

**Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Computación**

Lecturas en Ciencias de la Computación
ISSN 1316-6239

**Planificación Preoperatoria Digital en
Traumatología**

Esmitt Ramírez

RT 2009-07

Centro de Computación Gráfica
Caracas, Abril, 2009

Planificación Preoperatoria Digital en Traumatología

Esmitt Ramírez Jacobo

Abril 2009

Resumen

En este documento se presenta un esquema para la planificación preoperatoria digital en el área de Traumatología. La planificación preoperatoria consta de una serie de procedimientos previos a una operación que el cirujano ortopedista debe realizar para garantizar la eficacia de la misma. Dichos procedimientos requieren de material adicional (papel, lápiz, regla, etc.) y una inversión de tiempo considerable para su realización. Una solución es emplear un sistema CAD de planificación preoperatoria para fracturas de huesos, tal que sea una simplificación en su elaboración. Se presenta entonces una explicación del proceso completo de planificación preoperatoria así como de una revisión bibliográfica sobre los trabajos realizados en este sentido, finalmente se propone un esquema que deben seguir los sistemas de planificación preoperatoria.

1. Introducción

Desde que Wilhelm Röntgen [28] descubriera la existencia de los Rayos-X en 1895, las imágenes médicas han tenido un gran avance dentro de la Medicina, dando origen a técnicas como: fluoroscopia, US (*Ultrasound* - Ultrasonido), CT (*Computed Tomography* - Tomografía Computarizada), MRI (*Magnetic Resonance Imaging* - Imagen por Resonancia Magnética) entre otras. Todas estas modalidades de imágenes constituyen una base fundamental para los diagnósticos médicos dentro de los sistemas de salud modernos a nivel mundial.

Los progresos en tecnología de tratamiento digital de imágenes están regidos en parte por la velocidad en la que avanzan los desarrollos e investigaciones en el área de la Computación. Los sistemas CAD (*Computer Aided Diagnosis* - Diseño Asistido por Computador) fueron surgiendo como herramientas de apoyo a los médicos en la toma de decisiones. Es indudable que el progreso de los sistemas CAD dentro del área médica viene dado en la misma proporción que exista ese progreso tecnológico dentro de la medicina.

Dentro de los sistemas CAD, existe una clasificación conocida como sistemas CAOS (*Computer Aided Orthopaedic Surgery* - Cirugía Ortopédica Asistida por Computador), los cuales permiten asistir al cirujano ortopédico en la planificación preoperatoria de cirugías del sistema muscoesquelético. La planificación preoperatoria es el primer paso en el manejo del paciente que va a ser sometido a una cirugía ortopédica, puesto que permite establecer la táctica quirúrgica en el procedimiento a realizar, siendo además una guía fidedigna para determinar el resultado final de la cirugía; sin embargo este procedimiento puede ser realizado de manera imprecisa y poco efectiva.

Solo algunos cirujanos ortopédicos llevan a cabo dichas planificaciones, por el requerimiento de material adicional y la inversión considerable de tiempo para su realización. Los sistemas CAOS son excelentes herramientas para que los médicos realicen dicha planificación en un tiempo más corto y una menor cantidad de materiales. Cada vez es más frecuente la presencia de estos sistemas en el campo de la medicina, particularmente existe un gran crecimiento en el área de Radiología [34].

En este documento, se explica en detalle los aspectos relacionado con la planificación preoperatoria presentando un esquema para los sistemas CAOS tal que realicen las planificaciones prequirúrgicas digitales de fracturas diafisarias. Al mismo tiempo, el esquema planteado permite el almacenamiento de la información obtenida para su posterior utilización con fines de consulta y creación de un historial de experiencias (i.e. casos clínicos documentados).

2. Planificación Preoperatoria

La planificación preoperatoria o planificación prequirúrgica es una disciplina sumamente importante que debe ser realizada por todos los cirujanos ortopédicos como requisito indispensable para llevar a cabo un determinado procedimiento quirúrgico con excelentes resultados.

El tiempo que el cirujano ortopeda dedique a efectuar una cuidadosa planificación preoperatoria tiene una importancia decisiva y a menudo determina el éxito o fracaso de una operación [22]

La planificación preoperatoria ortopédica, es un procedimiento indispensable que debe realizarse previo a la intervención quirúrgica y cuyos objetivos son: determinar el resultado final de la cirugía y establecer la táctica quirúrgica a seguir en el procedimiento quirúrgico [39]. Según los procedimientos sugeridos en [8] [21], la planificación preoperatoria para una cirugía plantea la realización de calcos preoperatorios, como se muestra en la Figura 1. Los calcos permiten entender la complejidad de la fractura, la forma de reducción de la misma, la aplicación del principio biomecánico y la elección del implante necesario.



Figura 1: (A)-Procedimiento para creación de un calco y (B)-el calco obtenido en la misma

En ciertos procedimientos quirúrgicos, la planificación preoperatoria es parte integral de una cirugía. En la cirugía para la colocación de una prótesis de cadera [47] [32], es importante conocer ciertos factores previos: tipo y tamaño de prótesis, posición y orientación correcta de los implantes, tamaño del acetábulo y del hueso; y así reducir el tiempo de la cirugía y obtener resultados satisfactorios.

Para tener éxito en el resultado final de la cirugía se deben de tomar en cuenta los factores iniciales del contacto médico-paciente, realizar una historia completa, examen físico detallado (incluyendo pruebas especiales), radiografías para la planificación de preferencia sin inmovilizadores que obstaculicen la visión adecuada [39], estudios especiales como CT, MRI, estudios de laboratorio completos, evaluación preoperatoria y la planificación preoperatoria.

2.1. Procedimiento para su realización

La planificación consiste en realizar un calco de los segmentos de fractura y del hueso, para así tener una guía correspondiente a la anatomía de la zona a tratar del paciente. De esta forma, el calco representa la herramienta de trabajo construida por el médico traumatólogo para el proceso de fijación de la fractura (i.e. reconstrucción del hueso). En una fractura, el equipo necesario para realizar las planificaciones se puede resumir en:

1. Radiografías adecuadas incluyendo el lado sano (opcional): El lado sano sirve para realizar comparaciones con respecto al lado fracturado, tomando en cuenta los factores de simetría del cuerpo humano.
2. Papel para calcos: Es un papel especial (semitransparente) donde se realizará la imagen de los trazos de una fractura.
3. Plantillas de los implantes: Conjunto de las posibles plantillas (*templates*) de implantes (tornillos, clavos, placas, etc.) que puede necesitar una fractura.
4. Goniómetro: Instrumento utilizado para medir valores angulares y rangos articulares. Existen múltiples tipos de goniómetros [55], entre los que destacan: goniómetros de dos brazos de eje común y un cuadrante dividido en grados, siendo frecuentemente el más utilizado, ver Figura 2; goniómetros que se basan en la indicación permanente de la vertical; goniómetros que utilizan la desviación magnética y goniómetros electrónicos.
5. Lápices o marcadores de colores: Para poder realizar el trazo del calco.
6. Negatoscopio con luz adecuada: Aparato constituido por una placa translúcida colocada delante de una fuente luminosa, utilizada para examinar las radiografías. Particularmente, donde serán realizados los calcos.

