



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

La imagen por resonancia magnética (MRI) es una técnica de imagen médica que permite obtener imágenes del interior de los pacientes de forma no invasiva por medio de radiación no ionizante. Esta técnica adquiere imágenes del cuerpo humano completo con una alta resolución y contraste en los tejidos blandos, proporcionando información anatómica y funcional. El principio básico de este método es la absorción de radiación electromagnética por un núcleo con momento magnético no nulo sometido a un intenso campo magnético. Pese a los beneficios que presenta la MRI frente a otras de imagen médica, todavía existe un gran desconocimiento por parte de la población.

Por tanto, con el objetivo de disminuir el miedo producido por el desconocimiento, este Trabajo de Fin de Máster pretende planificar un taller didáctico orientado para niños de entre 9 y 12 años que abarque los principios de la resonancia magnética (magnetismo, funcionamiento...).

El taller constará de diferentes bloques para poder explicar de manera clara, amena y concisa los conceptos básicos del magnetismo y la resonancia magnética. En primer lugar, una sección teórica, que consta de una serie de videos cortos que detallan los conceptos físicos básicos. Este bloque se apoyará en una segunda sección conformada por experimentos y juegos adaptados a la edad de los niños, para que puedan asimilar la información de una manera práctica, dentro del marco de la educación STEM. Este término, que proviene del inglés *Science, Technology, Engineering and Maths*, se refiere a un tipo de educación que integra diferentes disciplinas, como son las matemáticas, la ingeniería y la ciencia, con el objetivo de sustituir la memoria y el aprendizaje pasivo por la propia experiencia práctica.

Por otro lado, se adquirirán imágenes de resonancia magnética de diferentes frutas y verduras (alcachofa, aguacate, naranja...). A partir de ahí, se utilizarán ciertas herramientas *software*, como Matlab, Mango o Meshlab, con el objetivo de realizar su posterior reconstrucción, segmentación y procesamiento. De esta manera, los niños podrán observar las imágenes obtenidas a color, así como videos representativos del avance de los cortes. Por último, se realizará la impresión 3D de alguna de dichas piezas de fruta.

Con todo ello, se habrá logrado introducir a los niños en el campo de la ingeniería biomédica y la resonancia magnética por medio de la educación STEM. Se consigue, además, no solo fomentar la creatividad y las ganas de aprendizaje, sino también reducir el posible miedo o respeto que ejerzan las técnicas de imagen médica en un conjunto de personas no especializadas.

PALABRAS CLAVE

Resonancia magnética, MRI, educación, STEM, taller didáctico

RESUM

La imatge per ressonància magnètica (MRI) és una tècnica d'imatge mèdica que permet obtenir imatges de l'interior dels pacients de forma no invasiva per mig de la radiació no ionitzant. Aquesta obté imatges del cos humà complet amb una alta resolució i contrast en els teixits suaus, proporcionant informació anatòmica i funcional. El principi bàsic d'aquest mètode és l'absorció de radiació electromagnètica per un nucli amb moment magnètic no nul sotmet a un intens camp magnètic. A pesar dels beneficis que presenta la IRM enfront d'altres imatges mèdiques, encara existeix un gran desconeixement per part de la població.

Per tant, amb l'objectiu de disminuir el por produït per l'ignorància, aquest Treball de Fi de Màster pretén planificar un taller didàctic orientat a xiquets d'entre 9 i 12 anys que cobrisca els principis de la ressonància magnètica (magnetisme, funcionament...).

El taller constarà de diferents blocs per poder explicar de manera clara, amena i concisa els conceptes bàsics del magnetisme i la ressonància magnètica. En primer lloc, una secció teòrica, que consta d'una sèrie de vídeos curts que detallen els conceptes físics bàsics. Aquest bloc es recolzarà en una segona secció conformada per experiments i jocs adaptats a l'edat dels xiquets, perquè puguin assimilar la informació d'una manera pràctica, dins del marc de l'educació STEM. Aquest terme, que prové de l'anglès *Science, Technology, Engineering and Maths*, es refereix a un tipus d'educació que integra diferents disciplines, com són les matemàtiques, l'enginyeria i la ciència, amb l'objectiu de substituir la memòria i l'aprenentatge passiu per la pròpia experiència pràctica.

Per altra banda, s'adquiriran imatges de ressonància magnètica de diferents fruites i verdures (carxofa, avocats, taronja ...). A partir d'aquí, es faran servir diferents ferramentes de *software* com Matlab, Mango o Meshlab amb l'objectiu de realitzar la seua posterior reconstrucció, segmentació i processament. D'aquesta manera, els xiquets podran observar les imatges obtingudes a color, així com vídeos representatius de l'avanç dels talls. Per últim, es realitzarà la impressió 3D d'alguna de les peces de fruita.

D'aquesta manera, es aconsegueix introduir als xiquets en el camp de l'enginyeria biomèdica i la ressonància magnètica per mig de l'educació STEM. Es permet, per tant, a més de fomentar la creativitat i les ganes d'aprenentatge, reduir el possible por o respecte que exerceixen les tècniques d'imatge mèdica en un conjunt de persones no especialitzades.

PARAULES CLAU

Ressonància magnètica, MRI, educació, STEM, taller didàctic

ABSTRACT

Magnetic resonance imaging (MRI) is a medical imaging technique that allow us to obtain images of the patient's interior in a non-invasive way and using non-ionizing radiation. This technique obtains images of the entire human body with high resolution and with the highest soft tissue contrast of other medical imaging techniques currently available, providing anatomical and functional information. The basic principle of this method is the absorption of electromagnetic radiation by a nucleus with a non-zero magnetic moment subjected to an intense magnetic field. Despite the benefits of MRI versus other medical imaging, it is still highly unknown to a large number of people.

Therefore, in order to reduce the fear caused by ignorance, this Master's Final Project aims to plan a didactic workshop made for children between 9 and 12 years, that encompass the principles of magnetic resonance imaging (magnetism, functioning ...).

The workshop will consist of different blocks in order to explain in a clear, amusing and concise way the basic concepts of magnetism and magnetic resonance. First, a theoretical section, consisting of a series of short videos that detail the basic physical concepts. This block will be supported by a second section made up of experiments and games adapted to the age of the children, so that they can assimilate the information in a practical way, within the framework of STEM education. This term, which comes from Science, Technology, Engineering and Maths, refers to a type of education that integrates all those disciplines with the aim of replacing memory and passive learning by own practical experiences.

On the other hand, magnetic resonance imaging of different fruits and vegetables (artichoke, avocado, orange ...) will be acquired. From there, different software tools such as Matlab, Mango or Meshlab will be used to carry out their subsequent reconstruction, segmentation and processing. In this way, the children will be able to observe the images obtained in colour, as well as representative videos of the cuts progress. Finally, 3D printing of any of these pieces of fruit will be made.

Finally, children will have been introduced in the field of biomedical engineering and magnetic resonance through STEM education. It will be achieved not only the promotion of creativity and the desire to learn, but also the reduction of possible fear or respect exercised by medical imaging techniques in a group of non-specialized people.

KEY WORDS

Magnetic resonance, MRI, education, STEM, workshop

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Disposición de los polos magnéticos en imanes con estructuras diferentes
- Figura 2. Representación de las propiedades magnéticas de los imanes: A) Atracción y repulsión de los polos magnéticos; B) Comportamiento de los polos al producirse una partición en el imán.
- Figura 3. Disposición de las líneas de campo en función de la colocación norte-sur de los imanes.
- Figura 4. Representación de los polos magnéticos y geográficos terrestres, así como las líneas de campo producidas por el campo magnético.
- Figura 5. Representación de las variaciones producidas en las líneas de campo al introducir objetos con diferente susceptibilidad magnética en un campo magnético.
- Figura 6. Componentes de un equipo de resonancia magnética.
- Figura 7. Representación de las líneas de campo del campo magnético generado en el interior de un solenoide por medio de virutas de hierro.
- Figura 8. Representación gráfica de los dos estados energéticos de un protón.
- Figura 9. Variaciones producidas en el protón al introducirlo en un campo magnético; A) Orientación de un conjunto de protones en un campo magnético, B) Representación del movimiento de precesión de un protón.
- Figura 10. Magnetización del vóxel; A) Orientación de vectores de cada protón; B) Orientación de los vectores al quitar los vector que se anulan entre ellos; C) Vector de magnetización total mostrando en naranja la componente longitudinal y en azul la componente transversal.
- Figura 11. Cambio del estado de energía de los protones al introducir un pulso de radiofrecuencia, lo que produce una variación en la proyección sobre el plano longitudinal del vector de magnetización.
- Figura 12. Adquisición de coherencia de fase de fase durante la precesión de protones al introducir un pulso de radiofrecuencia, lo que produce un aumento en la proyección sobre el plano transversal del vector de magnetización.
- Figura 13. Excitación (A) y relajación (B) nuclear del vector de magnetización.
- Figura 14. Ejemplo de juguetes STEM
- Figura 15. Equipo de resonancia magnética Philips Ingenia 3T
- Figura 16. Impresora 3D Prusa i3 mk2
- Figura 17. Comparativa entre el mismo mango adquirido con la modalidad axial T1 (A) y con la modalidad sagital T2 (B).
- Figura 18. Comparativa entre las frutas originales (A) y su imagen obtenida por RM (B).
- Figura 19. Representación del volumen de una naranja, una alcachofa y un aguacate en los diferentes planos del espacio. En el plano axial se muestra la línea de corte de los otros dos planos, de forma que en el plano coronal se ve la alcachofa y en el plano sagital el aguacate y la alcachofa.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

- Figura 20. Segmentación manual de la pipa de un aguacate (superficie en rojo) con el programa ITK-SNAP. Visión de los cortes axial, sagital, coronal y del volumen de la pipa.
- Figura 21. Segmentación y filtrado morfológico del volumen. A) Volumen inicial obtenido como resultado de dicom23D, B) Máscara del volumen tras la segmentación por Kmeans3D, C) Resultado de la dilatación del volumen, D) Resultado de la erosión del volumen.
- Figura 22. Resultado final tras la reconstrucción y segmentación.
- Figura 23. Visualización de conjunto de tres frutas por medio de A) Meshmixer y B) Meshlab con un filtro de rayos X para ver a través.
- Figura 24. Diapositivas de la unidad temática 1: Magnetismo: orígenes y definición.
- Figura 25. Diapositivas de la unidad temática 2: ¿Qué son los imanes?
- Figura 26. Representación de un mapa imaginario y el vector de movimiento que tendrían cargas positivas colocadas en cada celda del mapa.
- Figura 27. Diapositivas de la unidad temática 3: Campo magnético y líneas de campo.
- Figura 28. Diapositivas de la unidad temática 4: Magnetismo terrestre
- Figura 29. Diapositivas de la unidad temática 5: Tipos de materiales y sus interacciones
- Figura 30. Comparación entre una radiografía (izquierda) y una imagen de resonancia magnética (derecha).
- Figura 31. Diapositivas de la unidad temática 6: Imagen médica por resonancia magnética
- Figura 32. Diapositivas de la unidad temática 7: Equipos de MRI
- Figura 33. Dibujos utilizados para la explicación del funcionamiento de la adquisición de las imágenes médicas por medio de un equipo de resonancia magnética
- Figura 34. Diapositivas de la unidad temática 8: Funcionamiento de los equipos de MRI
- Figura 35. Diapositivas de la unidad temática 9: Parámetros importantes de los equipos de MRI
- Figura 36. Representación del proceso de un estudio de MRI cerebral: A) Adquisición de las imágenes con el equipo de MRI, B) Los diferentes cortes obtenidos (axial) del cerebro, C) Reconstrucción 3D del modelo cerebral, D) Impresión 3D del cerebro del paciente.
- Figura 37. Diagrama del bloque 1 del proyecto
- Figura 38. Representación de la potente atracción entre un elemento metálico y un equipo de MRI
- Figura 39. Limaduras de hierro en torno a un imán.
- Figura 40. Limaduras de hierro en el interior de un tubo con gel transparente.
- Figura 41. Caída amortiguada de un imán potente en el interior de un tubo de cobre
- Figura 42. Slime magnético
- Figura 43. Pecera de imanes flotando sobre tapones en un recipiente con agua
- Figura 44. Tren magnético
- Figura 45. Maletín para experimentos de niños con brújulas e imanes
- Figura 46. Platos de campo magnético
- Figura 47. Grafito diamagnético flotante
- Figura 48. Representación de los diferentes cortes de un melón cantalupo (corte axial)

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

- Figura 49. Representación de los diferentes cortes de un brócoli (corte coronal)
 - Figura 50. Representación de los diferentes cortes de un brócoli (corte axial)
 - Figura 51. Representación de los diferentes cortes de un mango (corte coronal)
 - Figura 52. Representación de los diferentes cortes de dos kiwis (corte axial)
 - Figura 53. Realización de un video corto en After Effects que muestre la transición de los cortes coloreando las piezas de fruta.
 - Figura 54. Imágenes de volumetría de las piezas de fruta obtenidas con Philips Ingenia 3T.
 - Figura 55. Transición de las imágenes de volumetría en el video que da lugar al giro de las piezas de fruta.
 - Figura 56. Diagrama esquemático del bloque 2 del proyecto
 - Figura 57. Representación de las tres frutas por separado con Meshlab A) Naranja con sombreado tipo lattice, B) Alcachofa con sombreado tipo lattice, C) Aguacate con sombreado tipo Rayos X.
 - Figura 58. Representación de las mitades del aguacate, A) Con pipa y sombreado tipo lattice, B) Sin pipa y sombreado tipo lattice, C) Ambas mitades juntas con sombreado tipo rayos X para demostrar que son análogas.
 - Figura 59. Representación de las mitades del mango, A) Con pipa y sombreado tipo lattice, B) Sin pipa y sombreado tipo lattice, C) Ambas mitades juntas con sombreado tipo rayos X para demostrar que son análogas.
 - Figura 60. Mango impreso en 3D A) Mitades separadas y B) Mitades unidas
- Figura 360. Diagrama del bloque 3 del proyecto

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Clasificación de los materiales al entrar en contacto con un campo magnético en función de su susceptibilidad magnética.
- Tabla 2. Costes de personal del proyecto
- Tabla 3. Costes de equipo del proyecto
- Tabla 4. Costes de materiales físicos utilizados
- Tabla 5. Costes de materiales necesarios para la realización del taller
- Tabla 6. Costes de software
- Tabla 7. Costes totales de ejecución del proyecto
- Tabla 8. Coste final del proyecto

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
RESUM	7
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	15

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	23
1.1 Magnetismo	23
1.1.1 Introducción al magnetismo	23
1.1.2 Campo magnético y líneas de campo	25
1.1.3 Propiedades magnéticas de la materia	25
1.2 Resonancia magnética	27
1.2.1 Introducción a la imagen por resonancia magnética.....	27
1.2.2 Componentes de un equipo de RM.....	28
1.2.3 Magnetización del vóxel	29
1.2.4 Excitación y relajación nuclear	31
1.2.5 Procesamiento de las señales de RM	33
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	35
2.1 Herramientas para explicar la resonancia magnética	35
2.1.1 Documentos explicativos de los principios físicos	35
2.1.2 Plataformas <i>online</i>	36
2.1.3 Tutoriales de resonancia magnética	36
2.2 Educación STEM.....	37

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	39
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y EQUIPOS.....	41
4.1 Software	41
4.1.1 Matlab	41
4.1.2 Mango.....	41
4.1.3 Meshlab	42
4.1.4 Meshmixer	42
4.1.5 ITK-SNAP	42
4.1.6 <i>Adobe Creative Cloud</i>	42
4.2 Equipos.....	43
4.2.1 ERESA Phillips 3T.....	43
4.2.2 Impresora 3D	43
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	45
5.1 Planificación del taller	45
5.2 Procesamiento de imágenes de resonancia magnética.....	46
5.2.1 Adquisición de las imágenes.....	46
5.2.2 Reconstrucción y segmentación	47
5.2.3 Procesamiento.....	51
5.2.4 Impresión 3D	51
6. RESULTADOS.....	53
6.1 Unidades didácticas	53
6.1.1 UD1. Magnetismo: orígenes y definición.	53
6.1.2 UD2. ¿Qué son los imanes?	54
6.1.3 UD3. Campo magnético y líneas de campo	54
6.1.4 UD4. Magnetismo terrestre.....	56
6.1.5 UD5. Tipos de materiales y su interacción	57
6.1.6 UD6. Imagen médica por resonancia magnética.....	57
6.1.7 UD7. Equipos de MRI	59
6.1.8 UD8. Funcionamiento de los equipos por resonancia magnética	60

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

6.1.9 UD9. Parámetros importantes de los equipos de resonancia magnética.....	60
6.1.10 UD10. Estructuras anatómicas reales.....	62
6.2 Curso práctico.....	64
6.2.1 Experimentos con MRI.....	64
6.2.2 Experimentos de magnetismo.....	65
6.2.3 Sucesión de cortes.....	69
6.3 Reconstrucción y segmentación.....	75
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	79
CAPÍTULO 8. LÍNEAS FUTURAS.....	81
REFERENCIAS.....	83

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO.....	89
1. Costes de personal.....	89
2. Costes de equipos.....	89
3. Costes de materiales.....	89
4. Costes del software.....	91
Costes totales del proyecto.....	91

MEMORIA

MARÍA JOSÉ ORTIZ RUIZ

Trabajo de fin de Master | Ingeniería Biomédica

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MAGNETISMO

1.1.1 Introducción al magnetismo

Las primeras observaciones que se realizaron sobre el magnetismo datan en el año 600 a.C. aproximadamente. Se piensa que los griegos fueron los primeros en analizar este fenómeno en Magnesia del Meandro, una antigua ciudad de Asia Menor. Se descubrieron unas piedras que poseían una curiosa propiedad, ya que eran capaces de atraer ciertos materiales, entre ellos, el hierro. Actualmente se sabe que dichas piedras, llamadas Magnetita (Fe_3O_2), contienen óxido de hierro, lo que les proporciona esas cualidades. De modo que, en honor a la ciudad de Magnesia, se asignó el término magnetismo a las propiedades que tienen estas piedras [1].

Aunque este fenómeno era conocido de forma experimental, no fue sino hasta mediados del siglo XIX cuando se consiguieron formular teóricamente las interacciones de tipo eléctrico y magnético. Esto se consiguió gracias a las ecuaciones de Maxwell, cuatro ecuaciones que describen completamente los fenómenos electromagnéticos.

Por tanto, se llama magnetismo al fenómeno natural por el cual ciertos objetos son capaces de producir fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales [2]. Algunos de los materiales que contienen propiedades magnéticas, comúnmente conocidos como imanes, son entre otros, el níquel, el hierro y el cobalto, así como sus aleaciones.

Existen dos tipos de imanes en función de su origen: los imanes naturales, que surgen de manera natural; y los imanes artificiales, que son cuerpos magnéticos que se friccionan con magnetita con el objetivo de que se transformen de manera artificial en imanes [3].

Por otro lado, también se pueden clasificar los imanes dependiendo de la perduración de sus propiedades magnéticas. Entre los más comunes se encuentran:

- Imanes temporales: están conformados por hierro dulce y se caracterizan por tener una atracción magnética de poca duración.
- Imanes permanentes: aquellos imanes constituidos de acero que conservan sus propiedades magnéticas por un tiempo perdurable.
- Electroimán: imán en el que el campo magnético se produce gracias a la acción de una corriente eléctrica que pasa por el hilo superconductor que lo conforma.
- Imanes de neodimio: formados por hierro, neodimio y boro. Se trata del imán permanente de mayor potencia hecho por el hombre [4].

Los imanes se caracterizan por la presencia de dos zonas diferenciadas donde las fuerzas magnéticas se manifiestan con mayor intensidad. Estas zonas, situadas en los extremos del imán, son denominadas polos magnéticos (norte y sur). Ambos polos están en contacto con una zona media, llamada línea neutra, donde las fuerzas de atracción son menores. La estructura del imán no afecta en la presencia de los polos magnéticos, sin embargo, si es posible encontrar

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

imanes que tengan los polos en zonas diferentes. Es decir, como vemos en la figura 1, un mismo imán con forma de anillo puede ser axial, radial o diametral.

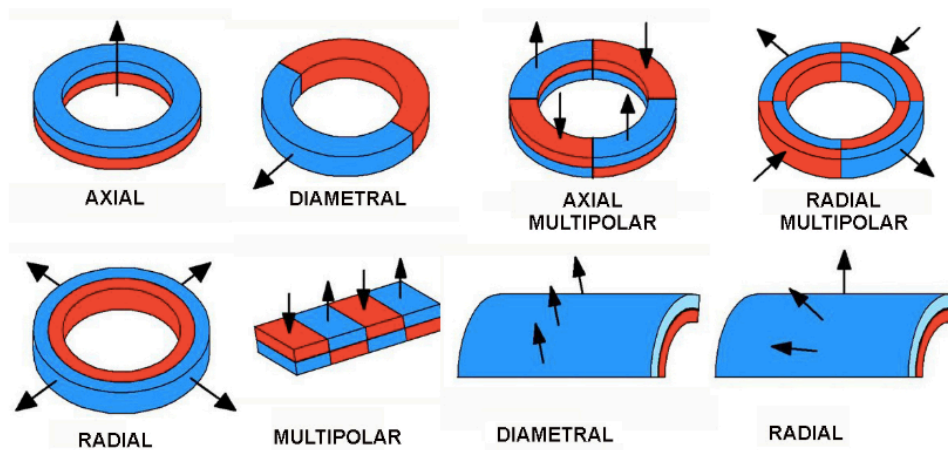


Figura 1. Disposición de los polos magnéticos en imanes con estructuras diferentes [5].

Los polos magnéticos poseen tres propiedades, en primer lugar, del mismo modo que las cargas eléctricas de distinto signo se atraen y de mismo signo se repelen, los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen (figura 2a). Además, los polos magnéticos se mantendrán presentes en el imán sin importar que éste se parta en varios trozos (figura 2b).

