posee la planificación virtual son los altos costos para obtener una licencia de un programa de planificación como NEMO o DOLPHIN en los cuales se debe pagar entre nueve a once mil dólares además de las actualizaciones que se pagan de forma independiente, para la implementación se debe adquirir un ordenador de alto rendimiento con tarjeta gráfica dedicada y suficiente memoria RAM con un costo superior a los dos mil dólares, existe una alternativa más económica la cual es utilizar programas de diseño libres como BLENDER o RHINO los cuales deben en el caso de este último ser utilizados por diseñadores en conjunto con el cirujano maxilofacial lo cual aumenta el tiempo prequirúrgico dedicado a la planificación.

La curva de aprendizaje es larga para la utilización de los programas de planificación virtual especialmente en los cuales no está limitado el movimiento de los objetos tridimensionales ni se conocen las operaciones booleanas clásicas, esto último toma especial importancia en la planificación virtual de pacientes oncológicos en los cuales se debe duplicar estructuras, sobreponer y aislar elementos de las guías quirúrgicas siendo poco intuitivo de acuerdo a lo señalado por Harrison y Patel durante el 2020, lo cual se vuelve más engorroso en el caso de reconstrucción con injertos microvasculares ya que se debe manejar las estructuras tridimensionales de distintos órganos para la correcta obtención de los injertos de fíbula, cresta iliaca y radial que actualmente son el Gold estándar en reconstrucción tanto en maxilar como mandíbula.⁷⁰

CONCLUSIÓN

Actualmente la planificación virtual se encuentra validada, especialmente en cuanto a los tejidos óseos y va en vías de validación en tejidos blandos, especialmente en alteraciones de simetría.

La planificación virtual permite analizar las estructuras en las tres dimensiones, sin embargo, es también por esta razón que es de suma importancia la correcta definición de la posición natural de cabeza ya que al alterarse se cometerán una seguidilla de errores que alterarán el resultado quirúrgico siendo crítico la obtención de las imágenes en formato DICOM.

Se sugiere especialmente por Swennen que la planificación virtual actualmente entrega más información que la planificación tradicional en cirugía ortognática especialmente en el diseño de férulas oseosoportadas en vez de dentosoportadas y osteosíntesis personalizadas que permiten definir la posición de maxilar, mentón, cóndilo de manera independiente y exacta evitando la utilización de equipos de imagenología en el intraoperatorio y disminuyendo la cantidad de radiación adquirida por el paciente.

Además actualmente la planificación virtual esta desarrollada para poder ser utilizada en otros aspectos de la cirugía maxilofacial desde la rehabilitación compleja implanto soportada hasta la oncológica incluyendo el trauma, sin embargo para esta ultima el flujo de trabajo incluye habitualmente la repetición del TAC inicial ya que no cumple con las características necesarias descritas en el anexo 1 realizado por PLAN3D que reúne las características solicitadas en todos los programas de planificación y diseño tridimensional.

El flujo de trabajo posterior a la obtención de las imágenes en formato DICOM continua con el procesamiento para obtener objeto tridimensional el cual debe ser segmentado y complementado con los registros obtenidos habitualmente con escáner intraorales para cirugía ortognática o Angiotac y resonancia nuclear magnética en caso de pacientes oncológicos.

Finalmente, de acuerdo con el tratamiento planificado se confeccionan guías quirúrgicas las cuales pueden ser guías para implantes (estrictas o semi estrictas), splint para cirugía ortognática, guías de corte y/u osteosíntesis personalizadas para trauma u oncológica.

En definitiva, la planificación virtual debe ser considerada como una herramienta para el trabajo en cirugía maxilofacial pero que no reemplaza la experiencia del cirujano sino es más bien un complemento para un resultado más exacto y predecible tanto en el intraoperatorio como en la evolución del paciente.