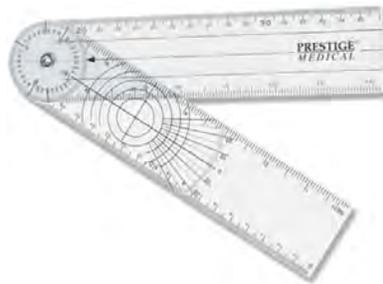


Figura 2: Goniómetro de dos brazos

La elección del procedimiento quirúrgico será determinada por las características de la fractura u osteotomía; hueso, región, tipo de trazo, desviaciones angulares, rotaciones, acortamientos, número de fragmentos, tamaño de los fragmentos y las condiciones de los tejidos blandos.

La selección del implante o dispositivo adecuado para la osteosíntesis deberá incluir el principio biomecánico, el abordaje quirúrgico, el tipo de dispositivo, sus dimensiones, tipo de bloqueo (si lo requiere), dimensiones de los tornillos, orden de colocación, etc. Para las fracturas diafisarias en las que esta indicada la fijación con un clavo intramedular bloqueado, se necesita una planificación gráfica preoperatoria poco detallada. Las variables que hay que determinar son [39]: la longitud y el diámetro del clavo intramedular, el rimado o no del canal endomedular y el tipo de bloqueo. La osteosíntesis con placa requiere una planificación más detallada, los puntos que deben considerarse son: la correcta

longitud, alineación y rotación del hueso, el tipo y longitud de la placa, el número de tornillos y su función específica (compresión interfragmentaria o a través de la placa). Por último, es importante destacar que la planificación preoperatoria de fracturas que comprometen las superficies articulares tiene mayor exigencias que la de fracturas diafisarias, puesto que requieren una reducción anatómica exacta.

En la estrategia quirúrgica el cirujano ortopeda deberá enumerar los pasos a seguir para el procedimiento con el fin de evitar distracciones y para el conocimiento del equipo quirúrgico. De esta forma dicho equipo estará mejor preparado para resolver los problemas que se puedan presentar. La estrategia quirúrgica debe estar en el calco de la planificación preoperatoria, como se observa en la Figura 3, y debe de contener los siguientes puntos:

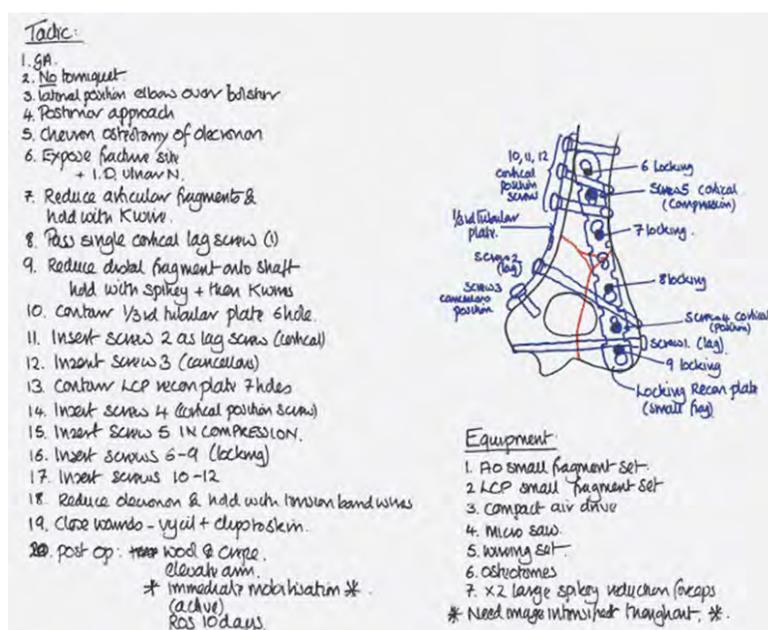


Figura 3: Calco de una fractura con la información completa antes de la cirugía

- **Paciente:** Nombre y apellido, edad, uso de torniquete, posición del paciente, uso de mesa radiolúcida.
- **Procedimiento:** Incluye lo referente al abordaje quirúrgico, principio biomecánico, tipo de reducción, implantes a emplear y uso de equipo especial para la colocación de los mismos.
- **Equipos Adicionales:** Radiografías transoperatorias, intensificador de imágenes, artroscopio, etc.
- **Cuidados Postoperatorios:** Uso de yesos, férulas, prótesis o vendajes en el postoperatorio inmediato.

Existen diversas técnicas de planificación prequirúrgica, entre las que se destacan:

Superposición directa: Utilizada en las planificaciones de fracturas diafisarias. Se realiza el calco de los fragmentos fracturados en una proyección antero-posterior (AP), cada uno en hojas separadas, en otra hoja se traza una línea recta (eje del hueso) y se coloca los fragmentos que son ensamblados para obtener el resultado final.

Superposición utilizando la imagen del lado sano: Se requiere de la radiografía del lado sano (indirecta) y se procede a realizar el calco del lado fracturado tomando en cuenta los fragmentos y rotaciones dibujándolas en otro color. Luego se realiza la colocación de los fragmentos dibujados en la radiografía del lado sano para hacerlos coincidir. Otra forma es realizar la colocación de los fragmentos y posteriormente superponerla a la radiografía del lado sano para evaluar la adecuada colocación de los fragmentos, una vez que se tenga la reducción de los mismos, se utilizan las plantillas de implantes y se completa el calco según la elección del cirujano ortopedista.

Superposición utilizando los ejes fisiológicos: Es una metodología aplicable a aquellas fracturas periarticulares, como es el caso de las fracturas supracondíleas de fémur. En una fractura distal de fémur se usa la plantilla para marcar los ejes anatómicos y mecánicos de fémur y tibia. Posterior a esto, se dibujan los fragmentos de la fractura y se superponen a la plantilla inicial, para hacer coincidir los ejes del fémur, tibia y lograr la alineación de la rodilla. Una vez colocados todos los fragmentos reducidos se procede a la colocación del implante.

Particularmente, en este documento trataremos el caso de la planificación preoperatoria empleando la técnica de superposición directa.

3. Sistemas CAD

El concepto del CAD es amplio y general como herramienta de asistencia a los radiólogos, proporcionando una “segunda opinión” provisto con el computador. Este aspecto [23], es la principal diferencia con los sistemas de Diagnóstico Automatizado por Computador (*Automated Computer Diagnosis*), los cuales son utilizados para diagnosticar cualquier condición de salud-enfermedad (lesión, síndrome, entidad nosológica, etc.). En un sistema CAD siempre el radiólogo tomará la decisión final.

Las investigaciones en el área del Diagnóstico Asistido por Computador se iniciaron en el año 1980 y han ido evolucionando gradualmente como una herramienta de apoyo clínico. En el área de mamografía [19], los sistemas CAD se han convertido en un procedimiento de rutina para la detección de cánceres de mama en muchos centros médicos. Un gran número de sistemas CAD en Estados Unidos y Europa [23], son utilizados para la detección temprana del cáncer de mama en las mamografías. Algunos sistemas CAD son utilizados para el registro de imágenes [9] (*image registration*), interacciones virtuales, visualización, simulación y entrenamiento.

Por ejemplo, para los casos de entrenamiento y prácticas educativas para estudiantes de medicina, se ofrece una herramienta que simula escenarios virtuales a los futuros cirujanos [36]. La necesidad de una simulación viene determinada por la complejidad de ciertas regiones del cuerpo humano, como la craneofacial o la región cardíaca. Es muy importante que estructuras vitales del cuerpo humano no sean dañadas durante una operación, lo cual puede lograrse con el uso de sistemas de este tipo.