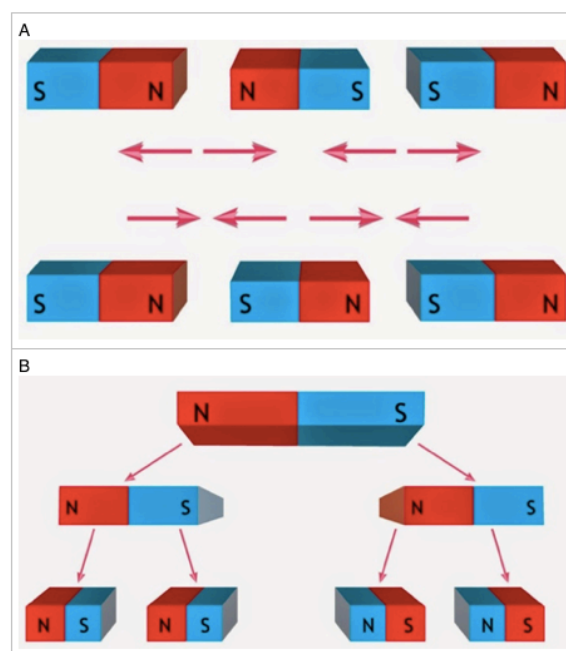


Figura 2. Representación de las propiedades magnéticas de los imanes: A) Atracción y repulsión de los polos magnéticos; B) Comportamiento de los polos al producirse una partición en el imán [6].

1.1.2 Campo magnético y líneas de campo

El fenómeno del magnetismo se ejerce gracias a un campo magnético, que es la zona del espacio que se encuentra en torno a un objeto imantado en la que actúan sus efectos magnéticos. Los objetos metálicos actúan como imanes cuando se encuentran en la zona del campo magnético que los atrae. El campo magnético de un punto se representa por un vector B , llamado inducción magnética, que se puede visualizar por medio de las líneas de campo, introducidas por Michael Faraday [1].

Las líneas de campo muestran la orientación que tomarían brújulas ideales tridimensionales en el espacio en el que se encuentra un campo magnético en torno a un imán. Las líneas de campo convergen con el imán en las zonas donde la fuerza magnética es mayor; y se alejan donde las fuerzas son menores [7]. De modo que las líneas parten de un polo, el norte, y regresan al otro polo, el sur, siguiendo la estructura que se muestra en la figura 3.

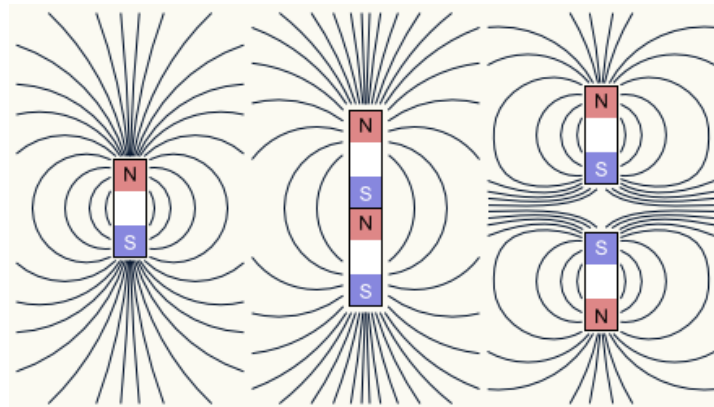


Figura 3. Disposición de las líneas de campo en función de la colocación norte-sur de los imanes [8].

Este fenómeno también se encuentra presente en el planeta Tierra, dado que éste se comporta como un gran imán. Existen evidencias que plantean que la razón de ello se encuentra en la presencia de metales líquidos en el núcleo de la Tierra. Estos materiales dan lugar a una serie de corrientes convectivas que junto con el movimiento de rotación del planeta generan un campo magnético muy potente que rodea el planeta y lo protege, entre otras cosas, del impacto del viento solar [9, 10]. De esta manera, las brújulas se orientan siguiendo el campo magnético terrestre. Cabe destacar que, el polo norte magnético terrestre coincide aproximadamente con el polo sur geográfico; mientras que el polo sur magnético coincide con el polo norte magnético como podemos ver en la figura 4.

1.1.3 Propiedades magnéticas de la materia

Por otro lado, se pueden clasificar los distintos materiales en función de su comportamiento bajo la presencia de un campo magnético. Este concepto se va a poder analizar gracias a un parámetro llamado susceptibilidad magnética, que mide la tendencia que tienen los distintos

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

materiales a magnetizarse al entrar en contacto con un campo magnético. La susceptibilidad magnética, que se representa con la letra griega χ ("chi"), expresa la magnetización total en unidad de volumen [11, 12].

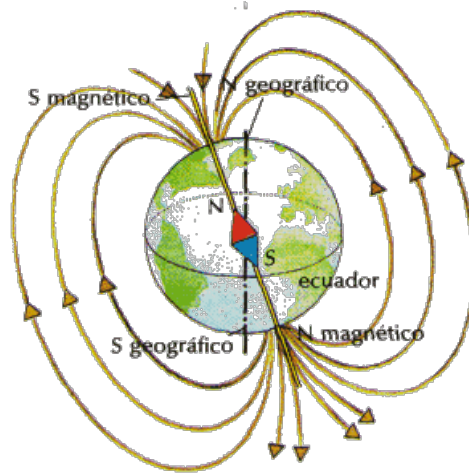


Figura 4. Representación de los polos magnéticos y geográficos terrestres, así como las líneas de campo producidas por el campo magnético [13].

Será posible clasificar cuatro tipos de materiales, como se muestra en la tabla 1.

Sustancia	χ	Descripción	Ejemplo
<i>Paramagnética</i>	>0	Se ven atraídos por el imán, alineándose con el campo magnético.	Hierro, Magnesio
<i>Ferromagnética</i>	>0	Permanecen magnetizados una vez que el campo magnético se ha eliminado.	Hierro, Níquel, Cobre
<i>Supermagnética</i>	>0	Materiales con una susceptibilidad media entre los dos anteriores	Hígado, nodos linfáticos
<i>Diamagnética</i>	<0	Materiales que repelen el campo magnético.	La mayoría de los tejidos

Tabla 1. Clasificación de los materiales al entrar en contacto con un campo magnético en función de su susceptibilidad magnética.

En aquellos materiales en los que la susceptibilidad magnética resulta negativa, el campo magnético en el interior el material será menor que en el exterior; por otro lado, en aquellos

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

que la susceptibilidad magnética es positiva, el campo magnético será superior en el interior del material que en el exterior.

De esta manera, al representar las líneas de campo de todos ellos, se pueden apreciar claras diferencias, como se puede observar en la figura 5.

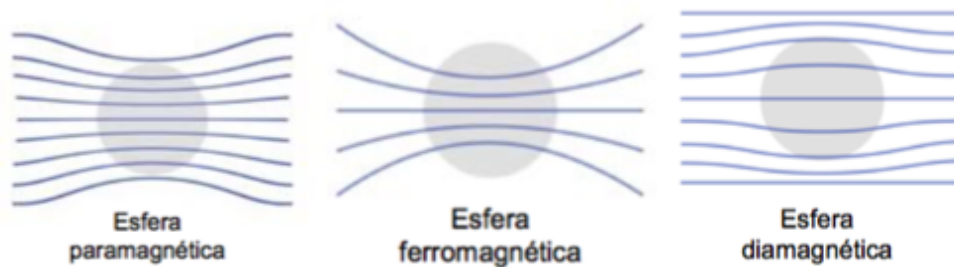


Figura 5. Representación de las variaciones producidas en las líneas de campo al introducir objetos con diferente susceptibilidad magnética en un campo magnético [14].

1.2 RESONANCIA MAGNÉTICA

Se conoce como imagen médica al conjunto de técnicas y procesos utilizados para crear imágenes del interior del cuerpo humano o partes de él, con intenciones clínicas (diagnóstico o tratamiento de enfermedades) o médicas (estudio de la anatomía normal y funcionalidad del organismo). En muchos casos, la imagen médica se utiliza con intención de conocer aspectos internos del cuerpo sin necesidad de invadirlo. De esta manera, se pueden entender las imágenes médicas como la solución al problema matemático inverso, es decir, conocer la causa la enfermedad o propiedades del tejido gracias al efecto causado en el organismo (señal obtenida con la imagen biomédica).

En el contexto clínico, una vez las imágenes médicas se han adquirido, deberán ser interpretadas por un médico especialista o radiólogo, con el objetivo de realizar un diagnóstico certero y elegir el tratamiento adecuado y personalizado para cada paciente. Por otro lado, en el campo de la investigación científica, la adquisición de imágenes médicas constituye una subdisciplina de la ingeniería biomédica; donde también encontramos: investigación y desarrollo de instrumentación, modelado de señales biomédicas, etc. [15].

1.2.1 Introducción a la imagen por resonancia magnética

La resonancia magnética (o MRI del inglés *Magnetic Resonance Imaging*) es un tipo de imagen médica que se basa en la adquisición de las imágenes gracias a un campo magnético de gran potencia que es obtenido por medio de un imán muy potente con forma de anillo. La MRI es capaz de obtener unas imágenes de gran calidad y con una alta resolución de manera no invasiva haciendo uso de radiación no ionizante. Esto se debe a que utiliza un tipo de radiación electromagnética que no tiene suficiente energía como para ionizar átomos o moléculas, es

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

decir, de arrancarles electrones. Sin embargo, este tipo de radiación sí es capaz de excitar los electrones, moviéndolos así a un nivel energético superior.

La resonancia magnética tiene como principales características la posibilidad de realizar imágenes en cualquier dirección del espacio, pudiendo manipularlas como se requiera. Esto supone un gran avance con respecto a otras técnicas de imagen médica como la tomografía computarizada (o CT, del inglés *Computed Tomography*), donde los planos están prediseñados y no se pueden cambiar. Por otro lado, la MRI trabaja con un campo de visión no limitado al isocentro y con un contraste tisular en regiones blandas del organismo muy superior al resto de técnicas de imagen médica. Finalmente, se adquieren imágenes con información tanto anatómica como funcional con una resolución espacial muy elevada.

Sabiendo esto, es fácil comprender las numerosas aplicaciones que puede tener una técnica como esta. Estas aplicaciones se pueden clasificar en dos grupos, atendiendo a la búsqueda de información anatómica o funcional [14, 15].

- Información anatómica: posibilidad de obtener imágenes de cuerpo entero, imágenes del sistema musculoesquelético, cardiología, angiografía, etc.
- Información funcional: mapas corticales y subcorticales, tractografía cerebral y cardiaca, etc.

1.2.2 Componentes de un equipo de RM

Los equipos de imagen por resonancia magnética han ido evolucionando en gran medida a lo largo de los años desde la introducción de las primeras unidades comerciales durante el año 1980 aproximadamente. Actualmente, todo equipo de resonancia magnética consta de tres elementos principales, además de la camilla móvil donde se coloca el paciente, como se puede observar en la figura 6.

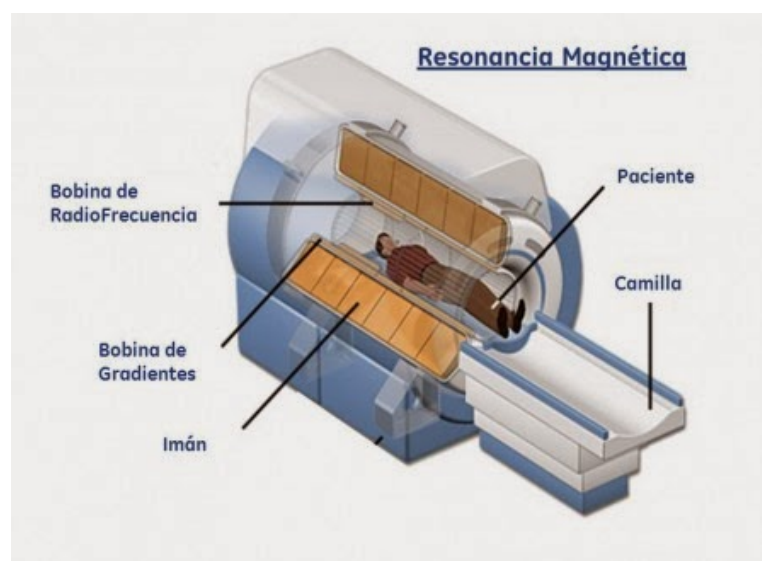


Figura 6. Componentes de un equipo de resonancia magnética [16].

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

En primer lugar, el imán, encargado de generar un campo magnético muy intenso en una zona homogénea del espacio. Este imán se trata de un electroimán hecho de un alambre superconductor adquiriendo una forma helicoidal cilíndrica (o solenoide). Las líneas de campo del campo magnético adquirirán la estructura que se muestra en la figura 7, maximizando la uniformidad del campo en el interior del anillo, donde se colocará la camilla para la realización del estudio.



Figura 7. Representación de las líneas de campo del campo magnético generado en el interior de un solenoide por medio de virutas de hierro [17].

El segundo componente de los equipos de MRI son las bobinas de gradiente de campo magnético, que crean una variación espacial de campo magnético en las direcciones del espacio. Será necesaria una bobina por cada dirección del espacio, lo que resulta en tres bobinas (x, y, z).

Por último, las bobinas de radiofrecuencia, componente que tiene función de antena emisora de pulsos de radiofrecuencia. Este componente es de gran importancia, ya que es el encargado de excitar el tejido que se pretende estudiar [14, 18].

1.2.3 Magnetización del vóxel

En el caso de la resonancia magnética, únicamente serán de interés aquellas partículas con un número de electrones y/o protones impar. Este hecho se debe a la necesidad de evitar que el vector de espín sea nulo. Es por ello, que en la resonancia magnética, nos vamos a centrar solo en los átomos de hidrógeno. Los protones se encuentran girando sobre sí mismos de modo aleatorio, sin embargo, al introducirlos en un campo magnético, ellos se orientarán con el campo tomando uno de los dos estados energéticos posibles: el de menor energía o el de mayor energía.

La diferencia energética entre ellos es un factor conocido y cuantificado, de modo que es posible saber qué energía exactamente se debe proporcionar al protón para que cambie de estado energético. Esta energía, que se suministrará en forma de ondas electromagnéticas (o pulsos de radiofrecuencia) a una frecuencia determinada en función del campo magnético y el tipo de

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

núcleo con el que se esté trabajando, será generada gracias a las bobinas de RF, y una vez sea absorbida producirá el fenómeno denominado resonancia magnética.

Del mismo modo, un núcleo que está en el estado de mayor energía puede pasar al otro estado liberando una cantidad de energía proporcional al escalón entre ambos estados. Este proceso será captado por una antena receptora presente en el equipo.

Haciendo referencia a la orientación del espín con respecto al campo magnético, también podemos denominar al estado menos energético como *spin up* o estado paralelo; mientras que el estado más energético será el *spin down* o estado antiparalelo. En la figura 8 se muestra en la parte superior el estado más energético o antiparalelo y en la parte inferior el estado menos energético o paralelo.

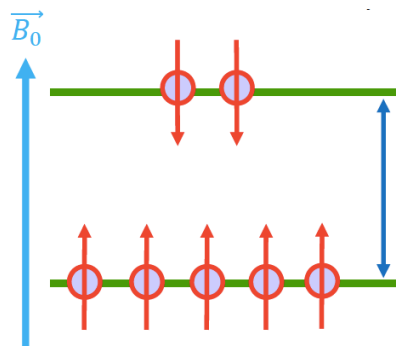


Figura 8. Representación gráfica de los dos estados energéticos de un protón [14].

Pero de nuevo, los protones no se mantienen estáticos alineados con el campo magnético, sino que aparece un movimiento, llamado precesión que sigue un patrón similar al de la figura 9. La frecuencia de precesión variará en función del campo magnético en el que se encuentre el protón y el entorno bioquímico. De este modo, los átomos de hidrógeno tendrán una frecuencia de precesión diferente en función de la molécula a la que estén asociados.

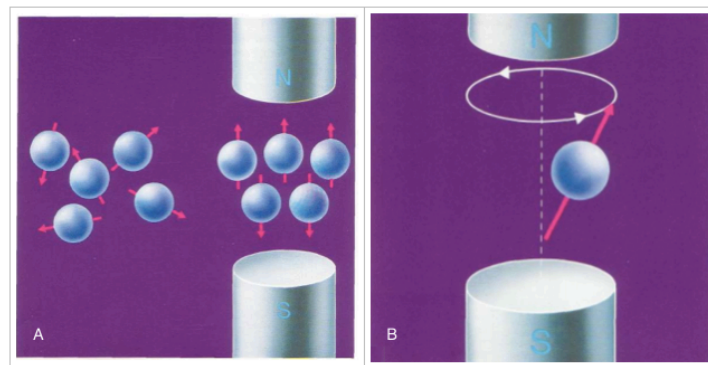


Figura 9. Variaciones producidas en el protón al introducirlo en un campo magnético; A) Orientación de un conjunto de protones en un campo magnético, B) Representación del movimiento de precesión de un protón [19].

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Una vez los protones están en su estado de energía correspondiente y precesando, como el número de protones es impar y las velocidades de precesión son diferentes, los vectores se anularán entre ellos. De esta manera, se hablará del vector de magnetización, suma resultante de todos los vectores de espín que tenía cada protón que conforma un vóxel, que se puede descomponer una componente transversal y una componente longitudinal. La figura 10 detalla el proceso [14, 18, 19].

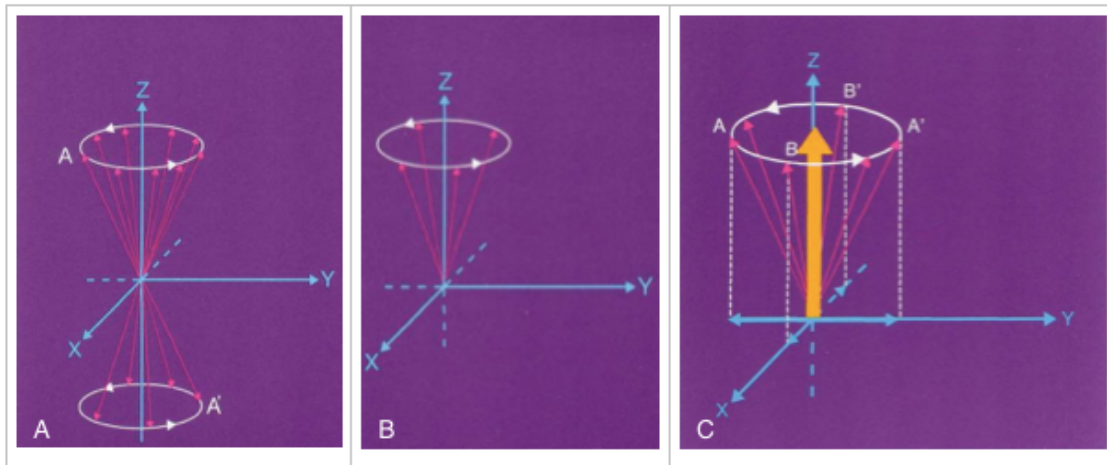


Figura 10. Magnetización del vóxel; A) Orientación de vectores de cada protón; B) Orientación de los vectores al quitar los que se anulan entre ellos; C) Vector de magnetización total mostrando en naranja la componente longitudinal y en azul la componente transversal [19].

1.2.4 Excitación y relajación nuclear

En estado de equilibrio, el vector de magnetización tendrá la proyección en el plano transversal nula mientras que la proyección en el plano longitudinal será máxima. Sin embargo, al empezar a aplicar los pulsos de radiofrecuencia se dará lugar a dos cambios:

- En primer lugar, los protones comenzarán a pasar del estado de mínima energía al estado de máxima energía, lo que dará lugar a una proyección en el plano transversal no nula y una disminución de la magnitud de la proyección en el plano longitudinal (figura 11).
- Por otro lado, la distribución de los protones dejará de ser aleatoria y estos comenzarán a precesar en fase, es decir, obtenemos una coherencia de fase durante la precesión. (figura 12).

En conclusión, el vector final tendrá la proyección en el plano longitudinal nula y la proyección en el plano transversal máxima.

Finalmente, una vez se desconecte el pulso de radiofrecuencia, el vector de magnetización volverá progresivamente a su estado de equilibrio. Como la presencia del campo magnético afecta a cada protón de una manera diferente, cada espín irá adquiriendo su frecuencia de precesión a una velocidad determinada en función de su entorno bioquímico. Este proceso se

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

denomina relajación y se basa en dos velocidades: la velocidad de pérdida de la proyección en el plano transversal (t_1) y la de recuperación de la proyección en el eje longitudinal (t_2).

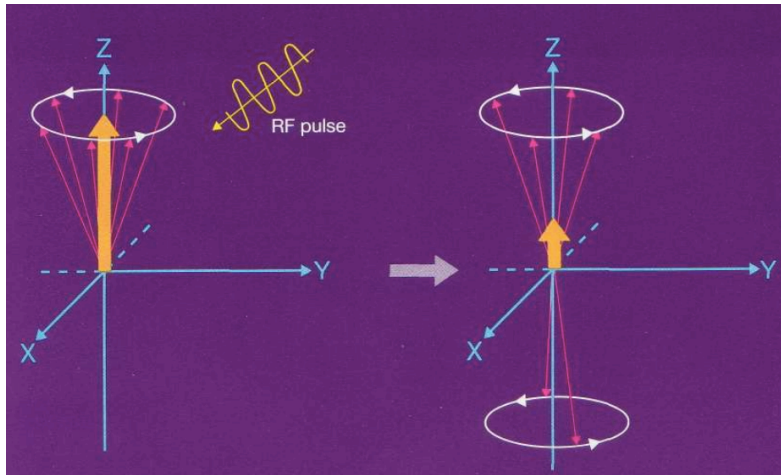


Figura 11. Cambio del estado de energía de los protones al introducir un pulso de radiofrecuencia, lo que produce una variación en la proyección sobre el plano longitudinal del vector de magnetización [19].

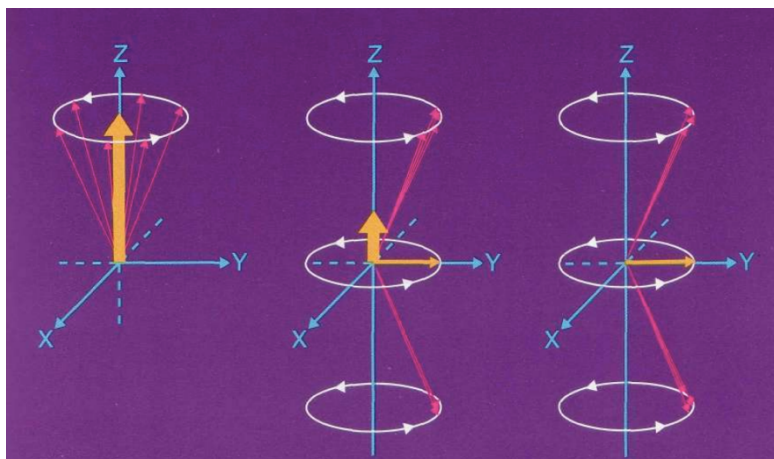


Figura 12. Adquisición de coherencia de fase durante la precesión de protones al introducir un pulso de radiofrecuencia, lo que produce un aumento en la proyección sobre el plano transversal del vector de magnetización [19].