Por último, se debe considerar que muchos cirujanos están acostumbrados a la planificación tradicional y es en ellos donde radica la mayor complejidad para realizar el cambio a la planificación virtual ya que no se puede desconocer su experticia que destaca en su capacidad para manipular las estructuras en el intraoperatorio y no en la visualización prequirúrgica y aun menos en la navegación guiada que limita esta característica.

SUGERENCIAS

La planificación virtual actualmente presenta un alto costo tanto en programas así como en su implementación por lo cual como sugerencia a través de los conocimientos adquiridos en mis residencias especialmente en el Hospital Gustavo Fricke como en la literatura considero que la forma de acercar esta tecnología al servicio público es a través del trabajo en equipo y utilización de programas libres como BLENDER o asociado a un equipo de diseñadores como es el caso de la Universidad de Valparaíso y PLAN3D

ANEXOS:

1. Protocolo PLAN3D para la obtención de CBCT/TAC



PROTOCOLO CT SCAN CMF

CT/CBCT Scan Protocol

This protocol describes the guidelines for a CT or CBCT Scan for ordering the following:

- Milled Patient Specific Plates for Mandible (PSPM)
- PEEK Milled Patient Specific Implants (PSI)
- Patient Specific Plate Contouring (PSPC)
- Titanium 3D Printed Patient Specific Implants, Plates and Guides
- Polyamide Surgical Guides
- Acrylic Orthognathic Splints
- Anatomic Models

Important

- Use of this scanning protocol as a guideline will result in a more anatomic accurate model, surgical guide, and/or implant.
- CBCT Scans are not accepted for PEEK Milled PSI

Preparation of the patient

- Remove any non-fixed metal prosthesis or jewelry that might interfere with the region to be scanned.
- Non-metal dentures may be worn during the scan.
- Make the patient comfortable and instruct him not to move during the procedure. Normal breathing is acceptable but any other movement, such as tilting and/or turning the head, can cause motion artifacts that compromise the reconstructed images, requiring the patient to be rescanned.
- Stabilize the relationship of the jaws during the scan. The patient is preferably scanned with a very thin bite wafer that does not influence the facial soft tissues.

Reconstruction of the images (CT or CBCT)

- Use a proper image reconstruction algorithm to get sharp reformatted images for locating internal structures such as the alveolar nerves. Use the sharpest reconstruction algorithm available.

- Reconstruct the images with a 512 × 512 matrix. (768 × 768 for Titanium 3D Printed Patient Specific Implants and Guides)
- Only the axial images are required, no additional reformatting of the images has to be done.
- Save the images in uncompressed standard DICOM format onto a CD or DVD.

CT Scanning Instructions

- Images scanned under a gantry tilt and oblique or reformatted images negatively influence the accuracy; use only primary axial images.
- All slices must have the same field of view, reconstruction center, and table height.
- Scan with the same slice spacing, less than or equal to the slice thickness.

Patient Positioning

Place the patient supine on the scanner table and move the patient into the gantry, head first.

- Minimize the artifacts caused by metallic dental restorations or orthodontic brackets by aligning the patient's occlusal plane as much as possible with the axial slices.
- Do not deform the soft tissue.
- Depending on the product or service requested, the field of view should include:
 - Nose and chin
 - Left and right TMJ
 - Other regions of interest if required (ex. cranium)
 - For reconstruction cases the complete tumor/defect

CT Scan Parameters

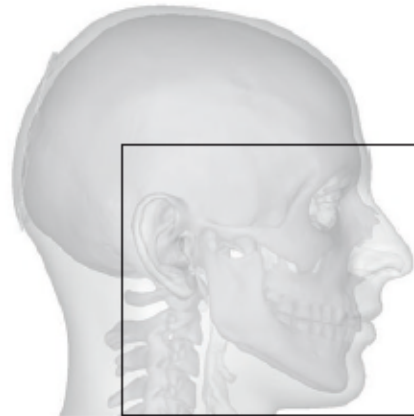
Gantry tilt/oblique angle	0°
Matrix	512 × 512
Slice thickness	Maximum 1.0 mm Optimal 0.5 mm
Feed per rotation	Maximum 1.0 mm Optimal 0.5 mm
Reconstructed slice increment	Maximum 1.0 mm Optimal 0.5 mm
Reconstruction algorithm	Bone or high resolution