En el 2002, Bourquain et al. [18] desarrollaron una aplicación (*Hepa Vision2*) para la planificación preoperatoria para los trasplantes y cirugías de hígado. *Hepa Vision2* es una herramienta que trabaja con imágenes en formato DICOM [1] (*Digital Imaging and Communication in Medicine*) siendo capaz de realizar una segmentación del hígado empleando el algoritmo *livewire* [13] de detección de bordes semiautomático. Además, realiza el cálculo del volumen del hígado y las venas hepáticas que permiten determinar los tumores. Esta versión del software trabaja sobre PC's basadas en *Windows* y provee un módulo de análisis de riesgo de operación en el paciente a tratar.

3.1. CAOS - Cirugía Ortopédica Asistida por Computador, *Computer Aided Orthopaedic Surgery*

Diversos softwares de apoyo al cirujano para la reducción de fracturas en extremidades inferiores son utilizados desde hace varios años [26] [59]. Los sistemas CAD de planificación preoperatoria de cirugías del sistema muscoesquelético, son conocidos como CAOS (*Computer Aided Orthopaedic Surgery*) los cuales son foco de investigación en diversas partes del mundo [15] [14] [24] [30]. Una gran parte de estos sistemas están destinados a garantizar que el cirujano sea capaz de conseguir la posición del implante que ha sido planificado previamente con un sistema CAOS [27] [46]. Esto implica que la planificación preoperatoria conseguida con éstas herramientas es más precisa y repetible que los métodos convencionales, como el uso de plantillas mostrado en la Figura 4. Las plantillas son implantes bases construidas por un fabricante bajo diversos materiales y con diferentes medidas, que sirven de guía exacta en la escogencia de los mismos para una reducción y fijación interna.

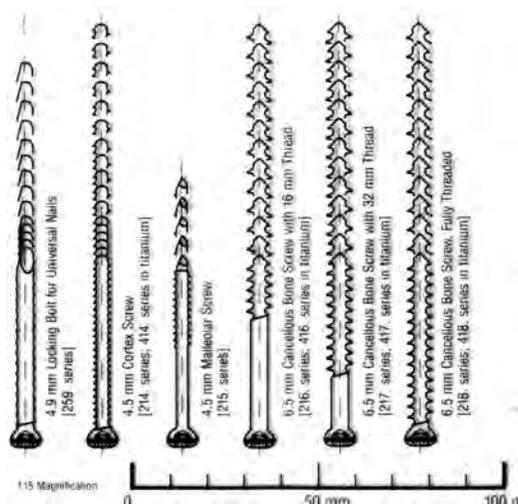


Figura 4: Plantilla (*template*) de clavos intramedulares

La interpretación de cualquier imagen médica es un gran problema, ya que no existe un algoritmo trivial el cual puede ser empleado dentro de sistemas automatizados que permita entender la información contenida dentro de una imagen. Particularmente, en el área de radiología, la detección automática de fracturas en imágenes de Rayos-X (RX) es un problema.

4. Antecedentes

Como vimos anteriormente, la elección del procedimiento quirúrgico viene determinado por las características de la fractura u osteotomía; hueso, región, tipo de trazo, desviaciones angulares, rotaciones, acortamientos, número de fragmentos, tamaño de los fragmentos y las condiciones de los tejidos blandos. Se debe crear un plan para la cirugía que incluya todos los pasos (ordenados) a realizar en el acto quirúrgico [38]. Los sistemas CAD son excelentes herramientas para que los médicos realicen diagnósticos más acertados en un tiempo más corto. Cada vez es más frecuente la presencia de estos sistemas en el campo de la medicina, y particularmente existe un gran crecimiento en el área de Radiología [23].

La literatura relacionada con sistemas CAD para fracturas es poca; pero existen trabajos relevantes centrados en la detección de osteoporosis y estimación de la edad de huesos. Uno de los trabajos de mayor aporte en el área de detección de fracturas en huesos largos fue el realizado por Tian et al. [40] en el 2003, los cuales desarrollaron un algoritmo para detectar las fracturas en el fémur y el radio. El

método descrito por Tian [40] detecta una fractura en el fémur al calcular el ángulo entre el eje del cuello del fémur y el eje del fémur, llamado ángulo NSA (Ángulo del Cervico Diafisiario - textitNeck-Shaft Angle), trabajando sobre imágenes de CT en formato DICOM. Esta medida del ángulo es realizada en tres etapas: la primera etapa consiste en la extracción del contorno del fémur, ver Figura 5, la segunda etapa se refiere al cálculo del ángulo NSA, y la tercera es la clasificación del ángulo obtenido. La extracción del contorno del fémur descrita por Tian, utiliza la detección de bordes propuesta por Canny [20], la transformada de Hough [45] y un modelo de Contornos Activos [29]. Las pruebas de este algoritmo mostradas en [57] muestran que detecta una fractura de fémur con una precisión del 61.5 %.

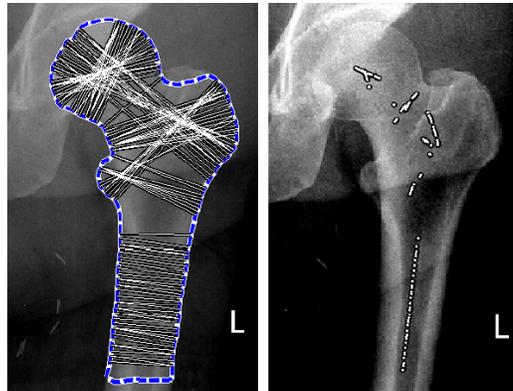


Figura 5: Líneas encontradas en la detección del contorno del fémur y líneas guías para determinar la línea central del fémur

En el 2004, Yap et al. [57] mejoran el método aplicado por Tian, también sobre imágenes de CT, incluyendo el análisis de la perturbación de los patrones presentes en la trabecular del cuello femoral. Igualmente, su método consiste en 3 etapas: la extracción del contorno del fémur, el análisis de la textura trabecular, y la clasificación de la fractura. Para la extracción del fémur en la imagen utilizaron un modelo de Contornos Activo (*snake*) con flujo del vector gradiente. Los resultados obtenidos en este trabajo arrojaron un 84.6 % de exactitud en la detección de fracturas.

Ambos métodos producen resultados aceptables; pero solo trabaja sobre fracturas localizadas en el cuello femoral y no puede ser adaptada para otros huesos. También requieren una participación por parte del médico como usuario, ya que debe colocar los puntos iniciales del Contorno Activo y realizarlo la cantidad de veces que sea necesario hasta lograr los resultados esperados.

Una mejora a estos métodos fue introducida por Lim et al. [48] en el 2004, donde se modifica el algoritmo de extracción del contorno propuesto por Tian incluyendo Campos Aleatorios de Markov (*MRF - Markov Random Fields*) e intensidad en la dirección del gradiente (*IGD - Intensity Gradient Direction*) al método existente del NSA y mapas de orientación Gabor (*GO - Gabor Orientation*) [41]. Además Lim et al. modificaron la clasificación planteada en [57], y consiguieron una detección de fracturas del 92.2 % de exactitud y 1 % de falsos positivos.

Los métodos explicados anteriormente trabajan con imágenes CT en formato DICOM obtenidas directamente desde los equipos radiológicos. Este aspecto resulta una ventaja ya que la adquisición de las imágenes se realiza en un solo paso, empleando la arquitectura existente (e.g. PACS [37] Sistema de Archivo y Transmisión de Imágenes - *Picture Archiving and Communication System*) en el centro hospitalario.