Mientras que la excitación nuclear se producía precesando en forma de esfera (figura 13A), la relajación nuclear se produce precesando en una forma similar a un cono (figura 13B). El vector de magnetización volverá a su posición de equilibrio, liberando durante este proceso la energía que había absorbido previamente gracias a los pulsos de radiofrecuencia. En ese momento, será posible realizar la captación de la señal de resonancia magnética. La relajación finalizará cuando se haya reestablecido la proporción de vectores en ambos estados energéticos [14, 18, 19].

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

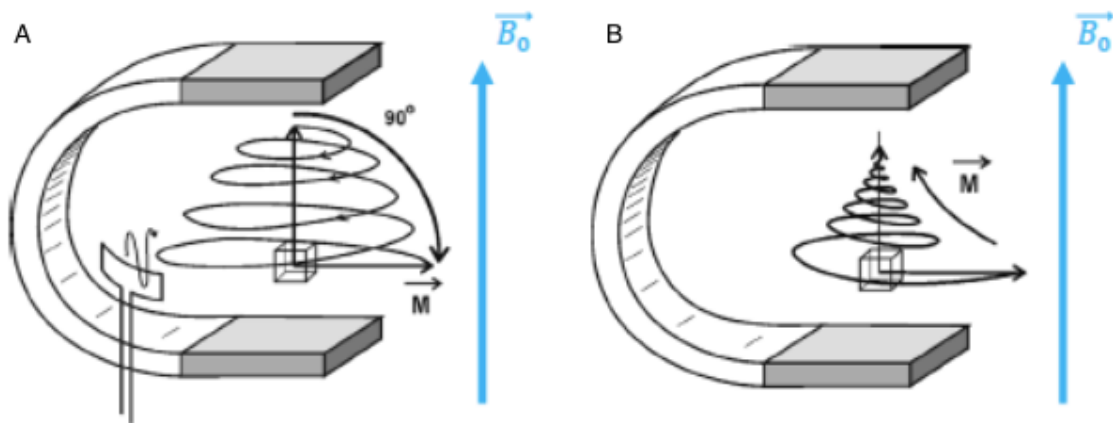


Figura 13. Excitación (A) y relajación (B) nuclear del vector de magnetización [14].

1.2.5 Procesamiento de las señales de RM

Una vez obtenidas las señales de la relajación nuclear, es necesario codificar espacialmente su procedencia para construir la imagen de resonancia magnética. Este paso se realiza por medio de gradiente de campo magnética, que crearán variaciones de dicho campo. Se trata de tres bobinas, una para cada plano del espacio: en x (G_x) está el gradiente de codificación de frecuencia; en y (G_y), el gradiente de codificación de fase y en z (G_z), el gradiente de selección de corte.

Durante la excitación entrará en acción el gradiente de selección de corte. A continuación, durante la relajación, se aplicará el gradiente de codificación de fase, que creará una variación en las filas del campo magnético. Por último, el gradiente de codificación de frecuencia creará una variación en las columnas del campo magnético. Será en ese momento cuando recibe la primera señal. Para obtener toda la información necesaria, se deberá realizar este proceso repetidamente.

Finalmente, la unión de todas estas señales irá conformando el espacio-k, lugar donde se registra toda la información base. La imagen final será el resultado de la transformada de Fourier del espacio-k [14, 18, 19].

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología, se han desarrollado y mejorado muchas técnicas médicas, que se han convertido progresivamente en una herramienta frecuente tanto en las urgencias hospitalarias como en el día a día de ciertas especialidad médicas. Según algunas investigaciones [20], en quince años se habrían podido realizar hasta casi 31 millones de pruebas de imagen médica, lo que equivale a 1,18 pruebas por persona al año. Como se sabe, muchas de estas técnicas resultan perjudiciales debido a su alto nivel de radiación si son realizadas con frecuencia, por lo que técnicas avanzadas como la imagen por resonancia magnética están adquiriendo mayor importancia.

Es por todo ello que uno de los principales problemas que presenta la imagen por resonancia magnética es el gran desconocimiento de la población, así como su temor a someterse a pruebas poco conocidas de las que a penas se tiene conocimiento.

En actualidad existen diferentes herramientas cuya finalidad es explicar los fundamentos físicos de la resonancia magnética y/o el proceso de realización de un estudio de imagen por resonancia magnética. Su principal objetivo es reducir el temor de la población no especializada (adultos, ancianos o niños), para que se sometan a estos estudios con unos conocimientos mínimos.

2.1 HERRAMIENTAS PARA EXPLICAR LA RESONANCIA MAGNÉTICA

La mejora en las tecnologías médicas y la sanidad también han dado lugar a un aumento en la edad media de la población actual. De esta manera, existe un gran número de personas de edad avanzada que deben realizarse estudios de imagen médica, con el objetivo de diagnosticar enfermedades o dolencias.

Por ello se han ido desarrollando una serie de recursos de aprendizaje que permiten conocer, tanto a ancianos como jóvenes y adultos, los principios físicos de esta técnica, sin necesidad de salir de casa o perder tiempo con información poco fiable.

2.1.1 Documentos explicativos de los principios físicos

En primer lugar, realizando una búsqueda en internet es posible encontrar documentos que buscan explicar de manera detallada los principios físicos, componentes y funcionamiento de la imagen por resonancia magnética. El nivel de dificultad y el nivel de detalle de dichos documentos puede variar enormemente entre unos y otros.

Por ejemplo, una de las principales fuentes de información sobre la MRI es *The basics of MRI* de Joseph P. Hornak [18]. Se trata de un libro extenso que documenta con gran detalle los principios básicos de la resonancia magnética, abarcando desde nociones básicas de matemáticas y física hasta técnicas avanzadas de adquisición de imágenes y aplicaciones clínicas.

Sin embargo, todas aquellas personas que no busquen un libro tan extenso como es el de Hornak, pueden encontrar también otros documentos igualmente fiables pero menos

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

complejos como es el caso de *MRI made easy* del profesor Hans H. Schild [19]. En este caso, se trata de un libro breve y con animaciones que utiliza ejemplos sencillos con intención de facilitar el entendimiento de los principios físicos que ocurren en el organismo durante la adquisición de las imágenes así como el procesado de las señales.

2.1.2 Plataformas *online*

Dado que los libros de texto no son la opción más cómoda, también se han desarrollado una serie de plataformas web, que nuevamente buscan detallar los fenómenos de la resonancia magnética, así como poner en contacto a aquellos que estén interesados e incluso resolver dudas por medio de un sistema de mensajería con doctores.

Imaios [21] es un atlas interactivo de anatomía humana que recoge una gran colección de imágenes médicas de distinto origen. Uno de sus apartados más interesantes, e-MRI, es un curso interactivo que trata el funcionamiento y los principios físicos de la imagen por resonancia magnética. Otro ejemplo, sería *MRItutor* [22], que parte de la misma idea, aunque con una interfaz gráfica menos amigable.

Por último, MRI-q [23] tiene como principal objetivo resolver todas aquellas preguntas típicas que se plantean los pacientes de este campo. De una manera más técnica, permite elegir temáticas, dentro de las cuales existen un gran número de preguntas con sus correspondientes respuestas.

2.1.3 Tutoriales de resonancia magnética

Por último, es posible encontrar numerosos videos explicativos sobre el proceso de realización de un estudio por resonancia magnética. Estos videos están enfocados para aquellas personas que deben realizarse una prueba de MRI, de manera que puedan hacerlo sin miedo gracias a los nuevos conocimientos adquiridos.

Generalmente, estos tutoriales detallan en primer lugar los pasos que se deberán realizar, partiendo por la necesidad de dejar fuera todos los elementos metálicos para evitar que se adhieran al imán del equipo, la presencia de una camilla móvil que les colocará dentro del imán o las diferentes posiciones en las que se deben colocar sobre la camilla en función de la región que se quiera estudiar.

Sin embargo, lo más importante que mencionan estos estudios, ya que es lo que más suele asustar a los pacientes, es la posibilidad de sentir claustrofobia durante la prueba, la necesidad de mantenerse muy quieto (incluso dejar de respirar si es necesario), la normalidad de los ruidos que se escuchan durante el transcurso del estudio y la existencia de un botón de socorro en caso de urgencia. También suele dejarse claro que esta técnica de imagen médica es indolora y no invasiva.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

2.2 EDUCACIÓN STEM

Por otro lado, se está buscando potenciar el interés de los más pequeños hacia la ciencia y la tecnología. De este modo surge la educación STEM, del inglés *Science, Technology, Engineering and mathematics Education*. Se trata de sesiones educativas que buscan potenciar habilidades en dichas disciplinas y despertar el interés de los niños hacia ciertas áreas de conocimiento por medio la práctica [24].

Por ejemplo, los juguetes STEM (figura 14) pretenden que los niños se diviertan mientras aprenden sobre programación, tecnologías, robótica... por medio de unos juegos sencillos, con o sin necesidad de utilización de móvil o ordenador. Para lograrlo, estos juguetes estimulan la creatividad y ayudan a desarrollar la capacidad de resolución de problemas y retos.



Figura 14. Ejemplo de juguetes STEM

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

Conocida la necesidad de hacer llegar a todas aquellas personas no especializadas un conocimiento mínimo sobre la técnica de imagen por resonancia magnética, es de destacar que la cantidad de herramientas disponibles en español es escandalosamente baja. Además, no hay muchos recursos que enseñen, de una manera didáctica y aplicada para niños, conceptos como el magnetismo y la resonancia magnética.

Por todo ello, el principal objetivo de este trabajo de fin de master es el planteamiento de un taller didáctico para niños que les permita conocer, a grandes rasgos, los fundamentos básicos de la resonancia magnética.

Este taller, que se puede considerar dentro del marco de la educación STEM, estará dividido en tres etapas:

- En primer lugar, una serie de videos breves educativos que a lo largo de su temario buscan enseñar por medio de ejemplos sencillos los principios básicos de la resonancia magnética, como es el magnetismo, los componentes del equipo o la adquisición de las imágenes.
- En segundo lugar se plantearán una serie de experimentos poco complejos pero a la vez ilustrativos que muestren los conocimientos adquiridos en la etapa anterior. Estos experimentos tienen como principal objetivo que los niños puedan tocar y analizar ellos mismos la atracción o repulsión magnética, las líneas de campo, el funcionamiento de las brújulas, etc.
- Por último se mostrarán diferentes imágenes y videos de resonancia magnética de frutas y verduras, para facilitar el entendimiento de dichas imágenes. También se imprimirá en 3D alguna fruta para que vean en tres dimensiones la información que se puede adquirir con los equipos de MRI.

De esta manera, se consigue realizar una pequeña divulgación de la imagen médica, acercando a los niños a una técnica de imagen médica tan avanzada como es la imagen por resonancia magnética.

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y EQUIPOS

En este apartado se van a exponer los materiales y los equipos utilizados para la realización de este proyecto en dos apartados bien diferenciados: en el primero de ellos se describirá el *software* utilizado durante el proceso, incluyendo una pequeña descripción para un mejor entendimiento del desarrollo del proyecto; y en el segundo, los equipos físicos utilizados durante el mismo.

4.1 SOFTWARE

A continuación se expone una lista con el *software* utilizado, así como una breve introducción de su papel en el proyecto.

4.1.1 Matlab

Herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio [25]. Matlab (versión R2017b), se utilizará para la realización de la segmentación y reconstrucción de las imágenes DICOM adquiridas.

Además durante el proceso de segmentación y reconstrucción, se han necesitado tres algoritmos externos, modificados y adaptados a las necesidades del proyecto:

- Dicom23D: Proporcionado Ariel Balter del departamento de modelado y monitorizado biológico [26]. Este algoritmo se encarga de recoger todos los cortes proporcionados en formato DICOM y utiliza la información de cada imagen para reconstruir los cortes en una única imagen tridimensional.
- Kmeans3D: Proporcionado por el profesor José Vicente Manjón Herrera, profesor de Imágenes biomédicas en el grado de ingeniería biomédica en la UPV [27]. KMeans es un método de segmentación de tipo *clustering* (clasificación no supervisada de patrones en grupos) que asigna a cada observación el *cluster* que se encuentre más próximo en términos del centroide.
- Stlwrite: Código proporcionado por la plataforma Matlab, que permite convertir ficheros .mat en ficheros .stl.

4.1.2 Mango

Software no comercial cuya principal función es ver, editar y analizar imágenes médicas. Mango proporciona herramientas de creación y edición de las regiones de interés (ROI, del inglés *Regions Of Interest*) de las imágenes, análisis de histogramas, filtrados en el dominio del espacio y representación de superficies, entre otras [28].

En este proyecto, se ha utilizado Mango para abrir, editar y analizar las imágenes en formato DICOM adquiridas con la resonancia magnética.

4.1.3 Meshlab

Sistema de código abierto de procesado y edición de mallas triangulares tridimensionales. Este *software* proporciona un conjunto de herramientas para editar, limpiar, inspeccionar, renderizar, texturizar y convertir mallas. Ofrece funciones para procesar datos brutos producidos por herramientas o dispositivos de digitalización 3D y para preparar modelos para impresión 3D [29].

4.1.4 Meshmixer

Al igual que Meshlab, Meshmixer [30] es un *software* de modelado 3D gratuito que le permite crear y corregir fácilmente modelos tridimensionales. Su especialidad es crear modelos 3D sobre la base de volúmenes existentes, que se combinan utilizando unas sencillas herramientas que ofrece.

4.1.5 ITK-SNAP

ITK-SNAP es una aplicación *software* cuyo principal objetivo es la segmentación de estructuras tridimensionales en imágenes médicas [31]. ITK-SNAP proporciona la posibilidad de realizar una segmentación semiautomática utilizando métodos de contorno activos, así como delineación manual y navegación de imágenes. Además de estas funciones básicas, ITK-SNAP ofrece muchas utilidades de apoyo.

En este proyecto, se ha utilizado ITK-SNAP para la segmentación manual de ciertas regiones de las imágenes.

4.1.6 Adobe Creative Cloud

Adobe Creative Cloud es un servicio de Adobe Systems que da acceso a los usuarios a una serie de softwares de diseño gráfico, edición de video, diseño web y servicios en la nube [32].

En este caso se ha utilizado en primer lugar Photoshop, editor de gráficos utilizado principalmente para el retoque de fotografías y gráficos.

También se ha utilizado Adobe After Effects, aplicación que tiene forma de estudio destinado para la creación o aplicación en una composición, así como realización de gráficos profesionales en movimiento y efectos especiales, que desde sus raíces han consistido básicamente en la superposición de capas. Adobe After Effects es uno de los softwares basados en línea de tiempo más potentes del mercado.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

4.2 EQUIPOS

En este apartado se documentan los materiales físicos y equipos que se han requerido durante la realización del proyecto.

4.2.1 ERESA Phillips 3T

La adquisición de las imágenes de resonancia magnética ha sido posible gracias a la colaboración del Grupo Médico ERESA. Esta empresa puso a disposición del proyecto una máquina de resonancia magnética *Philips Ingenia* de 3 Tesla como la que se muestra en la figura 15.



Figura 15. Equipo de resonancia magnética Philips Ingenia 3T [33]

El equipo de resonancia magnética Philips Ingenia 3T permite obtener información consistente con una buena calidad de imagen y claridad digital y alta velocidad. El imán, de aproximadamente 4600kg, tiene una homogeneidad igual o inferior a 5ppm. El entorno del paciente en este dispositivo es de 95cm de diámetro en ambos extremos, máxima capacidad de peso de 250kg y además dispone de varias soluciones acústicas para reducir el ruido producido [33].

4.2.2 Impresora 3D

Para la impresión de la pieza de fruta, se utilizará una impresora disponible en el Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular de la Universidad Politécnica de Valencia, una Prusa i3 mk2 (figura 16). Esta impresora, desarrollada por Josef Prusa, es una de las impresoras 3D más utilizadas del mercado en la actualidad.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA



Figura 16. Impresora 3D Prusa i3 mk2 [34]

Las especificaciones de esta impresora incluyen un volumen de construcción máximo de 10500cm^3 , altura de la capa de 0.05mm y una media de consumo de 70W . Además, permite una rápida impresión, realiza la nivelación y compensación de manera automática y tiene un diseño de marco abierto para facilitar su uso [34].

El material utilizado para la impresión es ácido poliláctico (PLA). Este es uno de los materiales más utilizados para la impresión 3D dado que es un polímero fabricado a partir de recursos renovables que se puede formular para resultar rígido o flexible. Resulta de especial interés su gran utilidad en el mundo de la medicina y la ingeniería biomédica, ya que resulta biodegradable y bioabsorbible, candidato ideal para implantes en tejidos y hueso o como material de sutura [35].

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo de fin de master se han llevado a cabo, de manera simultánea, tres líneas de trabajo diferenciadas. Por un lado, la planificación del taller como tal, donde se realizará en primer lugar un estudio de los principios básicos de la resonancia magnética, para crear un curso teórico formado por unidades didácticas que permitan a los niños comprender el funcionamiento y la importancia de estas técnicas. Por otro lado, se plantearán diferentes experimentos y juegos prácticos que introduzcan a los niños en un entorno de educación STEM para asimilar los conceptos explicados anteriormente en el curso teórico. Por último, se realizará la adquisición de imágenes de resonancia magnética, con su debido procesamiento (reconstrucción, segmentación, procesado), para mostrar a los niños todo el proceso de manera más visual.

5.1 PLANIFICACIÓN DEL TALLER

La planificación del taller se ha llevado a cabo siguiendo diferentes procesos, con el objetivo de facilitar el aprendizaje y hacerlo más divertido para los niños.

Por un lado, la preparación del temario teórico del mismo, estudiando a qué nivel se debe abarcar para que sea educativo sin dejar de ser ameno y ligero. Para ello ha sido necesario documentación sobre talleres previos, libros o videos educativos sobre magnetismo para niños de aproximadamente 9-12 años. Sin embargo, como ya se ha explicado, no existe suficiente información sobre la resonancia magnética aplicada a esa edad y en castellano. Para lograr realizar un taller teórico para niños de esas edades, se deben estructurar las unidades didácticas de modo que todas ellas cumplan unos objetivos docentes determinados. Es importante tener claro qué conocimientos abarcará cada unidad, de modo que al finalizar el proceso, se pueda afirmar que los niños han asimilado nuevos conceptos con cada tema.

Para el siguiente bloque, el curso práctico, se han planteado diferentes experimentos para que los niños puedan jugar tras las lecciones. Estos experimentos irán intercalados entre unidades temáticas, para servir de apoyo a los conocimientos explicados en el bloque teórico. Para lograr este objetivo, se ha investigado páginas web de experimentos y catálogos online para buscar ideas. También han servido de inspiración diferentes videos de *youtube* donde sí ha sido más sencillo encontrar ideas afines a las necesidades.

También se han planteado experimentos relacionados con resonancia magnética, con el objetivo de poder incluir en las sesiones didácticas experimentos con el equipo. De esta manera, será posible demostrar la gran fuerza del imán de resonancia, así como su atracción y la acción de las líneas de campo, que ejercen fuerzas a los materiales con los que entran en contacto.

Por otro lado, se ha trabajado con las imágenes DICOM, utilizando herramientas como Photoshop, AfterEffects y Mango para crear videos animados en color o en blanco y negro de imágenes que muestren el avance de los cortes, haciendo notar las diferentes regiones de cada pieza.

5.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA

5.2.1 Adquisición de las imágenes

La adquisición de las imágenes de resonancia magnética ha sido posible gracias a la empresa ERESA, que puso a disposición de este proyecto un equipo MRI Philips Ingenia de 3T durante una mañana completa, dado que están organizados de forma que uno de sus equipos esté disponible un día a la semana para investigación.

Para un mejor análisis de las piezas, se realizaron las imágenes utilizando diferentes técnicas de adquisición, variando ciertos parámetros, como es el caso de la resolución espacial en xy, el número de cortes adquiridos o la secuencia de pulsos. Por ejemplo, se han obtenido imágenes T1, cuyo contraste se basa principalmente en t_1 , lo que también se conoce como velocidad de pérdida de la proyección en el plano transversal, donde los tejidos con menor tiempo de relajación aparecerán más claros. Otra secuencia utilizada es T2, que se basa en t_2 o tiempo de recuperación de la proyección del eje longitudinal. En este caso, aparecerán más claras aquellas regiones con mayores tiempos de relajación.

En la figura 17, donde se muestran ejemplos de estas dos secuencias en una pieza de mango, es fácil apreciar la diferencia de color entre ellas. De esta manera, en función de la aplicación y del tipo de tejido que se pretenda analizar, será necesario utilizar una secuencia u otra.

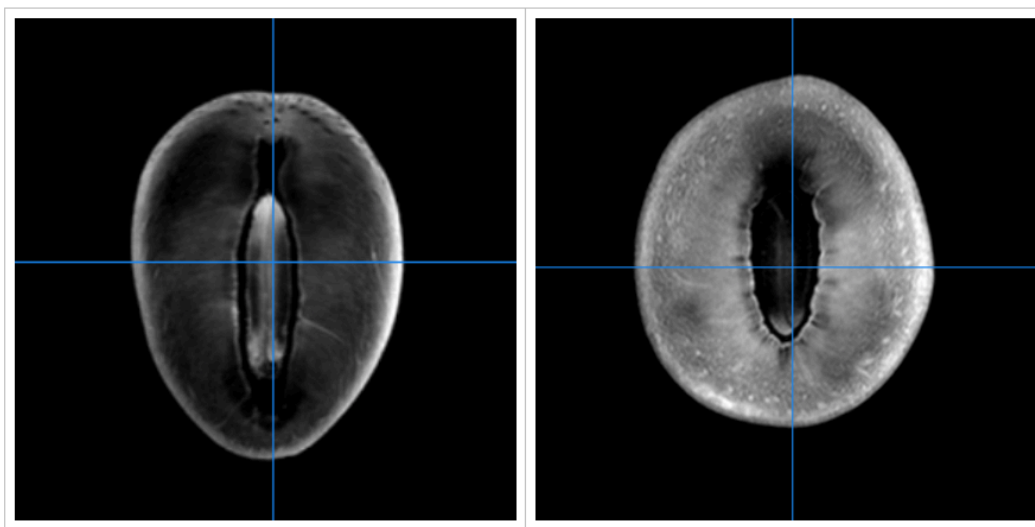


Figura 17. Comparativa entre el mismo mango adquirido con la modalidad axial T1 (A) y con la modalidad sagital T2 (B).