CT/CBCT Scan Protocol
for TRUMATCH CMF Products and Services

CBCT Scanning Instructions

Patient Positioning

- Position the patient seated, with a natural head position, with the jaws in centric relation (CR)
- Do not deform the soft tissue (no chin cups, no straps)
- The field of view should include:
 - Nose and chin
 - Left and right TMJ
- Region of interest should be at least at 10 mm from the border of the field to avoid possible border distortion effect



Required field of view for orthognathic cases

CBCT Scan Parameters

Use the following scan parameters or closest approximation

Parameter	Ti 3D Printed Implants, Plates, Guides
Matrix	768 × 768
Field of view	Largest available
Scan time	Longest available
Voxel size	0.3 mm
Reconstructed slice increment	Max 0.3 mm
Export	DICOM

Parameter	Anatomical models
Matrix	512 × 512
Field of view	Largest available
Scan time	Longest available
Voxel size	0.3–0.5 mm
Reconstructed slice increment	Max 0.5 mm
Export	DICOM

BIBLIOGRAFIA

1. Lucas M. Ritschl, Thomas Mücke, Andreas M. Fichter, Maximilian Roth, Clemens Kaltenhauser, Jean Marc Pho Duc, Marco R. Kesting, Klaus-Dietrich Wolff, Denys J. Loeffelbein, Axiographic results of CAD/CAM-assisted microvascular, fibular free flap reconstruction of the mandible: A prospective study of 21 consecutive cases, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, Volume 45, Issue 1, 2017, Pages 113-119
2. Deeb GR, Tran DQ, Deeb JG. Computer-Aided Planning and Placement in Implant Surgery. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2020 Sep;28(2):53-58.
3. Swennen GRJ, Schutyser F: Three-dimensional virtual approach to diagnosis and treatment planning of maxillo-facial deformity, in Bell WH, Guerrero CA (eds): *Distraction Osteogenesis of the Facial Skeleton* (vol 6). Hamilton, BC Decker, 2007, p 55
4. Swennen GRJ, Mommaerts MY, Abeloos J, et al: The use of a wax bite water and a double CT scan procedure to obtain a 3D augmented virtual skull model. *J Craniofac Surg* 18:533, 2007
5. Marchetti e, Bianchi A, Bassi M, et al: Mathematical modeling and numerical simulation in maxillo-facial virtual surgery (VISU). *J craniofac Surg* 18:826, 2007
6. Swennen GRJ, Mommaerts MY, Abeloos J, et al: A cone-beam CT based technique to augment the 3D virtual skull model with a detailed dental surface. *Int J Oral Maxillofac Surg* 38:48, 2009
7. Swennen GRJ, Schutyser F, Barth EL, et al: A new method of 3D cephalometry: part I. The anatomic cartesian 3-D reference system. *CT craniofac Surg* 17:314, 2006
8. Swennen GRJ, Mollemans W, De elereq C, et al: A cone-beam er triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J Craniofae Surg* 20:297, 2009
9. Mollemans W, Schutyser F, Nadjmi N, et al: Predicting soft tissue deformations for maxillofacial surgery planning system: From computational strategies to a complete clinical validation. *Med Image Anal* 11:282, 2007
10. Hernandez-Aifaro F, Guijarro-Martmez R. New protocol for three-dimensiona surgical planning and CAD/CAM splint generation in orthognathic surgery: an in vitro and in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2013;42: 1547-1556.
11. Hsu SS, Gateno J, Bell RB, Hirsch DL, Markiewicz MR, Teichgraeber JF, et al. Accuracy of a computer-asisted surgical simulation protocol for