Al resultar la segmentación de huesos un aspecto muy ligado a la anatomía del mismo, existen métodos de clasificación que evalúan las características de la imagen de una fractura y la ubica en un tipo de fractura. Uno de éstos es el método planteado por Su et al. [25] los cuales utilizaron una red neuronal como sistema clasificatorio de fracturas.

Los sistemas CAD de planificación preoperatoria para fracturas fueron surgiendo como una opción donde la segmentación automática de los fragmentos de la fractura, es semi-automática o manual. En el 2001, Mihalko et al. [33] presentan un sistema CAD que permite medir la longitud del hueso antes y después de la colocación de un implante para así medir la deformación del mismo, siendo una herramienta preoperatoria y postoperatoria de una fractura.

En el 2002, Viceconti et al. [56] presentan un sistema de planificación preoperatoria para el reemplazo total de cadera donde se utilizan radiografías convencionales, lo cual permite ser aplicado a una amplia gama de casos de pacientes de un Centro Hospitalario. Basado en la idea de aplicar planificación sobre radiografías convencionales, salieron al mercado sistemas CAOS como NovaRAD [2], TraumaCAD [3] y Sectra OrthoStation Package [4], los cuales permiten realizar la planificación preoperatoria de forma digital y ofrecen una librería de implantes comerciales a utilizar.

Estos sistemas CAOS son sumamente costosos y se basan en la existencia de un PACS dentro del Centro Hospitalario, además de requerir la utilización de scanners digitales, tomógrafos, etc. como mecanismos de adquisición de imágenes. Los sistemas CAOS aquí mencionados, [2] [3] [4], poseen una librería de implantes donde el médico cirujano selecciona uno de éstos para ser colocados en la fractura en cuestión, tal como se muestra en la Figura 6 (implante en color verde). En muchas ocasiones, es necesario moldear el implante tal que sea anatómicamente correcto y se adapte a una sección del cuerpo. Esta deformación del implante se realiza previo a la operación, dentro del quirófano, aplicando una fuerza mecánica; pero dichos sistemas no lo aplican ya que presentan plantillas no deformables.

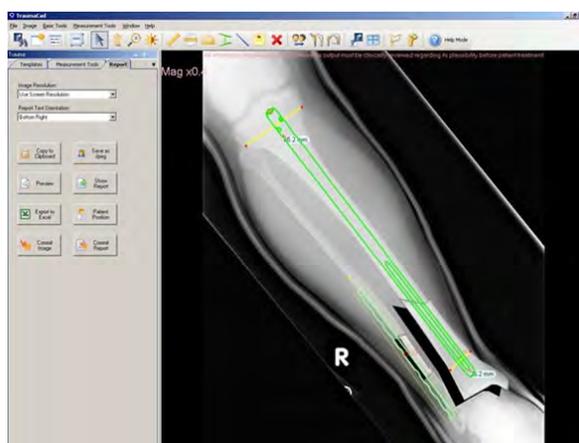


Figura 6: Colocación de un implante dentro de la aplicación TraumaCAD de OrthoCrat Ltd.

A continuación se presentará un esquema general para los sistemas CAOS en la realización de la planificación preoperatoria digital, incluyendo funcionalidades adicionales no existentes dentro de los sistemas mencionados anteriormente.

5. Esquema de planificación preoperatoria digital

En la Figura 7 se plantea un esquema general para los sistemas de planificación preoperatoria en el área de Traumatología. Dicho esquema se puede resumir en ocho grandes módulos constitutivos de la misma.

El sistema recibe como entrada una imagen correspondiente a una fractura de un paciente, la cual proviene de una placa radiográfica. Una vez adquirida la imagen se procede a un proceso de calibración, y de esta forma obtener medidas aproximadas de las proporciones dentro de la imagen (e.g. longitud del hueso). A la imagen calibrada se le aplican técnicas de mejoramiento como aumento del brillo,



Figura 7: Esquema general de la planificación preoperatoria digital en Ortopedia

contraste, etc. que ayuden a realizar la extracción de los fragmentos de una fractura por parte del traumatólogo. El traumatólogo una vez haya separado los fragmentos de huesos, efectúa el ensamblaje del hueso afectado como parte del procedimiento de planificación.

La fractura tratada puede requerir de un dispositivo externo (placa, tornillo, implante, etc.) para la reducción del hueso, dicho dispositivo será seleccionado desde un conjunto de templates asociados al tipo de fractura a tratar. Una vez colocado el dispositivo externo, el sistema permite al radiólogo aplicar deformaciones dependiendo de la anatomía de la reducción. Al finalizar los pasos antes mencionado, se obtiene el calco necesario para la cirugía. La generación de un reporte con los datos explicados en la Sección 2.1 son generados por el sistema, así como el almacenamiento de la planificación como parte de la historia clínica del paciente.

Cada uno de los pasos de la Figura 7 son explicados en detalle a continuación:

5.1. Adquisición de la imagen

La imagen es la base del sistema, y será el área de trabajo sobre la cual el médico traumatólogo realizará la planificación. La imagen será una radiografía por ser la modalidad sobre la cual se tratan las fracturas. Para la adquisición de la imagen se plantean dos posibles escenarios:

1. Empleando un sistema PACS: obtener la radiografía de la infraestructura de un PACS. Un PACS posee una integración [37] de dispositivos de captura de imágenes heterogéneas, empleando el estándar DICOM para el formato de las mismas. El formato DICOM tiene la capacidad de mostrar datos esenciales de los estudios realizados en un paciente (e.g. nombre del paciente, calibración del equipo empleado, entre otros).
2. Empleando una cámara digital: obtener la radiografía desde la captura de una placa convencional colocada sobre un equipo de contraste (i.e. negatoscopio, ver Figura 8). De esta forma, no es requerido una arquitectura PACS dentro del Centro Hospitalario por ser una técnica de adquisición

de bajo costo. Adicionalmente, permite planificar estudios realizados en equipos convencionales. Los problemas relacionados están vinculados con la calidad de la imagen capturada y la calibración de la misma.



Figura 8: Placa radiográfica colocada sobre un negatoscopio

En ambos escenarios es importante destacar que dichas imágenes serán la base para realizar la reconstrucción de las fracturas a través de los procedimientos traumatológicos correspondientes.

5.2. Calibración de la imagen

Una vez obtenida la imagen del paciente, empieza la fase de calibración de la imagen la cual permite realizar medidas cuantitativas dentro de la imagen. Estas medidas son siempre aproximadas y generalmente expresadas en milímetros. Para el traumatólogo es importante describir la orientación anatómica de la toma; dicha orientación puede ser antero-posterior o lateral. Al mismo tiempo indicar si la fractura observada se refiere al lado derecho o izquierdo de ciertas partes del cuerpo (e.g. fémur, radio, etc.).

Luego de identificada la sección del cuerpo y la orientación de la toma, el proceso de calibración requiere de un objeto guía, el cual debe estar presente en el momento de la adquisición de la imagen. El objeto guía debe tener una medida conocida, y servir de base para el cálculo de las proporciones de la fractura del hueso a estudiar. En la Figura 9 se muestra una calibración realizada empleando una esfera metálica de tamaño conocido (e.g. 24.5 mm de diámetro) y de esta forma determinar una proporción dentro de la imagen con respecto a la esfera.