A pesar de que T1 y T2 son las dos secuencias más comunes, existen otras que también son recurrentes e importantes, como es el caso de STIR y FLAIR. En el caso de STIR, del inglés “Short Time Inversion Recovery”, se busca neutralizar la señal de la grasa en las imágenes de resonancia magnética. Por otro lado, FLAIR, del inglés “Fluid-Attenuated Inversion Recovery”, es utilizada normalmente para detectar pequeñas lesiones hipertensas.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Finalmente, tras la adquisición de todas las imágenes de resonancia magnéticas mencionadas, el resultado obtenido se muestra en la figura 18, donde es posible comparar las frutas y verduras reales (en este caso, una alcachofa, naranja y aguacate) con sus imágenes de resonancia magnética.



Figura 18. Comparativa entre las frutas originales (A) y su imagen obtenida por RM (B).

Una vez hecho esto, todas las imágenes se guardaron en formato DICOM, del inglés *Digital Imaging and Communication in Medicine*, de manera que posteriormente podrán ser abiertas con Mango, analizando así las diferentes tomas hasta seleccionar aquellas que presentaran una resolución mayor en los tres ejes para la reconstrucción de los cortes y una mayor resolución en los ejes xy para la obtención de las imágenes por separado.

5.2.2 Reconstrucción y segmentación

A continuación, se abrieron estos ficheros DICOM en Matlab, para empezar a realizar la reconstrucción y segmentación de los volúmenes.

Se comienza con la función *dicom23D.m* que se encarga de leer los archivos DICOM del directorio determinado y devuelve como resultado un nuevo volumen, correspondiente a la superposición de los cortes del archivo de entrada, teniendo en cuenta la localización de cada corte en el volumen final. Esta misma función también establece como salidas un vector de estructuras, una para cada corte, que contiene los datos del encabezado de cada campo DICOM especificado y una estructura de datos sobre la imagen inicial (número de cortes, extensión total en los ejes...). Finalmente, este algoritmo guarda el nuevo volumen como un archivo .mat que luego será de utilidad.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Una vez realizada la reconstrucción, se realiza un nuevo código (`planosOrtogonales.m`) que pretende comprobar que la reconstrucción se ha realizado correctamente en las tres dimensiones. Este algoritmo, utiliza como entrada el nuevo volumen obtenido y proporciona una gráfica para cada plano (axial, coronal y sagital) de modo que es posible moverte por ellos simplemente seleccionando las zonas de interés (figura 19).

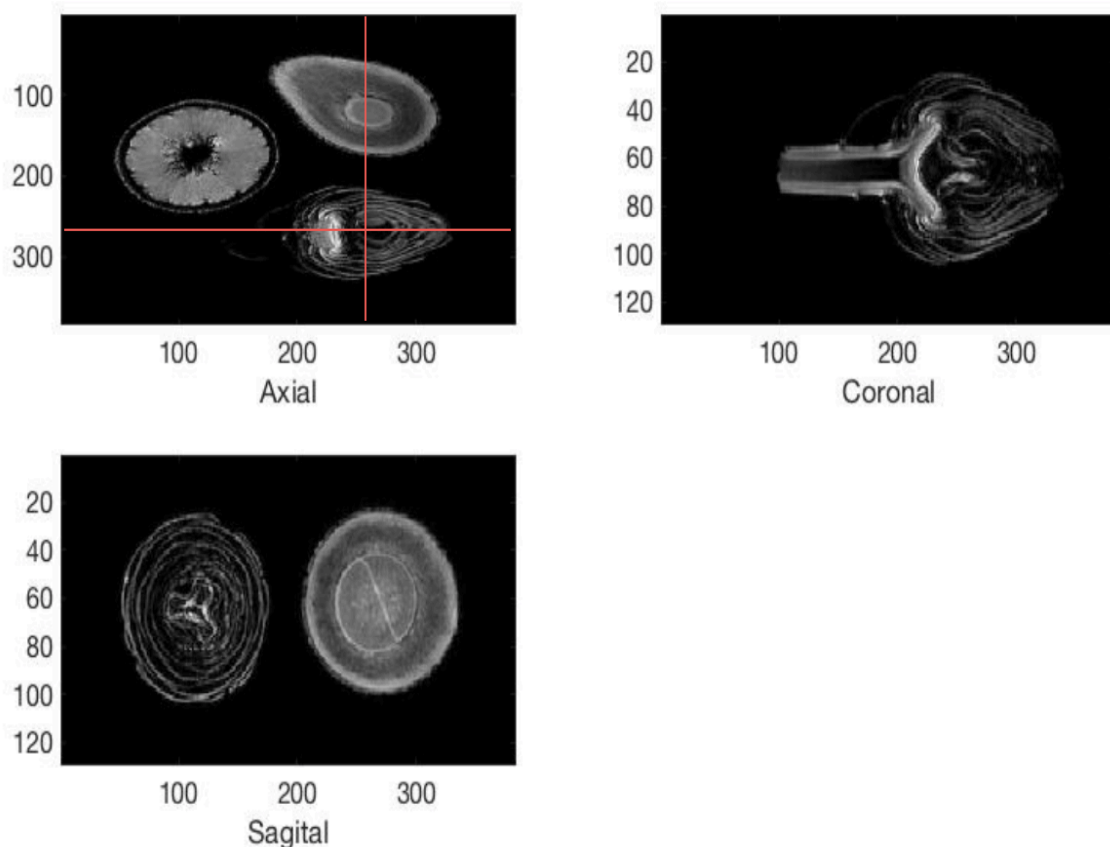


Figura 19. Representación del volumen de una naranja, una alcachofa y un aguacate en los diferentes planos del espacio. En el plano axial se muestra la línea de corte de los otros dos planos, de forma que en el plano coronal se ve la alcachofa y en el plano sagital el aguacate y la alcachofa.

Acto seguido, se continua realizando la segmentación de dicho volumen por medio de un algoritmo `KMeans3D.m`, al que se debe introducir como entradas el volumen inicial (proporcionado por `dicom23D.m`) y el número de clases que se pretende implementar. En este caso, como se busca diferenciar únicamente el fondo de la pieza de fruta, utilizaremos un Kmeans de dos clases ($k=2$).

Kmeans es un método de segmentación basado en técnicas de *clustering* (agrupación no supervisada de patrones en grupos). La asignación de cada dato con su *cluster* se realiza teniendo en cuenta sus características. Más explícitamente, se asigna a cada dato el cluster que se encuentre más cerca en términos de centroide (o media).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Seguidamente, se realizará la segmentación con Matlab. En este caso, debido a que la segmentación por Kmeans no llegaba a diferenciar la superficie de la pipa con el fondo, la mejor opción es, por un lado, realizar la segmentación manual de pipa, y por otro lado, considerar el volumen de la pieza de fruta como un sólido, y eliminar los posibles huecos existentes en su interior por medio de un filtrado y tratamiento morfológico de las imágenes obtenidas.

Para continuar con la segmentación de la pipa de las frutas (en este caso, el mango y el aguacate), se ha utilizado un programa de segmentación manual, ITK-SNAP, que te permite seleccionar plano por plano la región de interés, hasta obtener el volumen completo de la pipa, como se muestra en la figura 20, que se guardará como un fichero .nii.

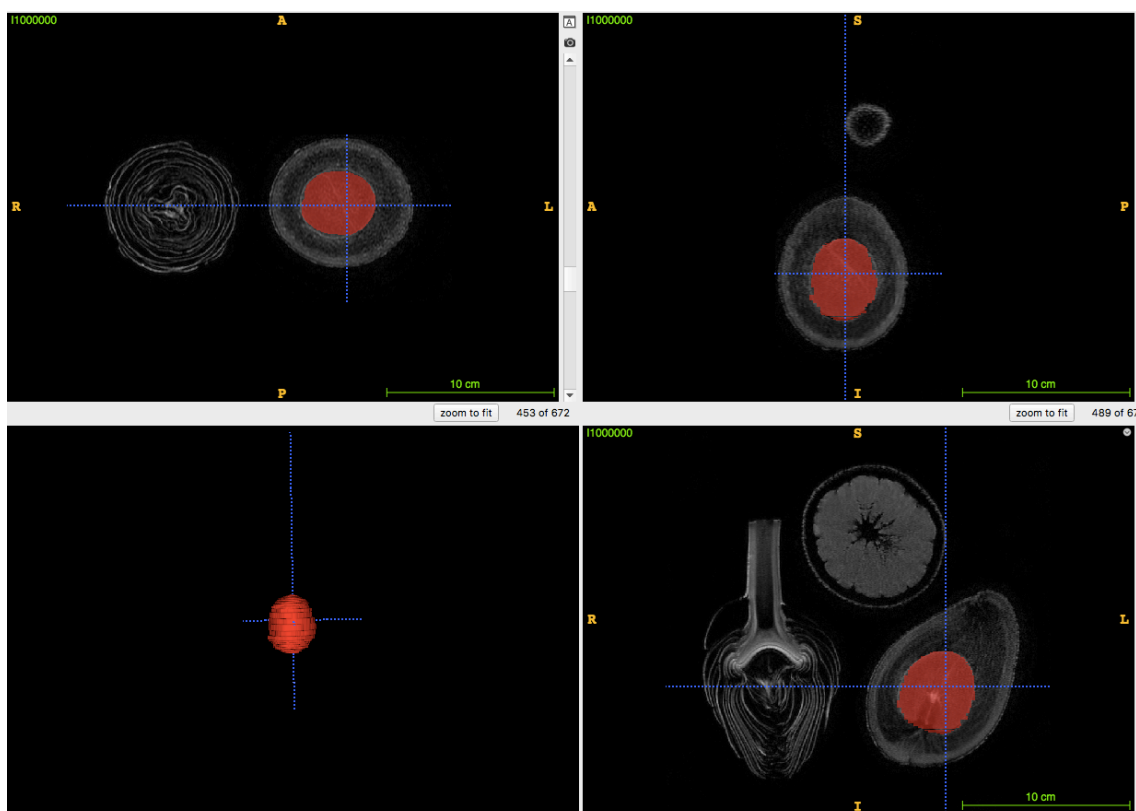


Figura 20. Segmentación manual de la pipa de un aguacate (superficie en rojo) con el programa ITK-SNAP. Visión de los cortes axial, sagital, coronal y del volumen de la pipa.

Por otro lado, como se ha explicado anteriormente, se deberá considerar la fruta como un único elemento sólido. Para ello, se han utilizado dos filtros morfológicos, la dilatación y la erosión, con un elemento estructurante esférico de radio entre 5 y 10 dependiendo del caso. En primer lugar, la dilatación calcula el máximo del vecindario, lo que provoca un engrosamiento de las figuras, eliminando así los agujeros y entrantes estrechos. A continuación, la erosión calcula el mínimo del vecindario, haciendo más finas las figuras para que vuelvan a su tamaño original. En la figura 21 se puede observar el resultado de este filtrado.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

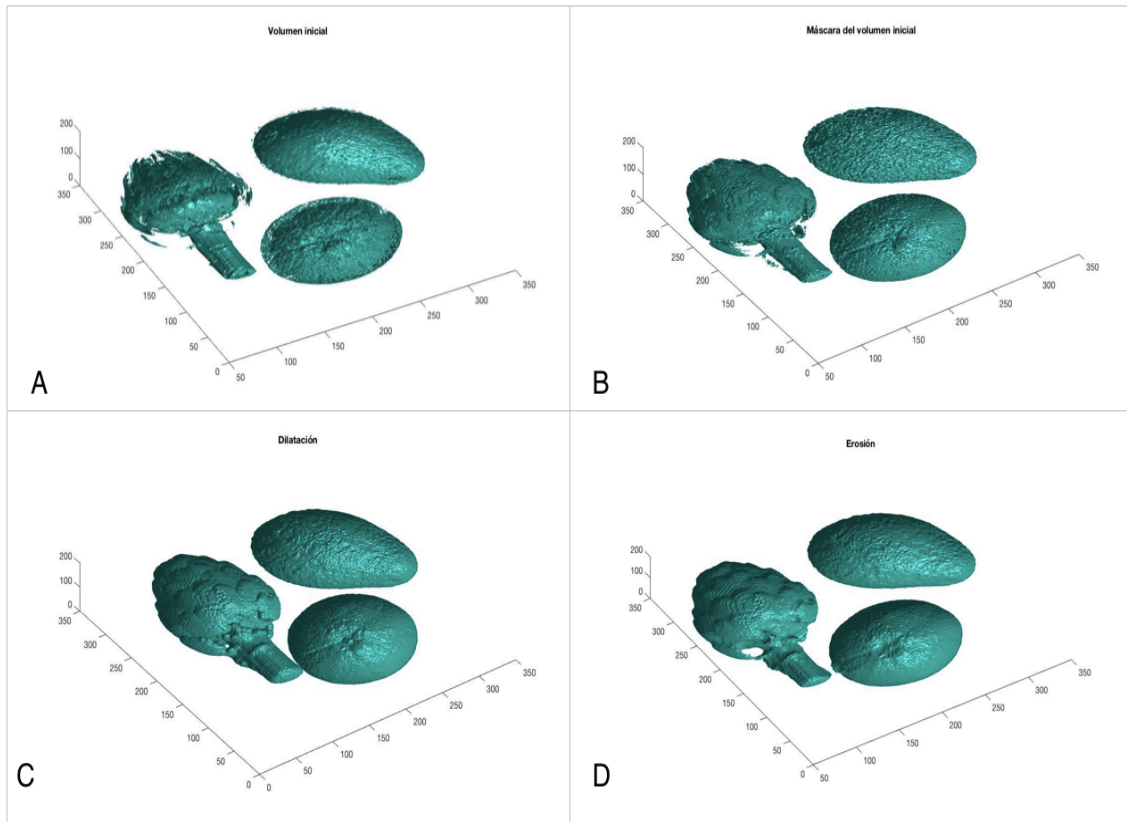


Figura 21. Segmentación y filtrado morfológico del volumen. A) Volumen inicial obtenido como resultado de dicom23D, B) Máscara del volumen tras la segmentación por Kmeans3D, C) Resultado de la dilatación del volumen, D) Resultado de la erosión del volumen.

A continuación, se rellenarán los posibles huecos existentes en el interior del volumen gracias al comando *imfill* y se cargará la pipa de la pieza de fruta gracias al comando *niftiread* proporcionado por Matlab. Se realizarán las transformaciones pertinentes, como cortes en los planos para seleccionar una única fruta o traslaciones para que ambas partes encajen a la perfección, y se realizará la suma o resta de la pieza de fruta con la pipa, con el objetivo de obtener un agujero en su zona correspondiente.

Finalmente, se guardará el volumen final obtenido en un fichero *.stl* gracias a la función *stlwrite* (figura 22).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

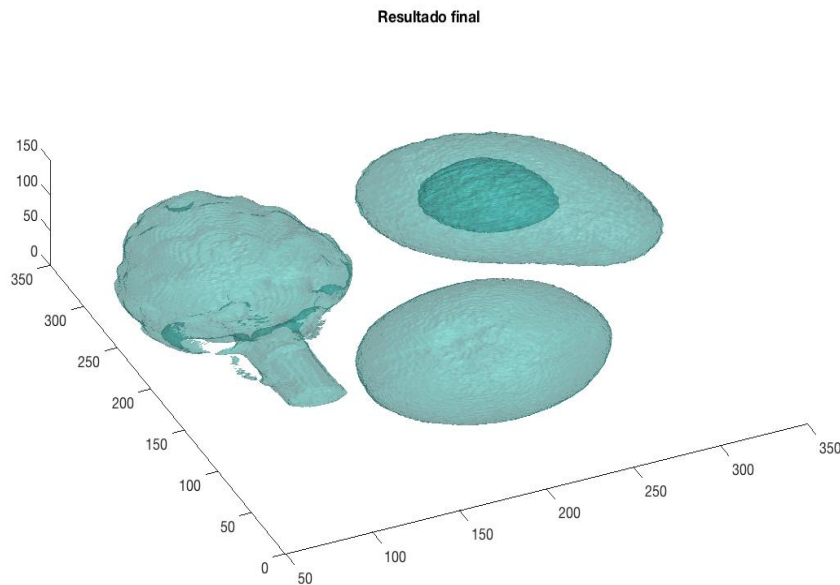


Figura 22. Resultado final tras la reconstrucción y segmentación.

5.2.3 Procesamiento

Con el objetivo de ultimar detalles y analizar los resultados obtenidos con la reconstrucción y segmentación realizada, se han utilizado dos programas de procesado y edición digital de mallas: Meshlab y Meshmixer (figura 23).

Con estos programas se han llevado a cabo tres operaciones:

- En primer lugar se han eliminado aquellos pequeños fragmentos de otras piezas de fruta que no eran de interés en algunos casos, por medio de una herramienta de selección de componentes.
- También se ha realizado un suavizado de las estructuras, para evitar posibles defectos producidos en forma de picos o agujeros y ruido. El filtro que se ha aplicado para ello es un *Laplacian Smooth* de tres pasos.
- Finalmente, dado que el tamaño del vóxel no era isótropo, se han debido estabilizar sus dimensiones en los diferentes ejes. Para ello, se ha utilizado Mango para determinar las dimensiones iniciales de vóxel, viendo así en cada caso que transformación se debía realizar. Se ha utilizado un filtro de escalado no uniforme, determinando para cada dimensión el valor apropiado.

5.2.4 Impresión 3D

Para la impresión 3D, se seleccionó una fruta con pipá y se procesó para que ésta estuviera partida por la mitad en dos secciones: una con el hueso y otra con el agujero del mismo. Una vez realizado esto, se introdujeron en la impresora el escalado real de dicha fruta en función de la información que indicaban los ficheros DICOM.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

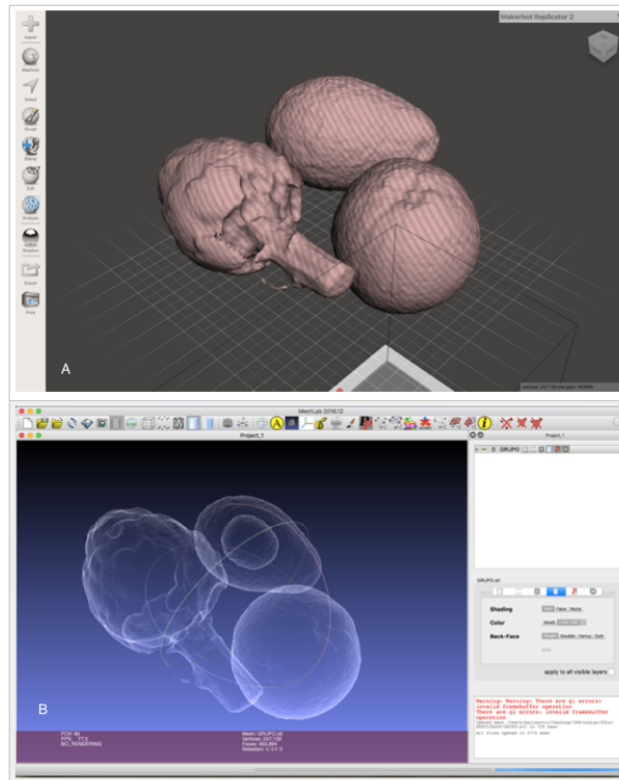


Figura 23. Visualización de conjunto de tres frutas por medio de A) Meshmixer y B) Meshlab con un filtro de rayos X para ver a través.

Para evitar que ambas partes fueran incompatibles, se redujo ligeramente el tamaño de la pipa (dado que sino, no habría sido posible encajar ambas partes). La impresión se llevó a cabo gracias a la herramienta de *software* Ultimaker Cura. Además, como ya se ha explicado anteriormente, se utilizó una impresora 3D Prusa i3 mk2, utilizando como material de impresión el ácido poliláctico (PLA).

6. RESULTADOS

En este apartado se van a introducir todos los resultados obtenidos de este trabajo de fin de master, clasificados en diferentes secciones:

- Bloque 1. Curso teórico: unidades didácticas
- Bloque 2. Curso práctico: experimentación
- Bloque 3. Procesamiento de imágenes por resonancia magnética

6.1 UNIDADES DIDÁCTICAS

Se plantea la realización de diez unidades didácticas que conformarán el curso teórico de resonancia magnética para los niños. Estas unidades se han realizado en PowerPoint, con animaciones e imágenes para hacerlo más visual y una voz que off que va explicando los conceptos. De esta manera, es posible hacer pequeñas paradas entre diapositivas que permitan a los niños preguntar las posibles dudas que les vayan surgiendo, así como asimilar los conceptos a su ritmo. Además, se busca que sean unidades cortas para evitar que resulten aburridas.

Las unidades didácticas, que se detallan a continuación, son las siguientes:

1. Magnetismo: orígenes y definición
2. ¿Qué son los imanes?
3. Campo magnético y líneas de campo
4. Magnetismo terrestre
5. Tipos de materiales y su interacción
6. Imagen médica por resonancia magnética
7. Equipos de MRI
8. Funcionamiento de los equipos de resonancia magnética
9. Parámetros importantes de los equipos de resonancia magnética
10. Estructuras anatómicas reales

6.1.1 UD1. Magnetismo: orígenes y definición.

Introducción al magnetismo comenzando por Tales de Mileto y su método científico. Se comentan los primeros descubrimientos realizados en el campo y el origen del magnetismo como tal. Además, se introduce un video breve que muestra la interacción del mineral magnetita con pequeños objetos metálicos como clips o no metálicos como gomas. Con este primer video (figura 24), se introduce el magnetismo sin abarcar teoría compleja para permitir a los niños un primer contacto suave con la materia que se va a tratar.