- orthognathic surgery: a prospective multicenter study. *J Oral Maxillofac Surg* 2013;71:128-42.
12. Xia J, Samman N, Yeung RW, Wang D, Shen SG, Ip HH, et al. Computer-assisted threedimensional surgical planning and simulation: 3D soft tissue planning and prediction. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2000;29:25Q-8.
 13. Choi W, Nguyen BC, Doan A, et al. Freehand versus guided surgery: factors influencing accuracy of dental implant placement. *Implant Dent* 2017;26:500.
 14. Vermeulen J. The accuracy of implant placement by experienced surgeons: guided vs freehand approach in a simulated plastic model. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017;32:617.
 15. Duello GV. Intraoral scanning for single-tooth implant prosthetics: rationale for a digital protocol. *Compend Contin Educ Dent* 2018; 39(1):28e34.
 16. Vermeulen J. The accuracy of implant placement by experienced surgeons: guided vs freehand approach in a simulated plastic model. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017;32:617.
 17. Steenberghe D, Glauser R, Blombäck Ulf, et al. A computed tomographic scanner-derived customized surgical template and fixed prosthesis for flapless surgery and immediate loading of implants in fully edentulous maxillae: a prospective multicenter study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2005;7:s111e20.
 18. Pettersson A, Komiyama Ai, Hultin M, et al. Accuracy of virtually planned and template guided implant surgery on edentate patients. *Clin Implant Dent Relat Res* 2012;14(4):527e37.
 19. Nedelcu R, Olsson P, Nystrom I, et al. Accuracy and precision of 3intraoral scanners and accuracy of conventional impressions: a novel in vivo analysis method. *J Dent* 2018;69:110e8.
 20. Gateno J, Xia J, Teichgraeber JF, et al : A new technique for the creation of a computerized composite skull model. *J Oral Maxillofac Surg* 61:222, 2003
 21. Swennen GRJ, Barth EI, Eulzer e, et al: The use of a new 3D splint and a double CT scan procedure to obtain an accurate anatomic 3D virtual augmented model of the skull. *Int J Oral Maxillofac Surg* 36:146, 2007
 22. Swennen GR, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, et al. A conebeam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J craniofac Surg* 2009;20:297-307.
 23. Swennen GR, Schutyser F. Three-dimension- al cephalometry: spiral multi-slice vs conebeam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;130:41D-6

24. Swennen GR, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, et al. A conebeam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J craniofac Surg* 2009;20:297-307.
25. Li B, Zhang L, Sun H, Yuan J, Shen SG, Wang X. A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD/ CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2013;51:e239-e244.
26. Bell RB. Computer planning and intraoperative navigation in orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2011;69:592-605.
27. Marchetti e, Bianchi A, Bassi M, et al: Mathematical modeling and numerical simulation in maxillo-facial virtual surgery (VISU). *J craniofac Surg* 17:661, 2006
28. Swennen GR, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, et al. A conebeam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J craniofac Surg* 2009;20:297-307.
29. Swennen GRJ, Barth EI, Eulzer e, et al: The use of a new 3D splint and a double CT scan procedure to obtain an accurate anatomic 3D virtual augmented model of the skull. *Int J Oral Maxillofac Surg* 36:146, 2007
30. Centenero AH, Hernandez-Aifaro F. 3D planning in orthognathic surgery: CAD/ CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results-our experience in 16 cases. *J Craniomaxillofac Surg* 2012;40:162-8.
31. Xia J, Wang D, Samman N, et al: Computer-assisted threedimensional planning and simulation: 3D color facial model generation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 29:2, 2000
32. Zinser MJ, Mischkowski RA, Sailer HF, Zoller JE. Computer-assisted orthognathic surgery: feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2012;113: 673-687.
33. Cevidanes LH, Bailey U, Tucker GR, et al. Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol* 2005;34:369-75.
34. Ellis III E. Bimaxillary surgery using an intermediate splint to position the maxilla. *J Oral Maxillofac Surg* 1999;57:53-6.
35. Aboui-Hosn Centenero S, Hernandez-Aifaro F. 3D planning in orthognathic surgery: CAD/CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results-our experience in 16 cases. *Journal of oromaxillo-facial surgery*:

official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery. 2012; 40(2):162-8. Epub 2011