Un aspecto a considerar es el factor de magnificación [16], el cual es inherente en el proceso de toma de los RX. La toma adquirida de un paciente podría aparecer en mayor proporción que la realidad. El factor de magnificación depende tanto de la distancia entre el punto focal del tubo de RX y la imagen de la placa, así como la distancia entre el cuerpo que será sometido al examen y el chasis-película, como se observa en la Figura 10. Si el paciente se coloca más cercano al punto focal del tubo de RX, el factor de magnificación es mayor y si se coloca en dirección del chasis-película se reduce el factor de magnificación. Dado que todos los pacientes son diferentes, se crean diferentes factores de aumento en las imágenes de RX.

5.3. Mejoramiento de la imagen

Una vez calibrada la imagen, el médico radiólogo puede tener la posibilidad de modificar parámetros de la imagen que permita mejorar la calidad visual de la misma. Los parámetros de calidad que pueden



Figura 9: Calibración empleando una esfera

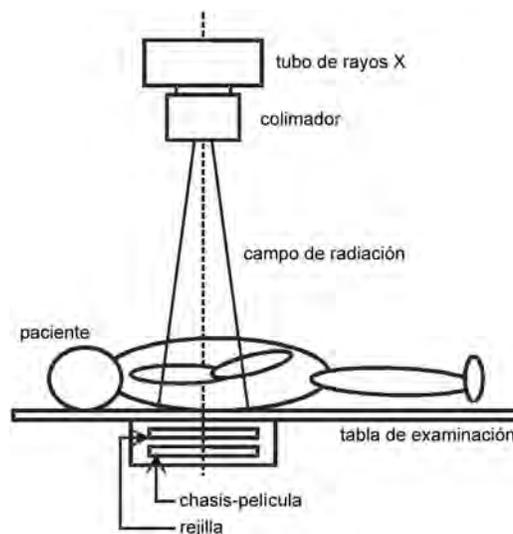


Figura 10: Esquema en un examen de Rayos-X

ser modificados son: brillo de la imagen, contraste, invertir los colores, entre otros. Otras operaciones que el traumatólogo puede efectuar son:

- Cortar la imagen; lo cual permite extraer una imagen de menor dimensión (subimagen) con el objetivo de eliminar de la imagen lo irrelevante para la planificación.
- Rotar la imagen; por las características de la adquisición de la imagen quizás sea necesario rotarla y obtenerla alineada con respecto a un eje cartesiano, facilitando su manipulación.
- Cambiar el radio aspecto; las proporción entre el ancho y el alto puede ser modificado para ajustar la imagen (aplicando escalamientos), y facilitar la planificación preoperatoria.

5.4. Segmentación y ensamblaje de la fractura

Para efectuar la reducción de una fractura se requiere extraer los fragmentos de hueso presente. Una vez los fragmentos seleccionados, el traumatólogo debe ensamblarlos y colocarlos en sus posiciones correctas y completar la reducción de la fractura.

La selección de los fragmentos de la fractura en la imagen, requiere un proceso de segmentación [49] donde se separen dichos fragmentos del hueso a tratar. Los algoritmos existentes para la segmentación automática de imágenes de RX no son triviales ya que no existe un procedimiento estándar para su ejecución. En la literatura existen diversas técnicas para la segmentación de imágenes médicas [44] [35] [12] entre las que destacan: los modelos deformables [29] [11] [10], las plantillas deformables paramétricas [7], los modelos de distribución de puntos [54] [53], las plantillas gráficas [58], las plantillas basadas en esqueletos [51] [50], entre otras técnicas. Dichas técnicas no son 100 % efectivas para todas las imágenes. Para conseguir una segmentación adecuada por lo general se emplean varias de éstas técnicas y/o se aplican modificaciones acorde a la imagen en cuestión.

Otra forma de extracción de fragmentos es emplear la segmentación manual, la cual consiste en delinear los bordes de los fragmentos e ir construyendo un polígono que encierre el fragmento de hueso, como se observa en la Figura 11.

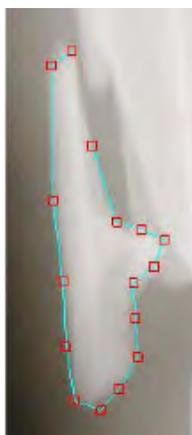


Figura 11: Fragmento de hueso de una fractura extraído manualmente

Se observa una serie de puntos guía (en color rojo) sobre el contorno del fragmento unidos por una línea formando un polígono irregular. El próximo paso es colocar dicho fragmento en su posición anatómicamente correcta para realizar la reducción por parte del radiólogo.

5.4.1. Medidas y anotaciones

Una vez calibrada la imagen, ver Sección 5.2, es posible realizar mediciones de la anatomía en una la imagen empleando diversas herramientas. Las mediciones dentro de una imagen de RX son importantes para el tratamiento de un paciente, ya que permite obtener las dimensiones de los segmentos de una fractura, la longitud de los huesos, un ángulo entre dos secciones (e.g. huesos de la cadera), entre otros. Generalmente las medidas realizadas son en mm. o en la escala definida en la etapa de calibración.

Algunas de las herramientas de calibración se observan en la Figura 12 y se explican a continuación:

Inter-línea: Permite medir el ángulo existente entre dos líneas en una imagen. Esta herramienta es muy útil cuando se está trabajando con ángulos pequeños dentro de la imagen

Ángulo: Permite medir ángulo dentro de la imagen, basado en un punto origen y dos líneas que parten desde ese origen

Regla: Con esta herramienta se puede medir regiones de la imagen empleando una línea para dicha labor

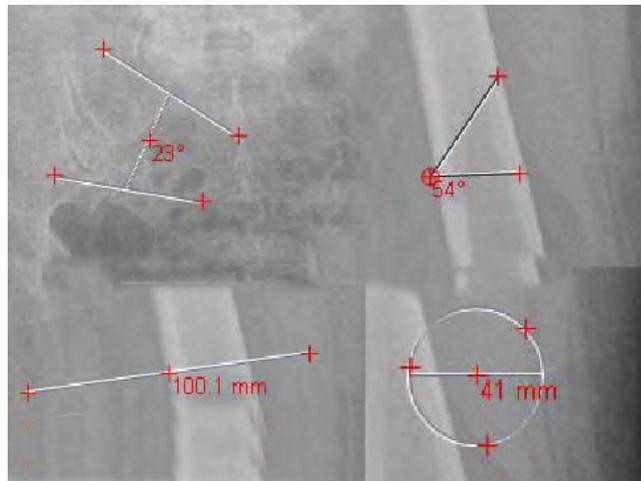


Figura 12: Medidas realizadas en la imagen: inter-línea, ángulo, regla, círculo

Círculo: Permite realizar un círculo definido por un centro y un diámetro, la medida indicada por la misma viene dada por el valor del diámetro

Si la imagen no se encuentra calibrada, el valor de la medida realizada será en píxeles.

Una funcionalidad sumamente útil dentro de la planificación de una operación son las anotaciones. Las anotaciones permite colocar información de interés dentro de la imagen (placa RX) en formato de texto. Las notas colocadas dentro de la planificación son libres a juicio del médico radiólogo.