Los objetivos docentes que se busca cumplir son:

- Introducción al tema del magnetismo
- Familiarización con la historia del magnetismo

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

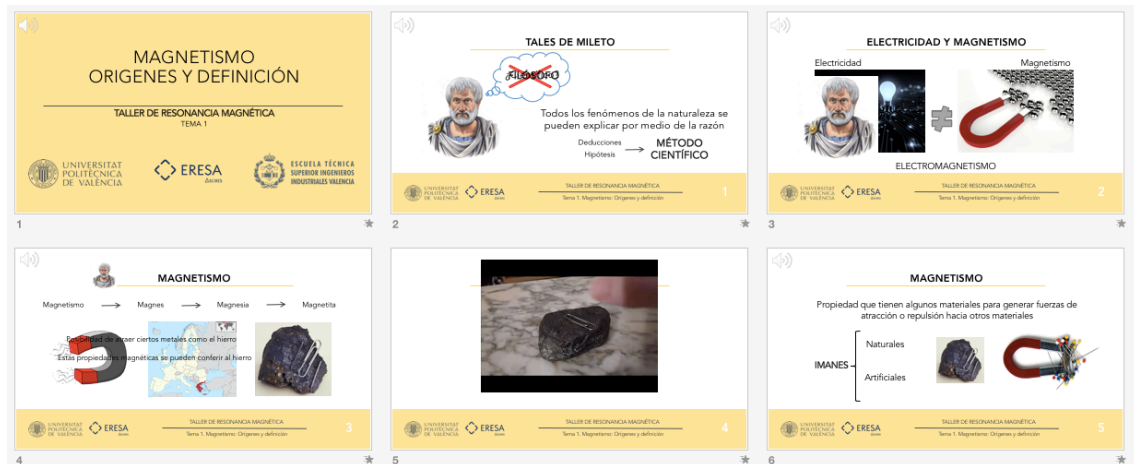


Figura 24. Diapositivas de la unidad temática 1: Magnetismo: orígenes y definición.

6.1.2 UD2. ¿Qué son los imanes?

En esta unidad didáctica, se realiza una clasificación de los imanes en función de su origen y la duración de sus propiedades magnéticas. También se explica qué son los polos magnéticos y las posibles disposiciones que pueden tener en los imanes en función de su morfología. Se detallan las propiedades principales de los imanes: atracción y repulsión de los polos magnéticos y el hecho de que los polos estarán siempre presentes a pesar de que se produzcan roturas en el imán. En este caso, se incluye un video que muestra las interacciones que tienen lugar entre diferentes tipos de imanes, así como su atracción o repulsión en función de qué polos entren en contacto. La figura 25 muestra el esquema de las dispositivas de esta unidad.

Los objetivos docentes de la segunda unidad son:

- Que el alumno identifique qué es un imán, así como la localización de los polos
- Que se asimilen sus propiedades

6.1.3 UD3. Campo magnético y líneas de campo

Este tema es una breve introducción al campo magnético. Para que sea fácil de entender y asimilar para los niños, el tema comienza explicando qué es un átomo y cuáles son sus cargas. A continuación, se plantea un mapa imaginario en el que se encuentra anclada en la celda central una carga positiva. De esta manera, se muestra por medio de animaciones qué sucedería al situar en dicho mapa otra carga (positiva o negativa), de modo que la carga que no está fija se alejaría o acercaría a la primera. Si entendemos ese movimiento como un vector representado por una flecha, es posible rellenar el mapa completo con flechas que indiquen el movimiento que tendría la carga en cada punto, como se ve en la figura 26.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

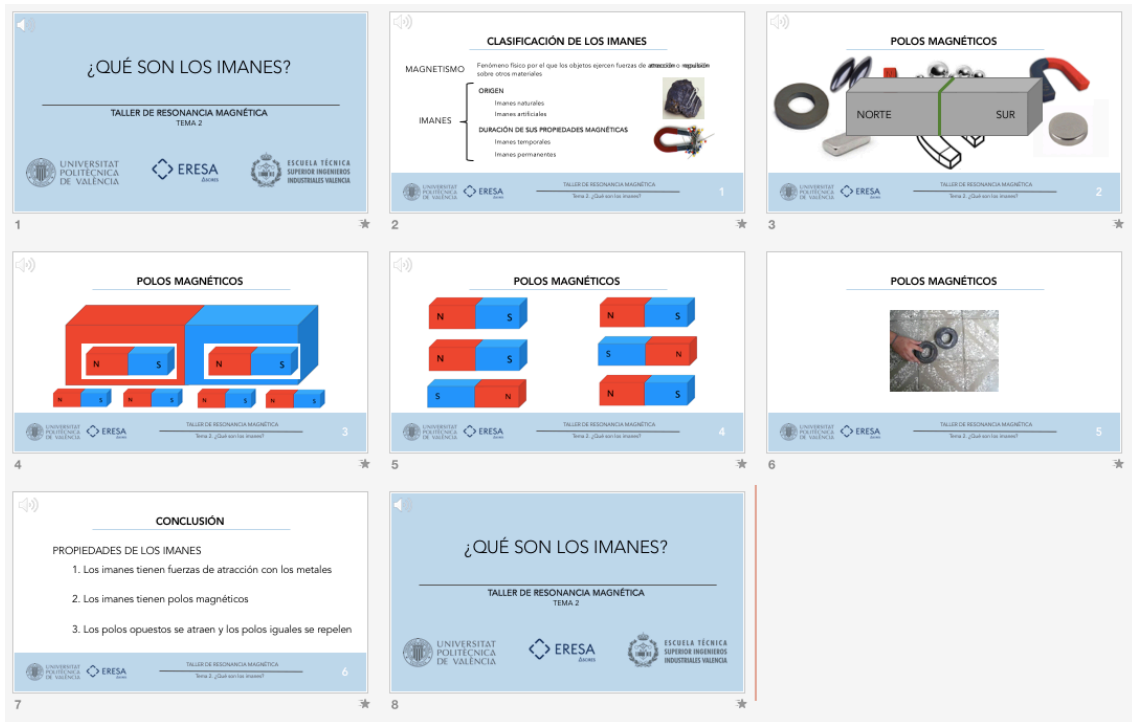


Figura 25. Diapositivas de la unidad temática 2: ¿Qué son los imanes?

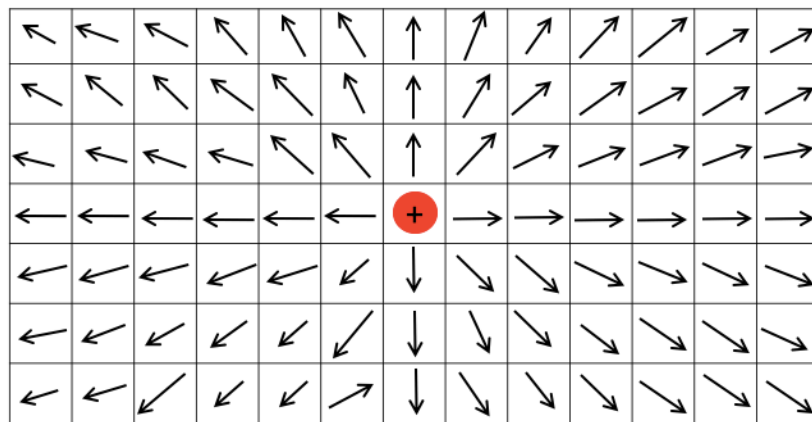


Figura 26. Representación de un mapa imaginario y el vector de movimiento que tendrían cargas positivas colocadas en cada celda del mapa.

Una vez entendido el modelo sencillo de las líneas de campo, se plantea que el campo magnético sigue el mismo sistema, solo que en ese caso las líneas de campo muestran la orientación de unos imanes pequeños al colocarlos en el entorno cercano de un imán grande. Como se ha explicado previamente, los imanes pequeños se orientarán siguiendo sus atracciones naturales, es decir, norte con sur. Finalmente se introducen una serie de videos explicativos que muestran por medio de imanes potentes y limadura de hierro la disposición 3D de las líneas de campo en torno al imán. Todo esto se muestra de manera esquematizada en la figura 27.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

En este caso, los objetivos docentes es:

- Entender qué son las líneas de campo
- Identificación del sentido de las líneas de campo en función de la carga
- Comprensión del concepto de campo magnético

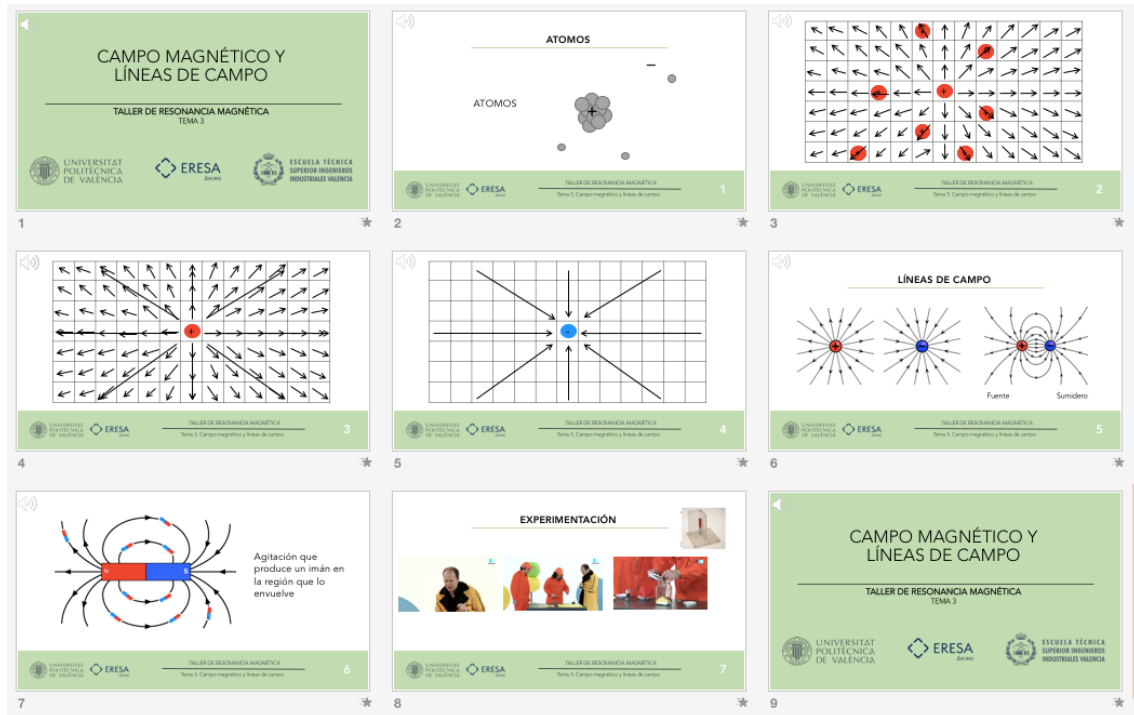


Figura 27. Diapositivas de la unidad temática 3: Campo magnético y líneas de campo.

6.1.4 UD4. Magnetismo terrestre

Se plantea la Tierra como un imán gigante debido a las sustancias metálicas de su núcleo en conjunto con el movimiento de rotación. Después, se diferencian los polos magnéticos terrestres de los geográficos, de modo que los primeros tienen relación con el magnetismo terrestre y los segundos, con la orientación de la tierra con respecto al sistema solar. Se explica cómo funcionan las brújulas gracias al magnetismo terrestre: las brújulas no indican el norte magnético sino el sur, que casualmente coincide con el norte geográfico. Lo que conocemos comúnmente como norte es el sur geográfico del planeta. Estos conocimientos se apoyan en recursos animados y videos con brújulas, con el objetivo de que los niños se familiaricen con estos conceptos. La figura 28 muestra el esquema de diapositivas de la unidad.

Al finalizar esta unidad, los objetivos didácticos cumplidos son:

- Comprensión de la Tierra como imán
- Diferenciación entre polos magnéticos y geográficos
- Identificación de polos magnéticos y geográficos
- Entender el funcionamiento de las brújulas

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

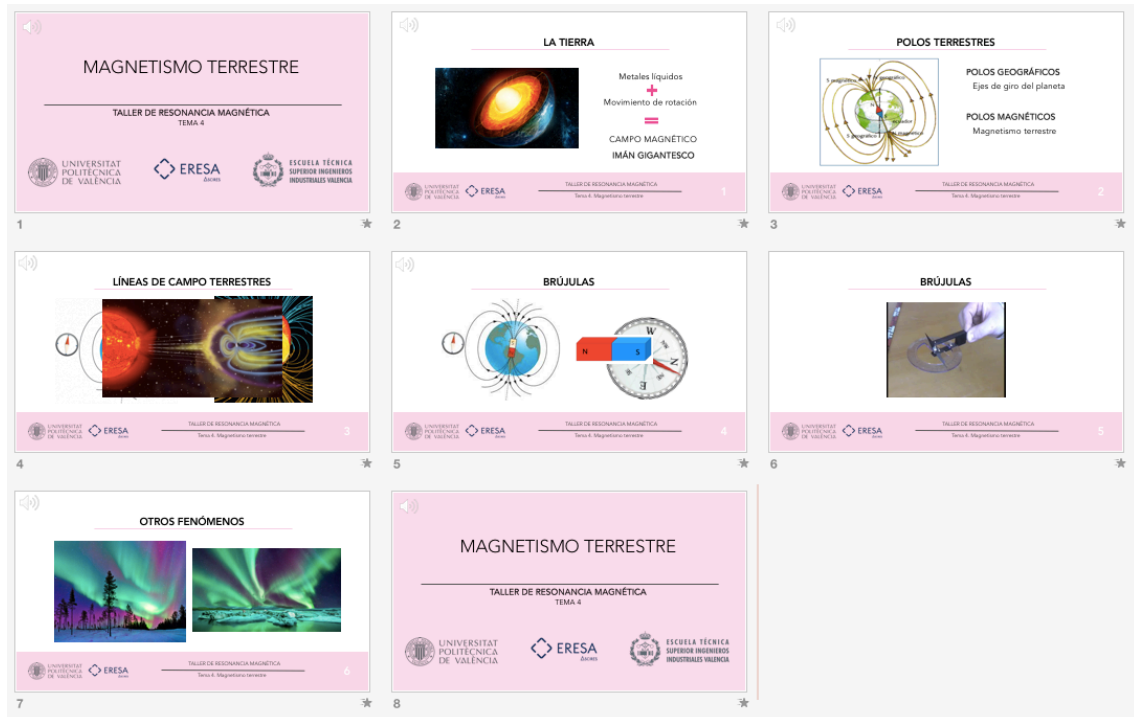


Figura 28. Diapositivas de la unidad temática 4: Magnetismo terrestre

6.1.5 UD5. Tipos de materiales y su interacción

En este apartado se explican las sustancias paramagnéticas, ferromagnéticas y diamagnéticas haciendo especial hincapié en su interacción con los campos magnéticos por medio de las líneas de campo. Se incluye un video que muestra de manera práctica cómo interaccionan los diferentes materiales (atracción o repulsión) al entrar en contacto con imanes. Esta unidad temática es más breve por ser un poco más densa, como se muestra en la figura 29.

Se asume que los alumnos deben cumplir los siguientes objetivos:

- Asimilación de los diferentes tipos de materiales
- Diferenciación de cómo interaccionan con el campo magnético
- Conocer, por lo menos, un ejemplo de cada uno de los materiales

6.1.6 UD6. Imagen médica por resonancia magnética

Esta unidad temática presenta una breve introducción a la imagen médica, explicando cuál es su función de cara al diagnóstico y la toma de decisiones del tratamiento. A continuación, se presenta la forma más común de imagen médica, la radiografía, dado que la mayoría de los niños estarán familiarizados con ella. Así, realizando una pequeña comparación entre la radiología y la resonancia magnética, será posible facilitar el entendimiento de los conceptos. En este apartado también se detallan los diferentes planos anatómicos (axial, coronal y sagital) para mostrar los diferentes puntos de vista que permiten analizar estas imágenes. Finalmente, se muestran las ventajas e inconvenientes de ambas técnicas y se comparan por medio de

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

imágenes anatómicas reales obtenidas por radiografía y resonancia magnética como se puede ver en la figura 30. En la figura 31 se muestra el esquema de las diapositivas de este apartado.

Los objetivos didácticos de esta unidad didáctica son:

- Entender qué son las imágenes médicas y para qué sirven
- Conocer al menos dos ejemplos de imagen médica
- Diferenciar la radiografía y la resonancia magnética, así como sus imágenes
- Conocer los diferentes planos anatómicos que se pueden obtener

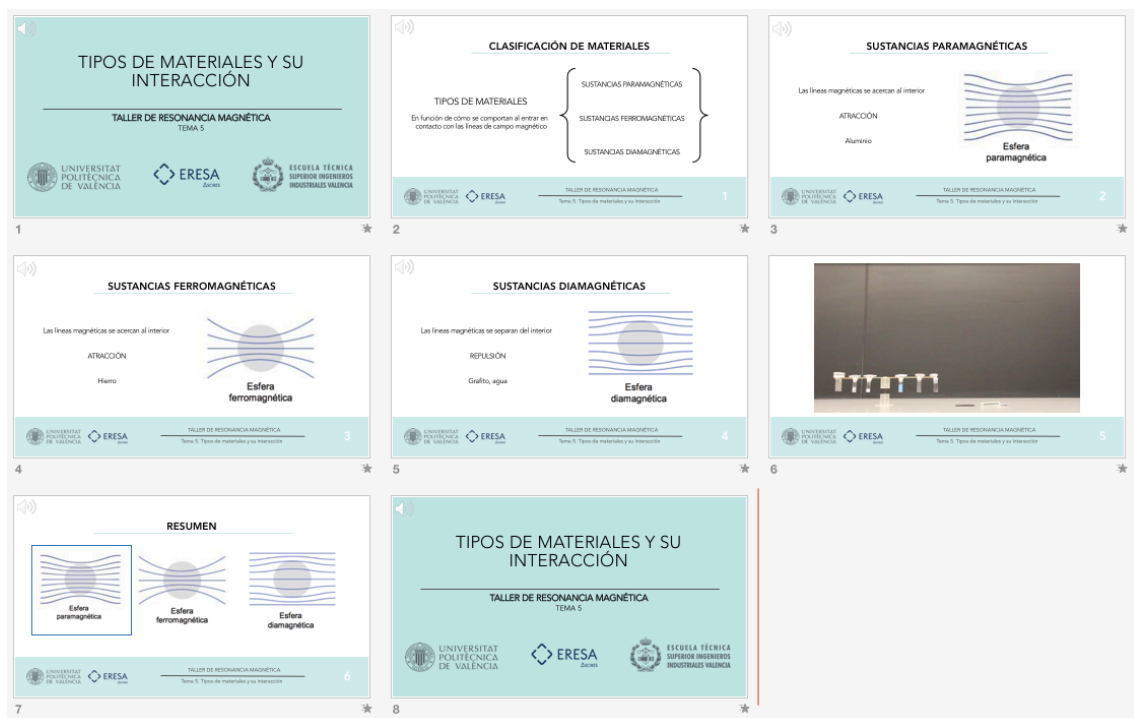


Figura 29. Diapositivas de la unidad temática 5: Tipos de materiales y sus interacciones

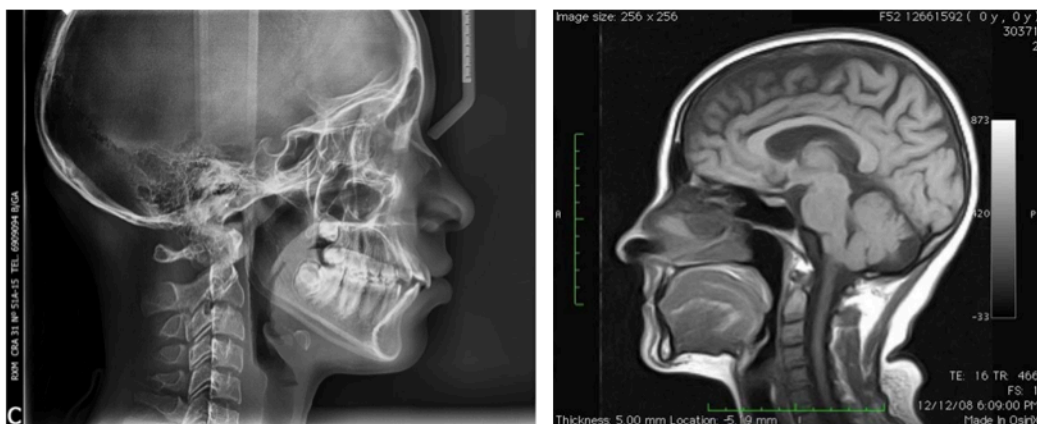


Figura 30. Comparación entre una radiografía (izquierda) y una imagen de resonancia magnética (derecha).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

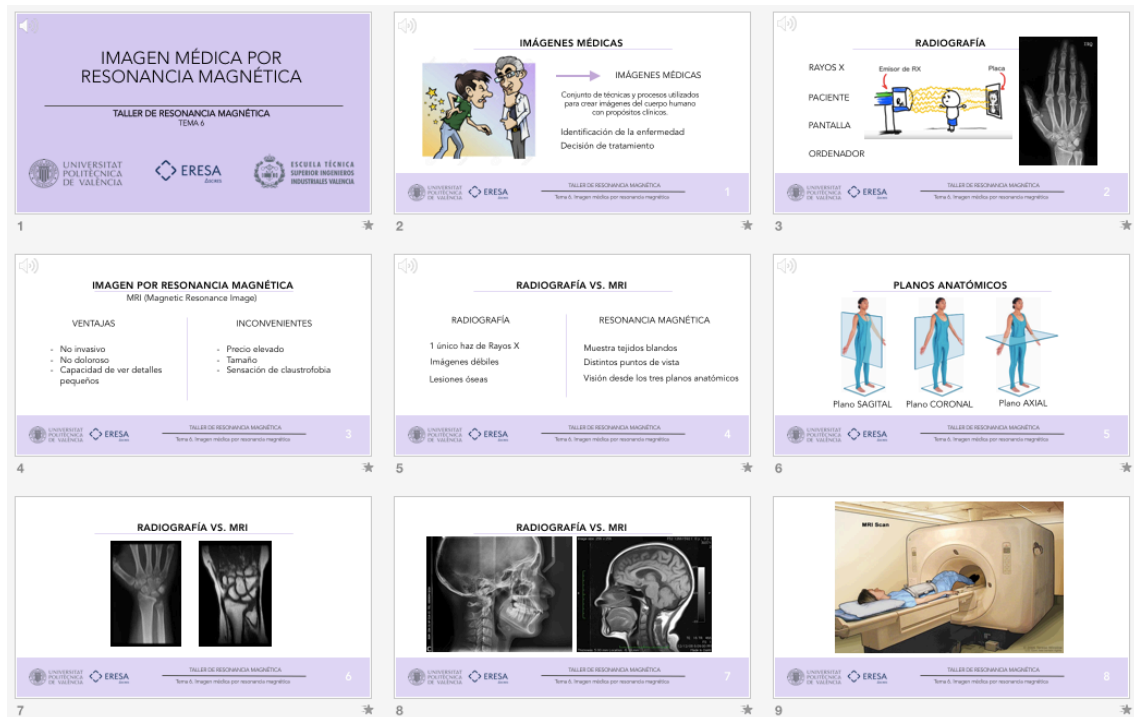


Figura 31. Diapositivas de la unidad temática 6: Imagen médica por resonancia magnética

6.1.7 UD7. Equipos de MRI

En este apartado se detallan los diferentes componentes de un equipo de resonancia magnética, que son el imán, las bobinas de gradiente, las bobinas de RF y la camilla móvil donde se coloca el paciente. En este caso, el video explicativo muestra cómo reaccionan los distintos materiales al entrar en contacto con el campo magnético del imán del equipo. Además, se explica brevemente cuál es el procedimiento a seguir cuando se va a realizar un estudio por MRI: se deben dejar las pertenencias metálicas fuera de la sala de estudio, tumbarse en la camilla, la camilla se desplazará al interior del equipo y finalmente mantenerse inmóvil durante todo el proceso para facilitar que las imágenes obtenidas sean de buena calidad, sin importar cuáles sean los sonidos que produzca el equipo. El esquema de las diapositivas de esta unidad temática se puede observar en la figura 32.