36. Maal TJJ, Plooij M, Rangel FA, et al: The accuracy of matching three-dimensional photographs with skin surfaces derived from cone-beam computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Surg* 37:641, 2008
37. Quevedo LA, Ruiz JV, Quevedo CA. Using a clinical protocol for orthognathic surgery and assessing a 3-dimensional virtual approach: current therapy. *J Oral Maxillofac Surg* 2011;69:623.
38. Schutyser F, Swennen G, Suetens P: Robust visualization of the dental occlusion by a double scan procedure: Lecture notes in computer science. *Med Imag Comp Assist Interven* 3749:368, 2005
39. Zinser MJ, Sailer HF, Ritter L, Braumann B, Maegele M, Ziller JE. A paradigm shift in orthognathic surgery?. A comparison of navigation, computer aided designed/computeraided manufactured splints, and 'classic' intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning. *J Oral Maxillofac Surg* 2013;71. 2151.e1-2151.e21.
40. Zinser MJ, Mischkowski RA, Sailer HF, Zoller JE. Computer-assisted orthognathic surgery: feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radial* 2012;113: 673-687.
41. Shehab MF, Barakat AA, AbdEighany K, Mostafa Y, Baur DA. A novel design of a computergenerated splint for vertical repositioning of the maxilla after Le Fort 1 osteotomy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radial Endod* 2013;115:e16-25
42. Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF, et al: Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 65:728, 2007
43. Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF, Christensen AM, Lemoine JJ, Liebschner MA, et al. Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 2007;65:728-34.
44. Bobek S, Farrell Br, Choi C, et al. Virtual surgical planning for orthognathic surgery using digital data transfer and an intraoral fiducial marker: the charlotte method. *J Oral Maxillofac Surg* 2015; 73(6):1143e58.
45. Xia J, Ip HH, Samman N, Wang D, Kot CS, Yeung RW, et al. Computer-assisted threedimensional surgical planning and simulation: 30 virtual osteotomy. *Int J Oral Maxillofacial Surg* 2000;29:11-7.

46. Smith JD, Thomas PM, Proffit WR. A comparison of current prediction imaging programs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004;125(5):527e36.
47. Moyers RE, Bookstein FL. The inappropriateness of conventional cephalometrics. *J Orthod* 1979;75(6):599e617.
48. Baumrind S, Franz RC. The reliability of head film measurements: landmark identification. *Am J Orthod* 1971;60(2):111e27.
49. Knoops PGM, Borghi A, Breakey RWF, et al. Three-dimensional soft tissue prediction in orthognathic surgery: a clinical comparison of Dolphin, ProPlan CMF, and probabilistic finite element modelling. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2019;48:511e8.
50. Gwilliam JR, Cunningham SJ, Hutton T. Reproducibility of soft tissue landmarks on three-dimensional facial scans. *Eur J Orthod* 2006;28:408e15.
51. Schendel S, Lane C. 3D orthognathic surgery simulation using image fusion. *Semin Orthod* 2009;15(1):48e56.
52. Schendel S, Jacobson R, Khalessi S. 3-Dimensional facial simulation in orthognathic surgery: is it accurate? *J Oral Maxillofac Surg* 2013; 71:1406e14.
53. Borba AM, da Silva EJ, da Silva ALF, et al. Accuracy of orthognathic surgical outcomes using 2- and 3-dimensional landmarks the case for apples and oranges? *J Oral Maxillofac Surg* 2018;76(8):1746e52.
54. Almukhtar A, Ju X, Khambay B, et al. Comparison of the accuracy of voxel based registration and surface based registration for 3D assessment of surgical change following orthognathic surgery. *PLoS One* 2014;9(4):e93402.
55. Ghoneima A, Cho H, Farouk K, et al. Accuracy and reliability of landmark-based, surface-based and voxel-based 3D cone-beam computed tomography superimposition methods. *Orthod Craniofac Res* 2017.
56. Kaban LB, Bouchard C, Troulis MJ. A protocol for management of temporomandibular joint ankylosis in children. *J Oral Maxillofac Surg* 2009;67(9):1966e78.
57. Zhang X, Chen M, Wu Y, et al. Management of temporomandibular joint ankylosis associated with mandibular asymmetry in infancy. *J Craniofac Surg* 2011;22(4):1316e9.
58. Matsuura H, Miyamoto H, Ogi N, et al. The effect of gap arthroplasty on temporomandibular joint ankylosis: an experimental study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2001;30(5):431e7.