5.5. Colocación del implante

Al tener ya los segmentos de hueso de la fractura seleccionados y haber aplicado la reducción de la misma, queda a decisión del traumatólogo la colocación de implantes (*template*) para realizar una fijación del hueso como parte del tratamiento quirúrgico. Dependiendo del tipo de fractura (ver Sección 5.6.1), posición anatómica, edad del paciente, entre otros, se procede a seleccionar el adecuado de una librería de implantes (ver Sección 5.6.2).

Un hueso fracturado debe ser cuidadosamente colocado (fijación) en la posición adecuada hasta que sea lo suficientemente fuerte como para soportar el peso. Hasta el siglo pasado [5], los médicos se basaron en emplear solamente yesos y férulas para apoyar el hueso por fuera del cuerpo (fijación externa). Pero el desarrollo en el campo de la cirugía redujo el riesgo de infección, permitiendo que los médicos puedan trabajar directamente con el hueso y colocar implantes (fijación interna).

Nuevos materiales tales como acero inoxidable, cobalto y titanio no son solo duraderos, sino que también lo suficientemente fuertes y flexibles para apoyar el hueso. Estos materiales también son compatibles con el cuerpo y rara vez causan una reacción alérgica en el paciente. Los tipos más comunes de la fijación son: los alambres, placas, barras, clavijas, pines, clavos y tornillos.

5.6. Deformación del implante

Como vimos anteriormente, los sistemas CAOS deben proveer una librería de implantes donde el médico cirujano seleccione uno de éstos para ser colocados en la fractura en cuestión. En muchas ocasiones, es necesario moldear (deformar) el implante tal que sea anatómicamente correcto y se adapte a una sección del cuerpo, particularmente al hueso fracturado. Esta deformación del implante se realiza previo a la operación aplicando una fuerza mecánica.

Partiendo del hecho que el implante es una imagen digital, Beier y Neely [52] propusieron una técnica para la metamorfosis de una imagen digital a otra basada en vectores característicos. Esta técnica fue empleada para efectos visuales de transiciones en animaciones; pero es extensible para cualquier propósito de deformación de imágenes.

En el 2003, Birkholz y Jackèl [17] presentan una solución para la deformación (*warping*) de imágenes digitales, basándose en el trabajo de Beier y Neely pero empleando curvas para la manipulación y guía del *warping*. En dicho trabajo se presenta una forma natural de hacer deformaciones sobre las imágenes, como se muestra en la Figura 13.

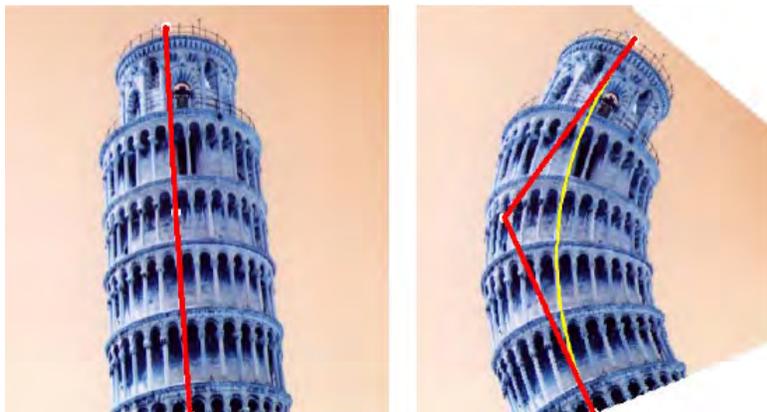


Figura 13: *Warping* desarrollado por Birkholz y Jackèl [17]

Sobre la imagen se identifican los puntos de control de la curva tal como se muestra en la Figura 13, formando la línea de color rojo. Dichos puntos de control son modificados por el usuario para construir la curva en color amarillo. Esta curva representa la guía para la deformación de la imagen en cuestión. De esta forma, tomando los implantes como una imagen digital, es posible efectuar una deformación de los mismos.

5.6.1. Biblioteca de clasificación AO²

Una vez confirmada la fractura de un paciente es localizada y clasificada de acuerdo a un esquema establecido. El esquema de clasificación de una fractura está especificada de acuerdo a su ubicación anatómica. Algunas de las más comunes son: La clasificación AO² [5], la clasificación Salter-Harris [43] y la clasificación de fracturas abiertas de Gustilo [42].

En el esquema internacional de clasificación de fracturas AO², el médico traumatólogo clasifica una fractura de acuerdo a la ubicación de la misma y sus características morfológicas. AO² plantea una clasificación basada en dos números: el primero indica una ubicación en el cuerpo (1-húmero, 2-cúbito y radio, 3-fémur y 4-tibia y peroné) y el segundo, el segmento dentro del hueso (1-proximal, 2-diafisal, 3-distal). Una vez seleccionado ambos números, entra en una clasificación por tipo de fractura (A-simple, B-en cuña, C-compleja). Luego, la fractura es dividida en tres grupos que miden la escala de severidad de la misma (1,2,3). En la Figura 14 se muestra la clasificación AO² para el fémur en segmento diafisal.

Esta clasificación es utilizada como una guía para el pronóstico y eficiencia en el tratamiento de una fractura. El esquema AO² es recomendado internacionalmente porque es clínicamente relevante, sencillo, reproducible y provee una buena estimación del resultado clínico [31]. Tener una biblioteca de referencia de dicha clasificación ayudará considerablemente al médico radiólogo para que en cualquier momento pueda consultarla para una determinada fractura. En los pasos de Colocación del implante (Sección 5.5) y Deformación del implante (Sección 5.6) es posible acceder a una biblioteca de clasificación AO²

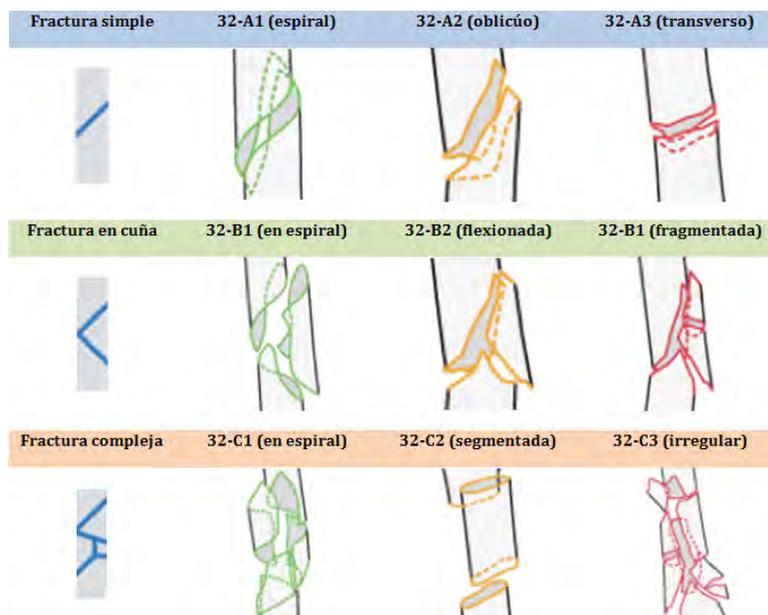


Figura 14: Clasificación AO² para una fractura tipo 32

y a una librería de implantes.

5.6.2. Librería de implantes

Una librería de implantes es un conjunto de plantillas (*templates*, ver Figura 4) de traumatología clasificadas bajo algún criterio. De esta forma, se escoge el tipo de implante (e.g. clavo, placa, etc.), las dimensiones (e.g. 12mm, 3.5 mm, etc.), el fabricante y el material. El proceso de seleccionar un implante (ver Sección 5.5) de la librería es un proceso sencillo que depende del médico traumatólogo. La decisión sobre cual implante colocar para una fractura tal que se obtenga una cirugía efectiva, es arbitraje del médico.