Los objetivos didácticos de la séptima unidad temática son:

- Identificar los componentes de un equipo de resonancia magnética
- Conocer y asumir la potencia de los imanes de los equipos de MRI
- Conocer cuál es el procedimiento a seguir para un estudio de resonancia magnética
- Entender por qué deben dejarse las pertenencias en una sala separada

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

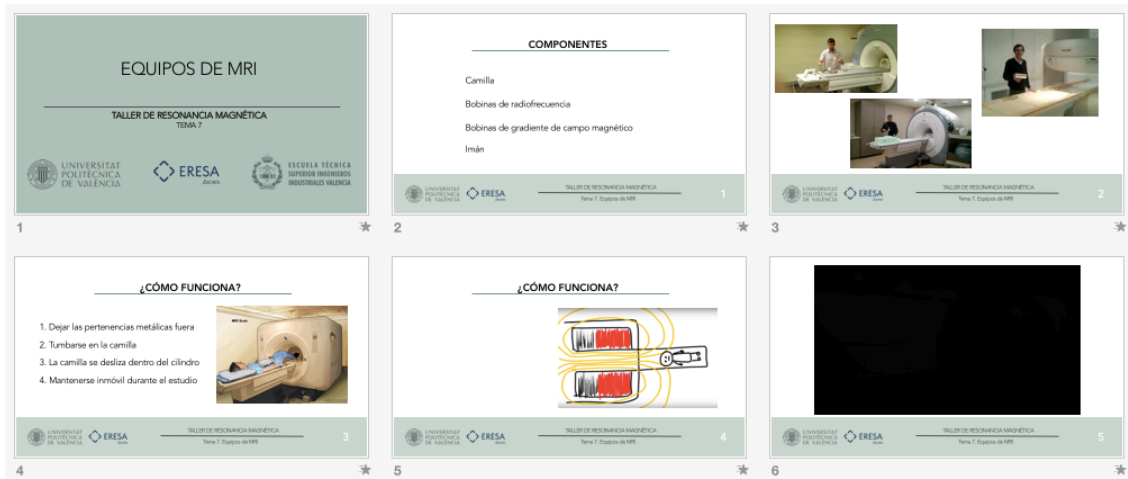


Figura 32. Diapositivas de la unidad temática 7: Equipos de MRI

6.1.8 UD8. Funcionamiento de los equipos por resonancia magnética

Este tema plantea una explicación sencilla y concisa sobre cómo se realiza la adquisición de las imágenes de una manera más técnica. Teniendo en cuenta la edad de los niños que asisten al curso, se explica que las partículas se orientan al entrar en contacto con el campo magnético, sin embargo, cuando se lanzan los pulsos de radiofrecuencia, las partículas se excitarán, es decir, cogerán energía, lo que hará que se pongan a girar muy rápido. Cuando los pulsos terminan, las partículas vuelven a su posición original soltando poco a poco la energía que habían cogido. Finalmente el ordenador detecta la velocidad a la que se han recuperado, y formará la imagen con esa información. En la figura 33 se muestran los dibujos utilizados para explicar todo este proceso y en la figura 34 el esquema de las diapositivas de la unidad temática.

Los objetivos docentes son:

- Entender que las partículas se orientan con el campo magnético
- Conocer de manera breve cómo funciona la precesión de las partículas
- Asimilar que se recoge información sobre la velocidad de recuperación
- Entender que el ordenador recoge la información que formará la imagen

6.1.9 UD9. Parámetros importantes de los equipos de resonancia magnética

En este apartado se explican de manera breve los parámetros que se pueden modificar en función de qué tipo de exploración se esté obteniendo: relación señal-ruido, relación contraste-ruido, resolución espacial y tiempo de adquisición. Además se incluye una explicación de cómo variará la imagen final en función de dichos parámetros. En la figura 35 se muestra el esquema de diapositivas de esta unidad temática.

Los objetivos docentes son:

- Conocer que ciertos parámetros pueden variar la calidad de las imágenes
- Entender los conceptos de ruido, contraste, resolución espacial y tiempo de adquisición

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

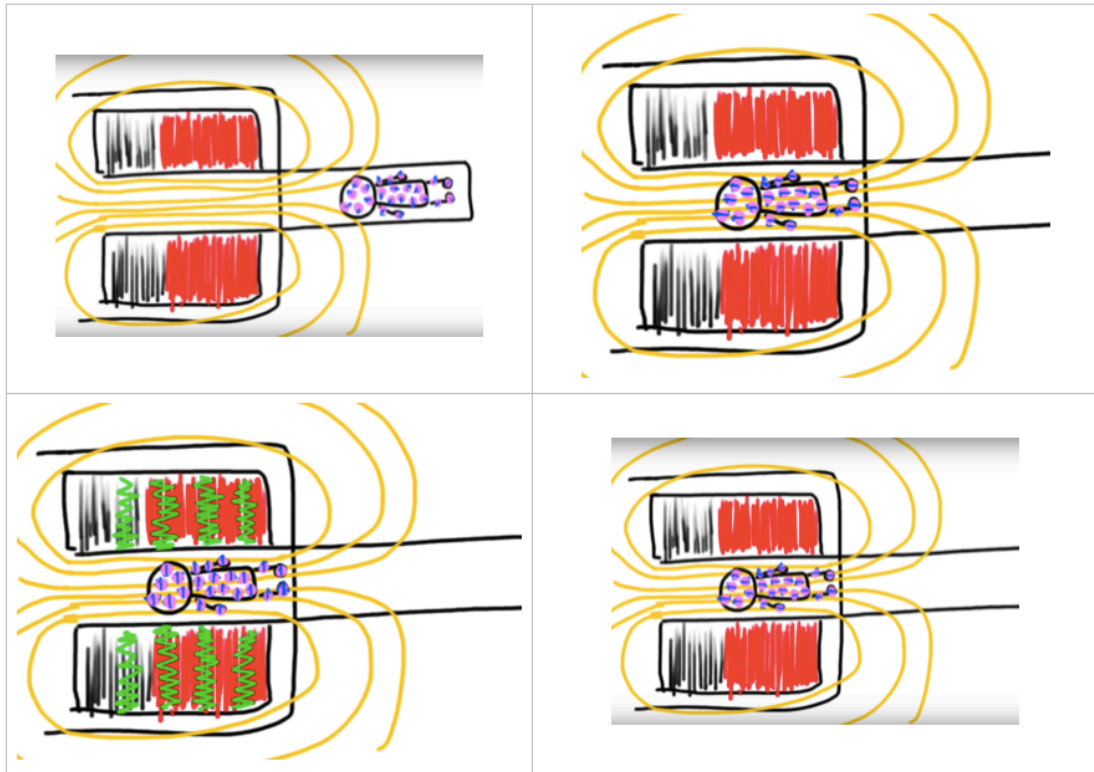


Figura 33. Dibujos utilizados para la explicación del funcionamiento de la adquisición de las imágenes médicas por medio de un equipo de resonancia magnética

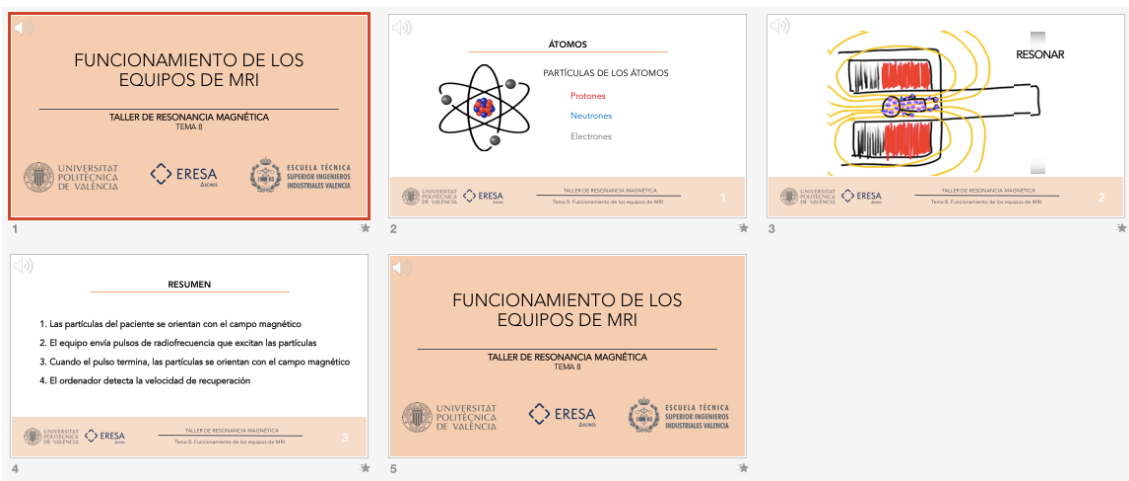


Figura 34. Diapositivas de la unidad temática 8: Funcionamiento de los equipos de MRI

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

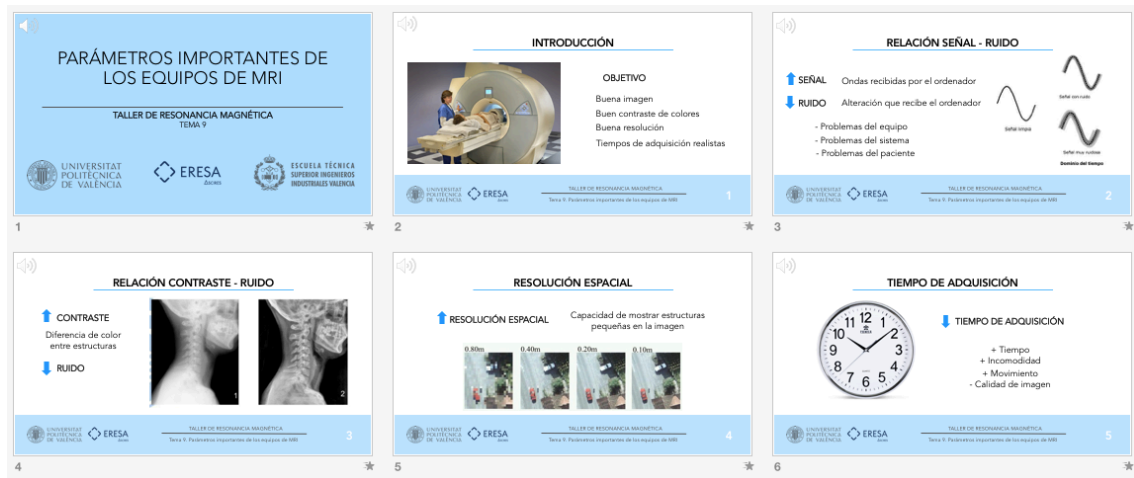


Figura 35. Diapositivas de la unidad temática 9: Parámetros importantes de los equipos de MRI

6.1.10 UD10. Estructuras anatómicas reales

En la última unidad temática, se propone presentar casos reales para que los niños puedan visualizar todo el proceso completo en un caso real. Para hacerlo más visible, se ha elegido como estructura anatómica el cerebro, dado que permite mostrar un tejido blando interno que es comúnmente analizado por equipos de resonancia magnética.

En primer lugar, el paciente deberá introducirse en el equipo de resonancia magnética por un período de 30 a 60 minutos aproximadamente. Durante todo este tiempo, deberá permanecer muy quieto para evitar ruido en la imagen final. Una vez terminado el estudio, el ordenador tendrá toda la información necesaria para generar las imágenes de los cortes del cerebro clasificados.

Con cortes del adquiridos, se podrá generar la reconstrucción del cerebro por medio de programas de procesamiento de datos. De esta manera, se tendrá el volumen completo del órgano, que se podrá ver gracias a ciertos programas de edición.

A continuación, esta información se le proporcionará a los médicos expertos, que podrán analizar las estructuras y determinar si existen tumores o regiones afectadas por alguna patología. Gracias a esta técnica de imagen, el médico es capaz de realizar una toma de decisiones más segura, dado que conoce de primera mano qué hay en el interior del paciente, esto es lo que se conoce en la actualidad como medicina personalizada.

Finalmente, también es posible introducir esta información en las impresoras 3D para obtener el órgano impreso a tamaño real. Sin embargo, no es muy común realizar la impresión 3D en los casos reales. En la figura 36 se muestra de manera gráfica todo este proceso aplicado a un estudio de resonancia magnética de un cerebro.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Con esta última unidad didáctica los objetivos docentes son:

- Conocer el funcionamiento completo del proceso
- Recordar los conocimientos previamente adquiridos
- Analizar imágenes de resonancia magnéticas reales en cortes
- Observar el volumen completo reconstruido



Figura 36. Representación del proceso de un estudio de MRI cerebral: A) Adquisición de las imágenes con el equipo de MRI, B) Los diferentes cortes obtenidos (axial) del cerebro, C) Reconstrucción 3D del modelo cerebral, D) Impresión 3D del cerebro del paciente.

Por último, en la figura 37 se presenta un esquema sencillo que abarca todos los procesos llevados a cabo a lo largo de este bloque.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

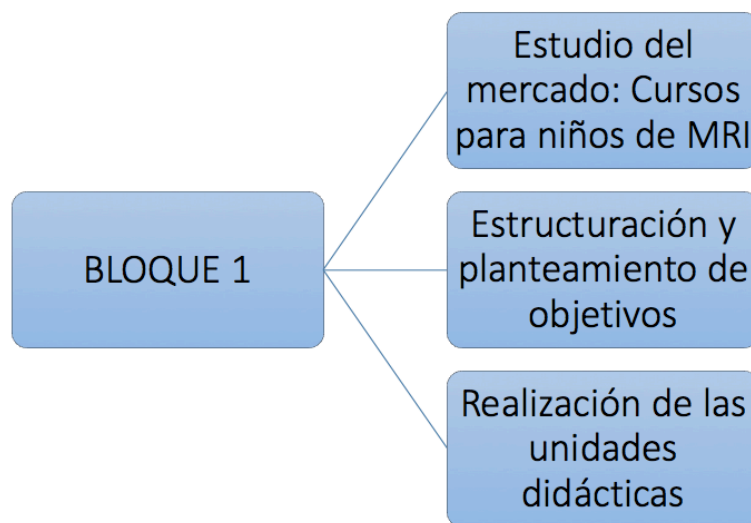


Figura 37. Diagrama del bloque 1 del proyecto

6.2 CURSO PRÁCTICO

Este bloque pretende complementar al bloque teórico. Se trata de una serie de experimentos, juegos y elementos gráficos que ayuden a los niños a asimilar los conceptos previamente explicados. Las diferentes secciones irán intercaladas entre las unidades didácticas, para hacer el taller más ameno y fácil de seguir.

6.2.1 Experimentos con MRI

Los siguientes experimentos tienen como principal objetivo mostrar cómo son las interacciones con ciertos materiales dentro de un equipo de resonancia magnética debido a la acción del campo magnético. Estos experimentos se realizarán en el laboratorio y serán grabados, para poder reproducirlos posteriormente en el taller. Por eso, deben ser experimentos sencillos y gráficos que permitan a los niños ver la gran potencia del campo magnético y asimilar más fácilmente los conocimientos adquiridos previamente en el curso teórico impartido con las unidades didácticas.

En primer lugar, se plantea lanzar un tubo fino de aluminio dentro del equipo con un efecto de giro. Debido a que el aluminio es un material paramagnético, se producirá una pequeña atracción, suficientemente grande como para mantenerlo “flotando” en ese espacio durante un periodo de tiempo pequeño.

El siguiente experimento que se propone es demostrar la diferencia existente al dejar caer una placa de aluminio dentro y fuera del campo magnético. Si se coloca una placa de aluminio plana de manera vertical y se suelta, ésta caería por el efecto de la gravedad. Sin embargo, si esa misma placa se coloca dentro de un campo magnético, el del equipo de MRI, la placa caerá más despacio debido a la fuerza que ejercen el campo magnético. Este mismo experimento se puede realizar también con una lámina de cobre.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Para demostrar el mismo fenómeno, se plantea utilizar una bola de aluminio. De modo que, cogiendo la bola con la mano, al intentar introducirla dentro del equipo, no se producirá ningún efecto. No obstante, si en vez de hacerlo de esa manera, lanzamos la bola, esta “chocará” con un campo invisible, que no permitirá que entre en la zona interna del equipo.

Por último, para demostrar en este caso la fuerte atracción que tiene el imán con materiales ferromagnéticos, se atará (y asegurará) un elemento de hierro pequeño, como podría ser una llave inglesa o similar, para demostrar la fuerza que existe al interactuar con un campo magnético tan potente (figura 38).



Figura 38. Representación de la potente atracción entre un elemento metálico y un equipo de MRI

6.2.2 Experimentos de magnetismo

Finalmente, en este apartado se van a exponer los experimentos que deberán realizarse en el taller. Todos ellos buscan demostrar de manera práctica los conceptos desarrollados durante las partes previas del taller, haciendo a los niños partícipes de la experimentación. Su búsqueda se ha realizado en catálogos de juguetes STEM, de ciencia experimental o compañías de comercio electrónico como Amazon. A continuación se expone una lista de todos los experimentos, junto con el principio teórico que pretenden demostrar y el fabricante que los comercializa.

1. Limaduras de hierro en torno a un imán (Ventus Ciencia Experimental Ref. 339610). Se trata de una caja con un hueco cilíndrico en el interior y una placa transparente, ambas con un gel transparente con limaduras de hierro. También se incluyen dos imanes de neodimio alargados y otro con forma de herradura (figura 39). Este equipo permite a los niños visualizar la formación de las líneas de campo en dos y tres dimensiones gracias a las dos placas. Dado que hay imanes de distintos tipos, también podrán ver la formación de las líneas de campo al haber atracción o repulsión entre los polos.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA



Figura 39. Limaduras de hierro en torno a un imán [36].

2. Limaduras de hierro en el interior de un tubo con un gel transparente (Amazon [37]). Al acercar imanes a la superficie de dicho tubo, se crearán unas figuras que representan el campo magnético (figura 40). Este experimento, similar al anterior, permite a los niños jugar con las limaduras de hierro y los imanes.



Figura 40. Limaduras de hierro en el interior de un tubo con gel transparente [37]

3. Imán en tubo de cobre (Ventus Ciencia Experimental Ref. 460215). Cuando un imán potente cae a través de un tubo de cobre, este cae sorprendentemente lento. Esto es debido a que el campo magnético del imán en movimiento induce una corriente que crea un campo magnético en sentido opuesto al campo del imán (figura 41). Con este experimentos se muestra la fuerza que puede llegar a tener el campo magnético inducido en el interior del tubo, hasta el punto de reprimir la caída del imán.



Figura 41. Caída amortiguada de un imán potente en el interior de un tubo de cobre

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

4. *Slime* magnético (Amazon [38]). *Slime* con virutas de hierro en su interior se mueve al interactuar con los imanes debido a la interacción entre el hierro con el imán (figura 42).



Figura 42. *Slime* magnético [38]

5. Pecera de imanes. Este experimento manual requiere de un recipiente grande con agua y tapones de diferentes colores (a ser posible, rojos y azules). Se deberán pegar unos imanes pequeños sobre tapones de botella, eligiendo el color del tapón en función del polo que quede en la parte superior: si el polo norte está arriba, rojo; si el polo sur está arriba, azul. Para realizar el experimento, se deben introducir en el recipiente los tapones, que se orientarán solos en el espacio debido a las atracciones y repulsiones que se producen por los polos magnéticos (figura 43).



Figura 43. Pecera de imanes flotando sobre tapones en un recipiente con agua

6. Tren magnético. Para fabricar este experimento es necesario un solenoide de alambre y una pila con varios imanes de neodimio pequeños a sus extremos. El polo norte de la pila debe estar en contacto con el polo sur del imán, mientras que el polo sur de la pila debe estar en contacto con el polo sur del imán de su lado. De esta manera, la combinación entre el campo magnético generado en la espira con la repulsión que se produce por un lado y la atracción que se produce por el otro lado, hacen que se mueva sola la pila a lo largo del solenoide (figura 44).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA



Figura 44. Tren magnético

7. Maletín para experimentos de niños con brújulas e imanes (Ventus Ciencia Experimental Ref. 598700). Este maletín (figura 45) incluye experimentos en relación con el magnetismo y las brújulas. En primer, contiene pequeños coches magnéticos que les anima investigar y posteriormente formular sus descubrimientos. La mayoría de los imanes no tienen los polos marcados, para que sean ellos mismos los que decidan cual es la polaridad de cada uno jugando con ellos. Por otro lado, contiene no solo pequeñas brújulas sencillas para que los niños busquen el norte, sino también las piezas para que ellos mismos construyan el dispositivo.