59. Mercuri LG. Alloplastic temporomandibular joint replacement: rationale for the use of custom devices. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2012;41(9):1033e40.
60. Haq J, Patel N, Weimer K, et al. Single stage treatment of ankylosis of the temporomandibular joint using patient-specific total joint replacement and virtual surgical planning. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2014;52(4):350e5.
61. Perez DE, Garza R Jr. Computer-Assisted Design and Manufacturing in Combined Orthognathic and Temporomandibular Joint Surgery. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2020 Sep;28(2):83-93.
62. Malis DD, Xia JJ, Gateno J, et al. New protocol for 1-stage treatment of temporomandibular joint ankylosis using surgical navigation. *J Oral Maxillofac Surg* 2007;65(9):1843e8.
63. Hirsch DL, Garfein ES, Christensen AM, et al. Use of computer-aided design and computer-aided manufacturing to produce orthognathically ideal surgical outcomes: a paradigm shift in head and neck reconstruction. *J Oral Maxillofac Surg* 2009;67(10):2115e22.
64. Thakker JS, Pace M, Lowe I, et al. Virtual surgical planning in maxillofacial trauma. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin* 2019;27(2): 143e55.
65. Bui TG, Bell RB, Dierks EJ. Technological advances in the treatment of facial trauma. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North America* 2012;20(1):81e94.
66. Amundson M, Newman M, Cheng A, Khatib B, Cuddy K, Patel A. Three-Dimensional Computer-Assisted Surgical Planning, Manufacturing, Intraoperative Navigation, and Computed Tomography in Maxillofacial Trauma. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2020 Sep;28(2):119-127.
67. Levine JP, Patel A, Saadeh PB, et al. Computer-aided design and manufacturing in craniomaxillofacial surgery: the new state of the art. *J Craniofac Surg* 2012;23(1):288e93.
68. Voss PJ, Leow AM, Schulze D, et al. Navigation-guided resection with immediate functional reconstruction for high-grade malignant parotid tumour at skull base. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2009;38
69. Gregoire C, Adler D, Madey S, et al. Basosquamous carcinoma involving the anterior skull base: a neglected tumor treated using intraoperative navigation as a guide to achieve safe resection margins. *J Oral Maxillofac Surg* 2011;69
70. Harrison P, Patel A, Cheng A, Bell RB. Three-Dimensional Computer-Assisted Surgical Planning, Manufacturing, and Intraoperative Navigation in Oncologic Surgery. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2020 Sep;28(2):129-144

71. Weyh AM, Quimby A, Fernandes RP. Three-Dimensional Computer-Assisted Surgical Planning and Manufacturing in Complex Mandibular Reconstruction. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2020 Sep;28(2):145-150.
72. Bell RB, Weimer KA, Dierks EJ, et al. Computer planning and intraoperative navigation for palatomaxillary and mandibular reconstruction with fibular free flaps. *J Oral Maxillofac Surg* 2010; 69(3):724e32.