La librería de implantes es un conjunto de imágenes organizadas bajo cierta estructura que permitan su rápido acceso. Una base de datos es una forma de almacenamiento recomendada para colocar la gran cantidad de implantes requeridos para los sistemas CAOS de planificación preoperatoria.

5.7. Obtención del calco

Al realizar el proceso de colocación de los implantes requeridos para un paciente, se obtiene una imagen que muestra la fractura en cuestión, los implantes, anotaciones y medidas. Esta imagen es esencial para la generación del reporte a generar, ver Sección 5.8, ya que constituye la base de la misma.

El calco generado, debe mostrar claramente la posición del implante ya que esta es una guía para una cirugía. En la Figura 15 se muestra un calco donde el color de fondo correspondiente a unos RX es blanco. El propósito es obtener un formato de impresión adecuado cuando se vaya a hacer la generación del reporte. Una vez generado el reporte, ya se encuentra en formato digital permitiendo su impresión, envío por e-mail, almacenamiento en el sistema PACS, etc.

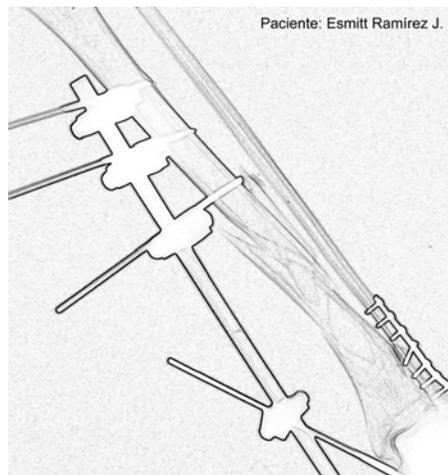


Figura 15: Calco en formato de impresión

5.8. Generación de reporte

Un reporte consiste de una imagen seleccionada que incluye implantes, medidas e información que describe al paciente, los procedimientos quirúrgicos que ayudarán al médico cirujano en la cirugía. El texto que aparece en un reporte, se encuentra por encima de la imagen o en una caja de texto (*textbox*), y los implantes a utilizar se deben mostrar claramente.

La creación de un reporte de la planificación permitirá tener un resumen de todo el trabajo realizado en el sistema CAOS de planificación preoperatoria. Los reportes contribuyen a desarrollar la Telemedicina [6], la cual consiste en la prestación de servicios de medicina a distancia, particularmente para el diagnóstico.

6. Conclusiones

Planificar los pasos antes de una cirugía es de vital importancia para garantizar la eficacia de los procedimientos quirúrgicos en el quirófano. Los pasos a ejecutar para su realización son un trabajo extra lo cual implica inversión de tiempo de parte del médico. La existencia de sistemas CAOS de planificación preoperatoria permiten reducir considerablemente ese tiempo, además de proveer todas las ventajas que proporciona tener esa información en formato digital. El esquema presentado aquí permite tener una estructura sólida en el diseño de estos sistemas. Los procesos de calibración, siempre serán aproximaciones (al realizar las mediciones posteriores) ya que al trabajar con imágenes digitales, aunado al proceso de adquisición de la imagen, existe una pérdida de información. La inclusión de la librería de implantes y su deformación permite simular el procedimiento dentro del quirófano realizado por el cirujano y su equipo. Adicionalmente, proveer una biblioteca de clasificación de fracturas (e.g. AO²) permite tener disponible una guía de referencia en todo momento. A medida que existan nuevos requerimientos en el área médica, seguirán surgiendo aplicaciones que faciliten y contribuyan a mejores diagnósticos así como inversión en costos, tanto como al paciente y al médico.

Referencias

- [1] DICOM, Digital Imaging and Communications in Medicine. <http://dicom.nema.org/>.
- [2] NovaRAD. <http://www.novapacs.com/>.

- [3] TraumaCAD. <http://www.orthocrat.com/>.
- [4] Sectra Pre-operative Planning Solution. <http://www.sectra.com/medical/ortho/>.
- [5] AO Foundation. <http://www.aofoundation.org>.
- [6] A., Mehta: *The Internet for Radiology Practice*. Springer-Verlag, spanish1st edición, 2002.
- [7] A.L., Yuille, Hallinan P.W. y Cohen D.S.: *Feature extraction from faces using deformable templates*. International Journal of Computer Vision, 8:99–111, 1992.
- [8] B., Holdsworth: *Planning in fracture surgery*. Bunker TD, Londres, UK, 2002.
- [9] B., Zitová y Flusser J.: *Image registration methods: a survey*. Image and Vision Computing, 21:977–1000, 2003.
- [10] D., Terzopoulos, Witkin A. y Kass M.: *Constraints on deformable models: recovering 3D shape and nonrigid motion*. Artificial Intelligence, 36:91–123, 1988.
- [11] D., Terzopoulos, Platt J., Barr A. y Fleischer K.: *Elastically deformable models*. Computer Graphics, 21(4):205–214, 1987.
- [12] D.L., Pham, Xu C. y Prince J.L.: *A Survey of Current Methods In Medical Image Segmentation*. Informe técnico, Johns Hopkins University, Baltimore, Enero 1998.
- [13] E.N., Mortensen y Barrett W.A.: *Intelligent scissors for image composition*. En *SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, páginas 191–198, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [14] F., Langlotz, Bächler R., Berlemann U., Nolte L.-P. y Ganz R.: *Computer assistance for pelvic osteotomies*. Clinical orthopaedics and related research, 354:92–102, 1998.
- [15] G., Brandt, Zimolong A., Carrat L., Merloz P., Staudte H.-W., Lavallée S., Radermacher K. y Rau G.: *CRIGOS: a compact robot for image-guided orthopedic surgery*. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 3(4):252–260, Junio 1999.
- [16] G., Webster John: *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*, volumen 6. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, spanish2nd edición, 2006.
- [17] H., Birkholz y Jackèl D.: *Image warping with feature curves*. En *SCCG '03: Proceedings of the 19th spring conference on Computer graphics*, páginas 199–202, New York, NY, USA, 2003. ACM, ISBN 1-58113-861-X.
- [18] H., Bourquain, Schenk A., Link F., Preim B., Prause G. y Peitgen H.-O.: *HepaVision2-A software assistant for preoperative planning in living-related liver transplantation and oncologic liver surgery*. En *CARS*, páginas 341–346, 2002.
- [19] H.K., Huang y Doi K.: *Computer-aided diagnosis (CAD) and image-guided decision support*. Computerized Medical Imaging and Graphics, 31:195–197, 2007.
- [20] J., Canny: *A computational approach to edge detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698, 1986, ISSN 0162-8828.
- [21] J., Mast, Jakob R. y Ganz R: *Planning and Reduction Technique in Fracture Surgery*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania, 1989.