Figura 45. Maletín para experimentos de niños con brújulas e imanes [36]

8. Platos de campo magnético (Ventus Ciencia Experimental Ref. 339520). Este experimento presenta las líneas de campo como pequeños vectores que se mueven en todas las direcciones. Se trata de un juguete que permite visualizar el sentido de las líneas de campo, y por tanto el campo magnético, de un imán en las tres dimensiones del espacio por medio unas pequeñas flechas, como se muestra en la figura 46. Aunque este juguete resulta menos visual de los experimentos anteriores que utilizaban viruta de hierro, permite ver más claramente las líneas de campo como tal y la capacidad del campo magnético.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

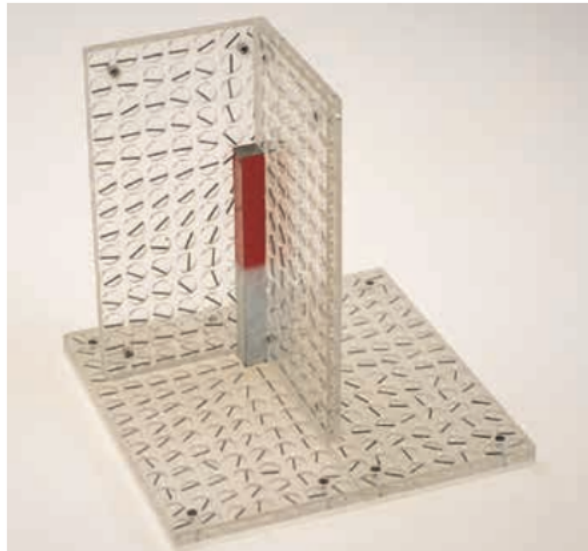


Figura 46. Platos de campo magnético [36]

9. Grafito diamagnético flotante (Ventus Ciencia Experimental Ref. 346000). Con este experimento se puede demostrar la repulsión existente entre los materiales diamagnéticos. Se trata de un pequeño imán muy potente que entra en contacto con una lámina de grafito diamagnético (**figura 47**). Debido a la fuerte repulsión entre ambos materiales, el grafito quedará flotando ligeramente por encima del imán.



Figura 47. Grafito diamagnético flotante [36]

6.2.3 Sucesión de cortes

Con el objetivo de poder visualizar de manera clara la sucesión de los cortes, se han utilizado las imágenes (en formato dicom) para crear una combinación coloreada que permita ver el interior de la pieza completa en una misma imagen. En primer lugar se han adquirido los cortes necesarios y se han ido añadiendo las capturas en un PowerPoint. A continuación, con la herramienta Photoshop, se han coloreado los diferentes cortes de las frutas y verduras adquiridas. Esto se ha logrado creando una capa de ajuste que modificará el tono y la saturación

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

de la imagen, permitiendo elegir un color acorde con la pieza de fruta o verdura con la que se esté tratando. El objetivo es mostrar una sucesión de cortes lógica, que permita visualizar el volumen completo en una única imagen. En las figuras 48-52 se pueden observar las representaciones de los volúmenes completos del mango, brócoli, melón y wiki.

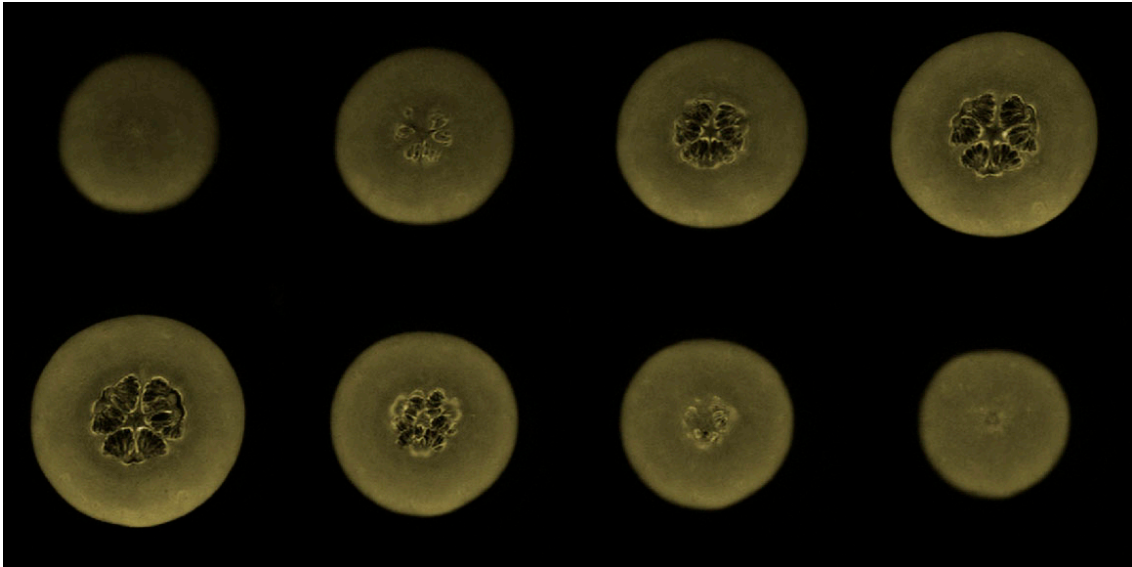


Figura 48. Representación de los diferentes cortes de un melón cantalupo (corte axial)



Figura 49. Representación de los diferentes cortes de un brócoli (corte coronal)

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

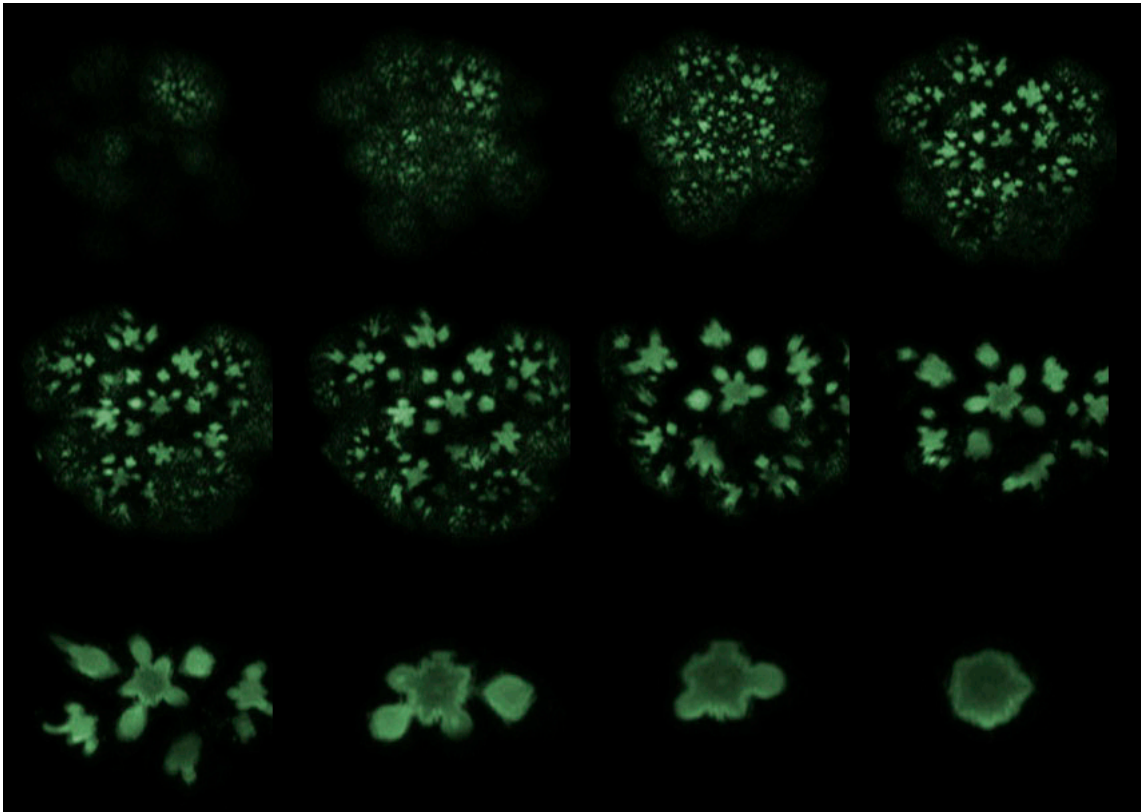


Figura 50. Representación de los diferentes cortes de un brócoli (corte axial)

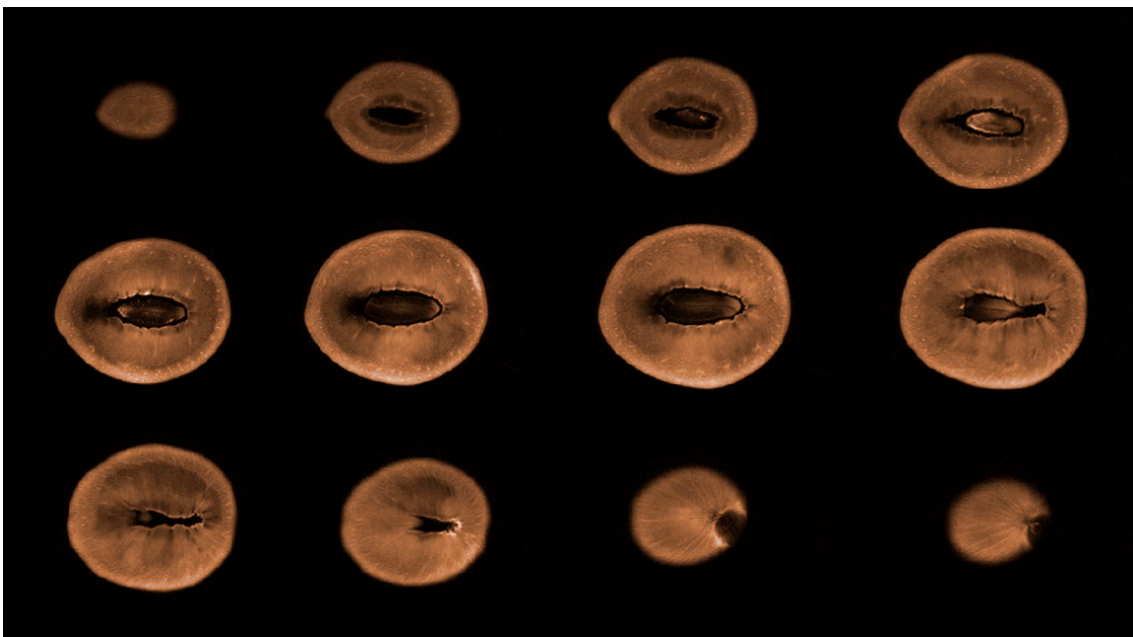


Figura 51. Representación de los diferentes cortes de un mango (corte coronal)

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

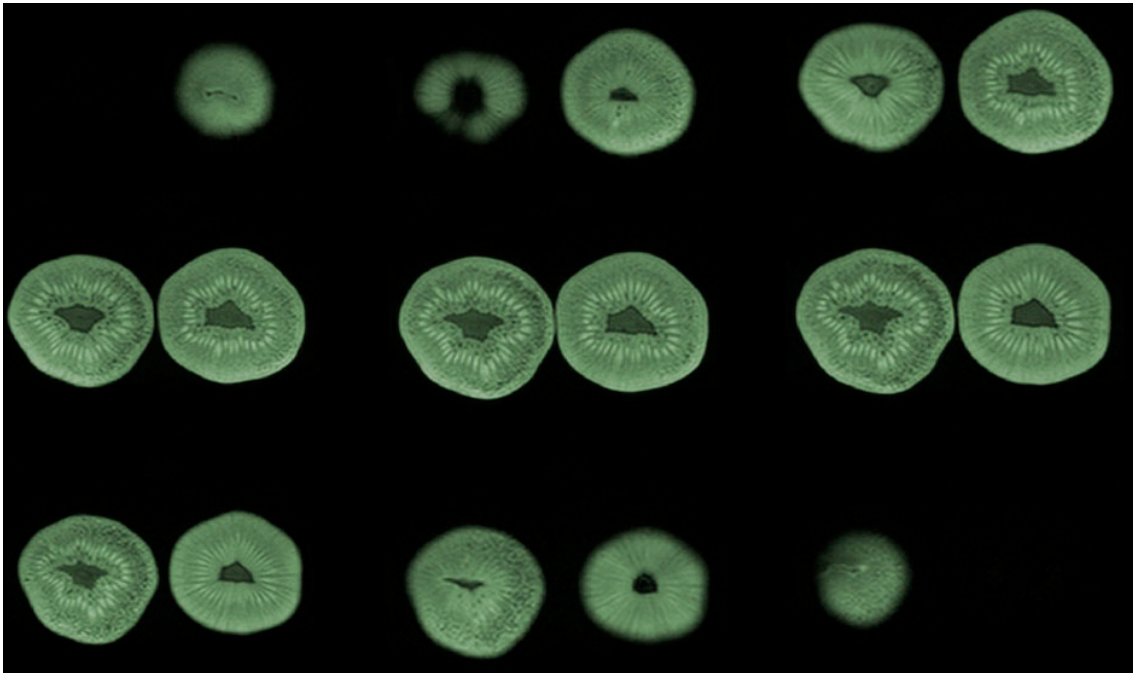


Figura 52. Representación de los diferentes cortes de dos kiwis (corte axial)

De la misma manera, se han creado videos cortos en formato .mov que representan el pase de los cortes uno por uno. Para ello, se ha utilizado Photoshop y Adobe After Effects. En primer lugar, se han obtenido capas de ajuste del tono y saturación. En el caso de las frutas que se obtuvieron juntas en una misma imagen, fue necesario seleccionar las regiones manualmente para poder proporcionar a cada pieza de fruta un color determinado.

Una vez aplicado el cambio de color a todos los cortes, se comenzará a realizar el video con After Effects, un programa de edición de videos. El primer paso que se debe realizar es crear una composición, donde debes especificar el tiempo de duración del video. Se ha elegido que cada corte estará entre 3 y 5 *frames* en función del número de cortes que tenga la imagen. Por tanto, calculando que cada minuto contiene 25 *frames*, se deberá calcular el tiempo total del video en función del número de cortes.

Hecho esto, se deberán importar todas las imagen coloreadas al programa de edición y añadirlas a la composición que se ha creado. Se aplicará a todas las imágenes una transformación de escala del 400%, para que sean más grandes y se ajusten al tamaño del video. A continuación, se irán colocando las imágenes una detrás de otra de manera ordenada, de forma que cada una esté visible 5 *frames*. Finalmente, se debe activar el desenfoque de movimiento en todas las imágenes, para que la transición entre ellas sea suave, creando un efecto de transformación.

En la figura 53 se muestra la composición creada en After Effects para la realización del video de la transición de cortes de la alcachofa, la naranja y el aguacate. Como se puede ver, en ese caso se utilizó una duración total de 12 segundos, con una duración entre imágenes de 3 *frames* debido al gran número de cortes (100 cortes en total).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

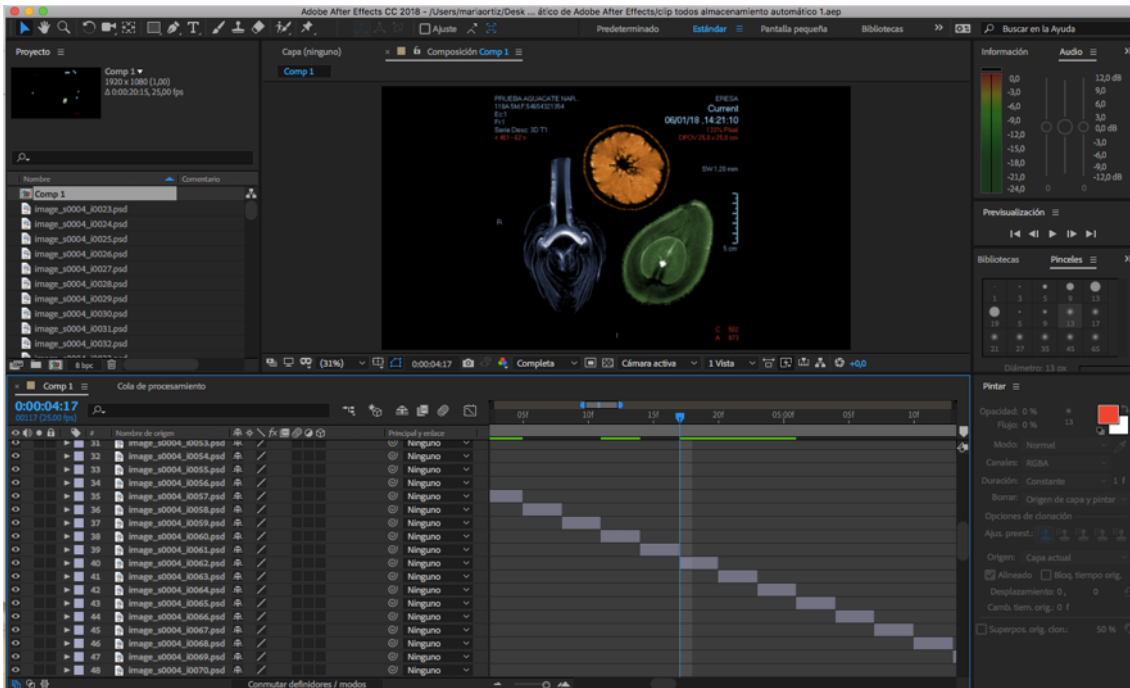


Figura 53. Realización de un video corto en After Effects que muestre la transición de los cortes coloreando las piezas de fruta.

Como resultado de todo este proceso, se han obtenido diferentes videos que muestran la transición de los cortes de las diferentes imágenes de frutas y verduras adquiridas para el proyecto.

También se han obtenidos videos del proceso de transición de imágenes para un caso más especial. Se adquirieron imágenes de volumetría en 3D de las tres frutas mencionadas anteriormente, de modo que las diferentes imágenes no muestran los cortes como tal, sino la densidad volumétrica de las piezas desde diferentes orientaciones (figura 54).

Con estas imágenes se ha logrado realizar, también con After Effects, un video de la transición de sus cortes, sin embargo, en este caso, en lugar de mostrar el avance de los cortes, muestra un giro de 180 grados aproximadamente en el plano axial de las tres piezas de fruta. En la figura 55 se muestra una serie de capturas de dicho video, que permite hacerse una idea más clara de las imágenes que lo componen.

Por último, también se han obtenido videos, en este caso en blanco y negro, de la transición de los cortes por medio de Mango. Esta aplicación permite generar videos de una manera más sencilla, pero que permite un número de menos de transformaciones como dar color, elegir el tiempo total de duración del video o el número de frames por imagen.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

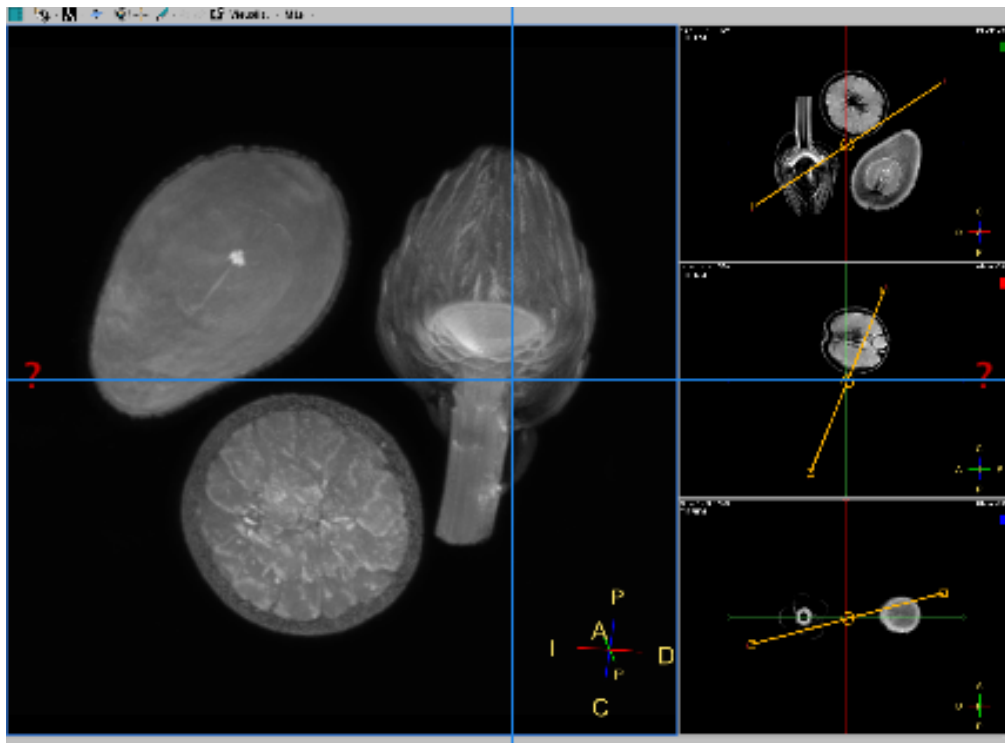


Figura 54. Imágenes de volumetría de las piezas de fruta obtenidas con Philips Ingenia 3T.