- [22] J., Schatzker: *Tratamiento Quirúrgico de las fracturas*. Panamericana, Buenos Aires, Argentina, 1998.
- [23] K., Doi: *Computer-aided diagnosis in medical imaging: Historical review, current status and future potential*. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 31(4–5):198–211, 2007.
- [24] K., Radermacher, Porthoine F., Anton M., Zimolong A., Kaspers G., Rau G. y Staudte HW: *Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates*. *Clinical orthopaedics and related research*, (354):28–38, Septiembre 1998.
- [25] L., Su, Sharp B. y Davis D.: *Neural Networks for X-ray image segmentation*. En *Proceedings of First International Conference on Enterprise Information System*, páginas 264–271, Setubal, Portugal, March 1999. ISBN 972-98050-0-8. <http://www.cs.kent.ac.uk/pubs/1999/2312>.
- [26] L., Tockus, Joskowicz L., Simkin A. y Milgrom C.: *Computer-Aided Image-Guided Bone Fracture Surgery: Modeling, Visualization, and Preoperative Planning*. En *MICCAI '98: Proceedings of the First International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, páginas 29–38, Londres, Reino Unido, 1998. Springer-Verlag, ISBN 3-540-65136-5.
- [27] M., DiGioia, Jaramaz B., Blackwell M., Simon D.A., Morgan F., Moody J.E., Nikou C., Colgan B.D., Aston C.A., Labarca R.S., Kischell E. y Kanade T.: *Image guided navigation system to measure intraoperatively acetabular implant alignment*. *Clinical orthopaedics and related research*, 355:8–22, 1998.
- [28] M, Hollins: *Medical physics*. Nelson Thornes, Basingstoke, Inglaterra, 1990.
- [29] M., Kass, Witkin A. y Terzopoulos D.: *Snakes: Active contour models*. *International Journal of Computer Vision*, V1(4):321–331, Enero 1988. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00133570>.
- [30] M., Martelli, Marcacci M., Nofrini L., La Palombara F., Malvisi A., Iacono F., Vendruscolo P. y Pierantoni M.: *Computer and Robot Assisted Total Knee Replacement: Analysis of a New Surgical Procedure*. *Annals of Biomedical Engineering*, 28(9):1146–1153, Septiembre 2000.
- [31] M.E., Muller, Nazarian S., Kocj P. y Schatzker J.: *The comprehensive classification of fractures of long bones*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania, 1990.
- [32] M.G., Benedetti, Montanari E., Catani F., Vicenzi G. y Leardini A.: *Pre-operative planning and gait analysis of total hip replacement following hip fusion*. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 70(3):215–221, 2003.
- [33] Mihalko, W. M. y A. K. Kenneth: *Preoperative Planning for Lower Extremity Osteotomies*. *The Journal of Arthroplasty*, 16(3):322–329, 2001.
- [34] M.L., Giger: *Computer-aided Diagnosis in Medical Imaging - A New Era in Image Interpretation*. Informe técnico, The College University of Chicago, Chicago, Enero 2000.
- [35] N.R., Pal y Pal S.K.: *A Review on Image Segmentation Techniques*. *Pattern Recognition*, 26(9):1277–1294, 1993.
- [36] P., Blyth, Anderson I.A. y Stott N.S.: *Virtual reality simulators in orthopedic surgery : What do the surgeons think?* *The Journal of surgical research*, 131(1):133–137, 2006.
- [37] P., Inchingolo: *Picture Archiving and Communications Systems in Today's Healthcare*. *The World Medical Journal*, páginas 93–97, 2000.

- [38] P., Rüedi T., Buckley R. E. y Moran C.: *AO Principles of Fracture Management*. <http://www.aopublishing.org/>.
- [39] P., Rüedi T. y William M. M.: *Principios de la AO en el tratamiento de las Fracturas*. Masson, Barcelona, España, 2003.
- [40] P., Tian T., Chen Y., Leow W. K., Hsu W., Howe T. S. y Png M. A.: *Computer Analysis of Images and Patterns*, páginas 82–89. Springer Berlin / Heidelberg, 2003.
- [41] R., Akdeniz y Yarman A.: *A novel method to represent speech signals*. Signal Processing, 85(1):37–50, 2005, ISSN 0165-1684.
- [42] R., Gustilo y Anderson J.: *Prevention of infection in the treatment of one thousand and twenty-five open fractures of long bones: retrospective and prospective analyses*. Journal of Bone and Joint Surgery, 58:453–458, 1976.
- [43] R., Salter y Harris W.: *Injuries involving the epiphyseal plate*. Journal of Bone and Joint Surgery, 45:587–632, 1963.
- [44] R.M., Haralick y Shapiro L.G.: *Image Segmentation Techniques*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 29(1):100–132, 1985.
- [45] R.O., Duda y Hart P.E.: *Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures*. Communications of the ACM, 15(1):11–15, 1972, ISSN 0001-0782.
- [46] R.V., O’Toole, Jaramaz B., Di Gioia A.M., Visnic C.D. y Reid R.H.: *Biomechanics For Preoperative Planning And Surgical Simulations In Orthopaedics*. Computers in Biology and Medicine, 25(1):183–191, 1995.
- [47] S., Eggli, Pisan M. y Muller M.E.: *The value of preoperative planning for total hip arthroplasty*. The Journal of Bone & Joint Surgery (Br), 9:382–390, 1998.
- [48] S.E., Lim, Xing Y., Chen Y., Leow W.K., Howe T.S. y Png M.A.: *Detection of femur and radius fractures in X-ray images*. En *Proceedings on 2nd Interantional Conference on Advances in Medical Signal and Information Processing*, 2004.
- [49] S.E., Umbaugh: *Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing*. Taylor & Francis, 2005.
- [50] S.M., Pizer, Fritsch D., Yushkevich P.A., Johnson V.E. y Chaney E.L.: *Segmentation, registration and measurement of shape variation via image object shape*. En *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Oct 1999.
- [51] S.M., Pizer, Eberly D.H., Morse B.S. y Fritsch D.S.: *Zoom invariant vision of figural shape: The mathematics of cores*. Computer Vision Image Understanding, páginas 55–71, 1998.
- [52] T., Beier y Neely S.: *Feature-based image metamorphosis*. En *SIGGRAPH ’92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, páginas 35–42, New York, NY, USA, 1992. ACM, ISBN 0-89791-479-1.
- [53] T., Cootes, Hill A., Taylor C.J. y Haslam J.: *Use of active shape models for locating structures in medical images*. Image Vision Computing, 12:355–365, 1994.

- [54] T., Cootes y Taylor C.J.: *Statistical models of appearance for computer vision*. Draft Report, <http://www.wiau.man.ac.uk>, 1999.
- [55] T., Navarro: *Generalidades de la valoración Fisioterapica y Ortopédica*. <http://www.efisioterapia.net/articulos/accesible.php?id=267>.
- [56] Viceconti, M., R. Lattanzi, B. Antonietti, S. Paderni, R. Olmi, A. Sudanese y A Toni: *CT-based surgical planning software improves the accuracy of total hip replacement preoperative planning*. *Medical Engineering & Physics*, 25(5):371–377, 2003.
- [57] W-H., Yap D., Chen Y., Leow W.K., Howe T.S. y Png M.A.: *Detecting Femur Fractures by Texture Analysis of Trabeculae*. *International Conference on Pattern Recognition*, 3:730–733, 2004, ISSN 1051-4651.
- [58] Y., Amit y Kong A.: *Graphical template for model registration*. En *Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volumen 18, 1996.
- [59] Y., Nakajima, Tashiro T., Okada T., Sato Y., Sugano N., Saito M., Yonenobu K., Yoshikawa H., Ochi T. y Tamura S.: *Computer-assisted fracture reduction of proximal femur using preoperative CT data and intraoperative fluoroscopic images*. *International Congress Series*, 1268:620–625, Junio 2004.