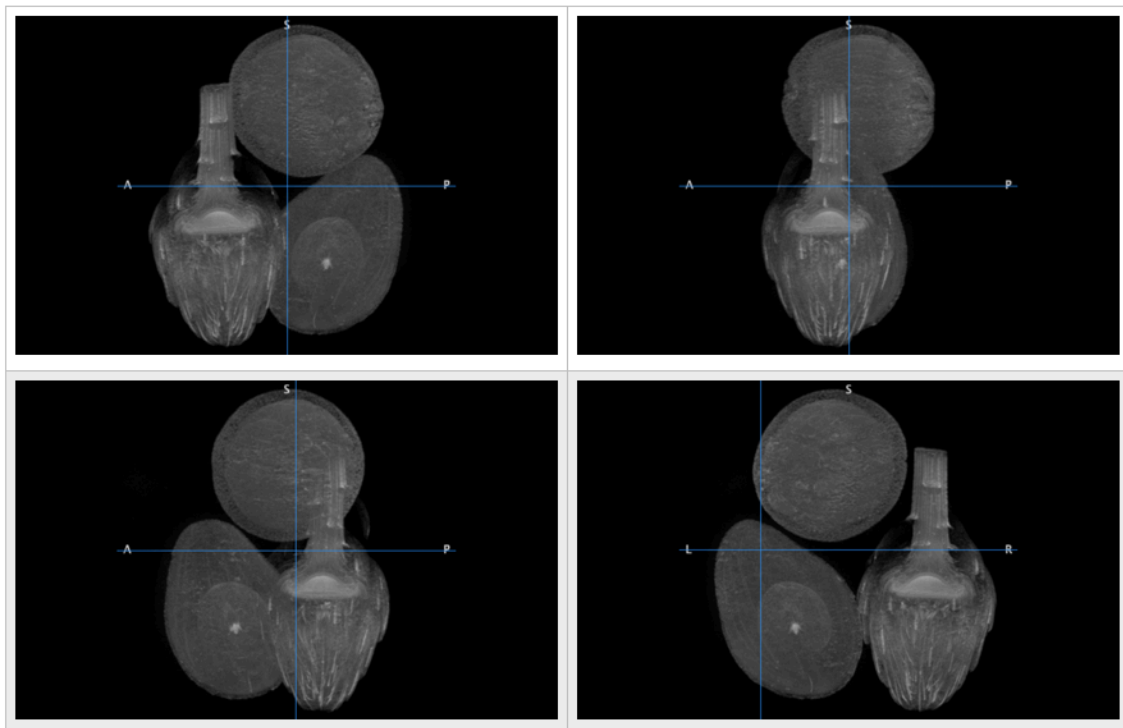


Figura 55. Transición de las imágenes de volumetría en el video que da lugar al giro de las piezas de fruta.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Por último, la figura 56 presenta el diagrama esquemático del procedimiento llevado a cabo para la realización de este bloque.

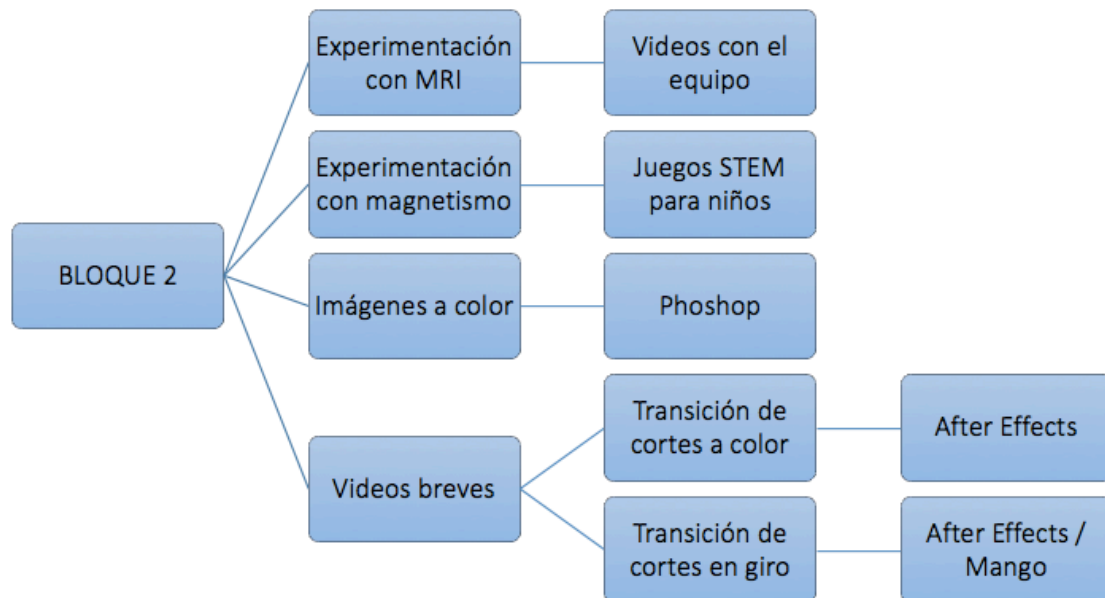


Figura 56. Diagrama esquemático del bloque 2 del proyecto

6.3 RECONSTRUCCIÓN Y SEGMENTACIÓN

Como resultado de la reconstrucción, segmentación y procesado de las imágenes se han obtenido las diferentes frutas en 3D. En primer lugar, del conjunto de alcachofa, naranja y aguacate, se ha conseguido obtenerlas todas por separado (figura 57).

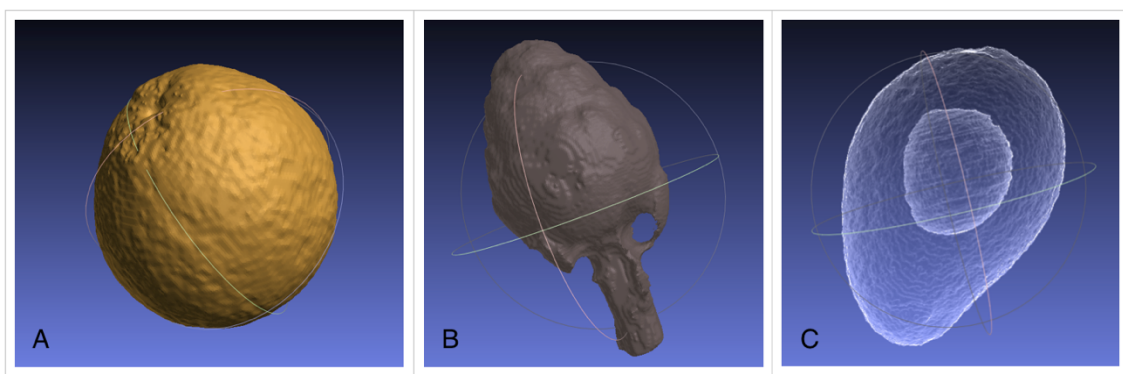


Figura 57. Representación de las tres frutas por separado con Meshlab A) Naranja con sombreado tipo lattice, B) Alcachofa con sombreado tipo lattice, C) Aguacate con sombreado tipo Rayos X.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Por otro lado, se han realizado los cortes pertinentes para obtener ambas mitades con y sin pipas del aguacate (figura 58) y del mango (figura 59). El objetivo principal de esta decisión es obtener las mitades necesarias para poder imprimir la pieza de una manera visual, pudiendo así analizar sus detalles.

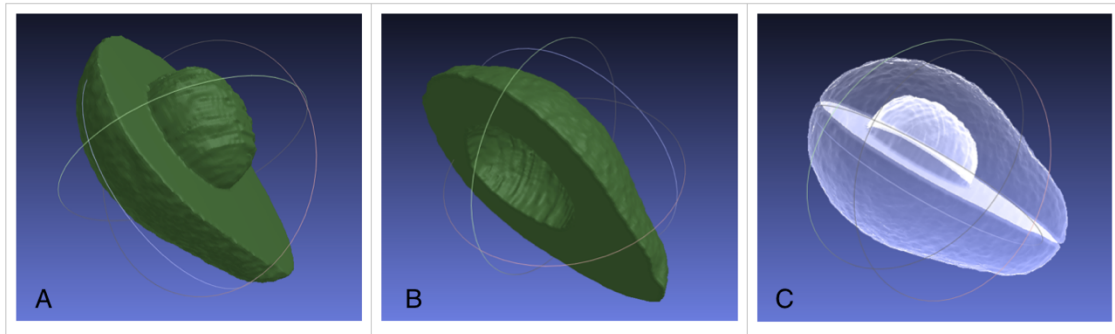


Figura 58. Representación de las mitades del aguacate, A) Con pipas y sombreado tipo lattice, B) Sin pipas y sombreado tipo lattice, C) Ambas mitades juntas con sombreado tipo rayos X para demostrar que son análogas.

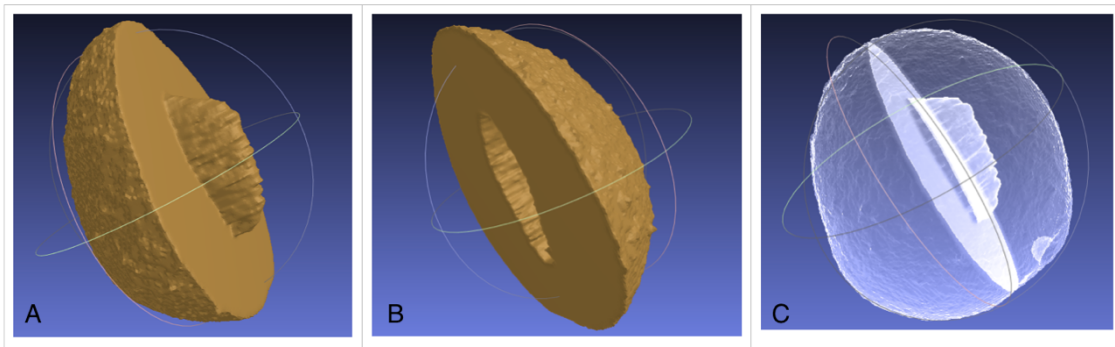


Figura 59. Representación de las mitades del mango, A) Con pipas y sombreado tipo lattice, B) Sin pipas y sombreado tipo lattice, C) Ambas mitades juntas con sombreado tipo rayos X para demostrar que son análogas.

Finalmente, siguiendo el proceso desarrollado en el apartado 5.1.4, se obtuvo la impresión 3D del mango. Para ello fue necesario reducir ligeramente el tamaño de la pipas, dado que sino no encajaban a la perfección. En la figura 60 se muestra el resultado final del mango impreso en 3D.

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

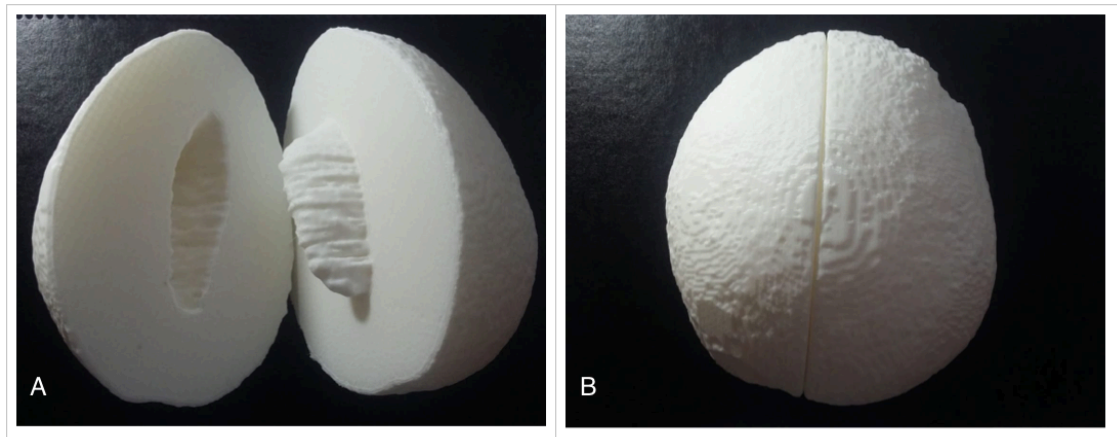


Figura 60. Mango impreso en 3D A) Mitades separadas y B) Mitades unidas

Finalmente, el diagrama esquemático del proceso realizado en el tercer bloque del proyecto se puede observar en la figura 61.



Figura 61. Diagrama del bloque 3 del proyecto

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Debido a los grandes avances que se han producido durante los últimos años en el campo de la tecnología y la medicina, están surgiendo nuevas técnicas de diagnóstico, que permiten mejorar la toma de decisiones. Entre todas estas técnicas destaca la imagen médica, que permite visualizar el interior del organismo sin invadirlo. Esto ha derivado en una nueva rama de la medicina, la medicina personalizada, que busca adaptar el tratamiento a llevar a cabo para cada paciente dependiendo de su situación específica.

Uno de los principales inconvenientes de la imagen por resonancia magnética, una de las técnicas de imagen más importantes, es el desconocimiento de la población. Por tanto, el principal objetivo de este proyecto era acercar esta técnica a un grupo de personas no especializadas, lo niños. Además, se esta manera, se conseguía no solo introducirles en el entorno de la ingeniería biomédica, sino también inculcar interés por la tecnología y la ciencia, un movimiento conocido como Educación STEM.

Este trabajo se ha centrado en el planteamiento de un taller para niños sobre magnetismo y los principios básicos de la resonancia magnética, abordando el tema de una manera amena y práctica. Para ello, se han adquirido imágenes de resonancia magnética de diferentes frutas y verduras, con su posterior reconstrucción, segmentación, procesado e impresión 3D. Además, se plantean una serie de lecciones teóricas que servirán como base del entendimiento sobre la MRI. Finalmente, el taller termina con diversos experimentos que tratan de aplicar los conocimientos aprehendidos.

Como conclusión de este proyecto, destacar la importancia de hacer llegar todos estos conocimientos al personal no especializado con el objetivo de ayudarles a perder el miedo, y enfrentarse a estas pruebas con seguridad. En este caso, los niños que reciban este taller, no solo habrán adquirido conocimientos sobre la ingeniería biomédica, sino que también habrán disfrutado y jugado, lo que resulta ser un aspecto imprescindible de la educación.

CAPÍTULO 8. LÍNEAS FUTURAS

En el siguiente apartado se van a plantear posibles líneas de aplicación que se podrían llevar a cabo para continuar divulgando en el campo de la ingeniería biomédica y la resonancia magnética. Todas ellas buscan enseñar conceptos nuevos a distintos sectores de la población que lo requieran.

En primer lugar, siguiendo con la población infantil, sería posible adaptar y trasladar este taller a diferentes hospitales infantiles, con el objetivo de llegar a aquellos que más necesidad tienen de conocer estos conceptos. En este caso, sería conveniente aumentar tanto el número de experimentos realizados como los juegos. En este caso, partimos del hecho de que la mayoría de ellos deberán haberse hecho resonancias magnéticas con anterioridad, lo que varía ligeramente el principal objetivo del taller: en lugar de enseñar conocimientos, la principal motivación es que se diviertan a la vez que aprenden.

También se propone la realización de cursillos similares adaptados a personas adultas y ancianos. En este caso, sería necesario adaptar la profundidad con la que se abarcan los conceptos teóricos y modificar los experimentos, con el objetivo de hacer un taller más específico con experimentos más complejos e ilustrativos. También debería contemplarse la posibilidad de introducir imágenes de resonancia magnética reales e incluso imprimir algún modelo sencillo.

Por otro lado, sería interesante la realización de distintos cursos *online* o cursos MOOC (del inglés *Massive Online Open Courses*). Es decir, cursos a distancia, accesibles por internet, a los que se puede apuntar cualquier persona y que prácticamente no tienen límite de participantes. De esta manera, pueden realizarse cursos más extensos abarcando los conceptos en profundidad.

Finalmente, la realización de un folleto informativo que podría distribuirse por las distintas salas de espera de los hospitales. De esta manera, serían únicamente aquellos pacientes que muestren interés los que podrán aprender, de manera breve y con poco detalle, cómo va a ser la prueba y cuáles son los beneficios que aporta.

REFERENCIAS

- [1] Barco, H., Rojas, E. (2012). Principios de electricidad y magnetismo. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [2] Pérez, M. C. i P. Varela. (2003). Orígenes del electromagnetismo. Oersted y Ampère. Nívola Libros i Ediciones. Madrid.
- [3] Enciclopedia de Clasificaciones (2017). Tipos de imanes [online] Disponible en: <https://www.tiposde.org/ciencias-naturales/147-tipos-de-imaness/> [Accessed 26 Jul. 2018.]
- [4] WiseGEEK. (2017). What are neodymium magnets? [online] Disponible en: <https://www.wisegeek.com/what-are-neodymium-magnets.htm> [Accessed 26 Jul. 2018].
- [5] AC Magnets 98. Direcciones de imantación. [online] Available at: <https://www.acmagnets98.com/imaness/vocabulario/> [Accessed 26 Jul. 2018.]
- [6] Ciencias Jokano (2014). Magnetismo [online]. Disponible en: <http://cienciasjokano.blogspot.com/2014/10/magnetismo.html> [Accessed 26 Jul. 2018.]
- [7] Edward M. Purcell. (1985). Electricity and magnetism. EEUU: Harvard University.
- [8] Jacobo Tarrío (2014) ¿Cómo funcionan las tarjetas de banda magnética? [online] Disponible en: <https://jacobotarrío.org/es/know/como-funcionan-las-tarjetas-de-banda-magnetica> [Accessed 26 Jul. 2018.]
- [9] Alcalde, J. La Tierra tiene un corazón de hierro. Muy interesante.
- [10] Gilbert D. Mead (1964). Deformation of the geomagnetic field by the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 69(7).
- [11] Nicola A. Spaldin (2010). *Magnetic Materials, fundamentals and applications*. Cambridge. Second Edition.
- [12] Saini, S., Frankel, R. (1987). *Magnetism: a primer and review*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [13] Natureduca. Polos y campos magnéticos. [online] Disponible en: <https://natureduca.com/fisica-electricidad-magnetismo-y-electromagnetismo-02.php> [Accessed 26 Jul. 2018.]
- [14] David Moratal (2016). Apuntes de la asignatura “Técnicas de Imágenes Biomédicas” del 3er curso del Grado en Ingeniería Biomédica, ETSI Industriales, Universitat Politècnica de València.
- [15] Louis Kreel (1991). *Reviews in Medicine: Medical Imaging*. Department of diagnostic radiology, Prince of Wales Hospital.
- [16] Función Resonancia (2013). Funcionamiento de la resonancia magnética [online]. Disponible en: <http://funcionresonancia.blogspot.com/> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [17] UAM (2016). Fotos de electromagnetismo [online]. Disponible en: https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/lisoriano/fotos.htm [Accessed 27 Jul. 2018.]

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

- [18] Joseph P. Hornak (1996). The basics of MRI. Rochester Institute of Technology
- [19] Hans H. Schild (1990). MRI made easy (...well almost). Schering.
- [20] Ángeles López (2012). Demasiada radiación por las pruebas de imagen. El Mundo. [online]. Disponible en:
<http://www.elmundo.es/elmundosalud/2012/06/12/oncologia/1339524257.html>
[Accessed 27 Jul. 2018.]
- [21] Imaios (2008). eMRI: MRI step-by-step, interactive course on magnetic resonance imaging. [online]. Disponible en: <https://www.imaios.com/en/e-Courses/e-MRI>
[Accessed 27 Jul. 2018.]
- [22] MRI Tutor. Introduction to MRI [online]. Disponible en:
<http://www.mritutor.org/mritutor/> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [23] MRI-q (2015). Questions and answers in MRI. [online]. Disponible en: <http://mri-q.com/index.html> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [24] Toma, R., Greca, I. (2016). Modelo interdisciplinar de educación STEM para la etapa de Educación Primaria. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Burgos.
- [25] Mathworks. Matlab. Página web oficial de Matlab. [online] Disponible en:
<https://es.mathworks.com/products/matlab.html> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [26] Mathworks. Dicom directory (of slices) to 3D volume image. [online] Disponible en:
https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/23455-dicom-directory-of-slices-to-3d-volume-image?s_tid=FX_rc2_behav [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [27] Jose Vicente Manjón Herrera (2017). Apuntes de la asignatura “Imágenes Biomédicas” del 4º curso de Grado en Ingeniería Biomédica, ETSI Industriales, Universitat Politècnica de València.
- [28] ric.uthscsa. Mango. [online] Disponible en: <http://ric.uthscsa.edu/mango/> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [29] Meshlab.net. (2017). MeshLab. [Online] Disponible en: <http://www.meshlab.net/>
[Accessed 27 Jul. 2018.].
- [30] Meshmixer.com. (2017). Autodesk Meshmixer. [Online] Disponible en:
<http://www.meshmixer.com/> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [31] ITK-SNAP.org (2017) ITK-SNAP. [Online] Disponible en:
<http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [32] Adobe.com (2018) Adobe Creative Cloud [Online]. Disponible en:
<https://www.adobe.com/es/creativecloud.html> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [33] Philips.es (2018) Philips Ingenia 3T. [Online] Disponible en:
<https://www.philips.es/healthcare/product/HC781342/ingenia-30t-mr-system>
[Accessed 27 Jul. 2018.]
- [34] Prusa3D.es (2018). Kit de montaje de impresora Original 3D Prusa i3 mk2. [Online] Disponible en: <https://www.prusa3d.es/original-prusa-i3-3d-printer-kit-from-josef-prusa/> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [35] Hxx.es (2018). Materiales de impresión 3D: Ácido poliláctico (PLA). [Online] Disponible en: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
[Accessed 27 Jul. 2018.]

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

- [36] Ventus Ciencia experimental (2018). Catálogo de Física Frederiksen. [Online]. Disponible en: <http://www.ventusciencia.com/v08-2catalogos.html> [Accessed 27 Jul. 2018.]
- [37] Mokiki (2016). Amazon.com. Ferrofluid in a Bottle Magnetic Liquid Display Stress Relief Decompression Educational Toy Gift 2 Liquid Magnets. [Online]. Disponible en: https://www.amazon.com/dp/B01E43MB3W/ref=sspa_dk_detail_5?psc=1&pd_rd_i=B01E43MB3W&pf_rd_m=ATVPDKIKX0DER&pf_rd_p=950202000752607969&pf_rd_r=4RTQTNRE6GP1JKYZ8N0C&pd_rd_wg=ofEII&pf_rd_s=desktop-dp-sims&pf_rd_t=40701&pd_rd_w=SR8ea&pf_rd_i=desktop-dp-sims&pd_rd_r=978edb6e-5ce8-11e8-9e44-0f06b62503d4 [Accessed 8 Sept. 2018.]
- [38] ILC (2018). Amazon.com. Magnetic Putty Playdough Creative Magnet Toy Slime Stress Reliever Kids Adults Fun (Black). [Online]. Disponible en: https://www.amazon.com/iLC-Magnetic-Playdough-Creative-Reliever/dp/B074SKMX49/ref=sr_1_3_sspa?s=toys-and-games&ie=UTF8&qid=1526901817&sr=1-3-spons&keywords=magnetic+slime&psc=1 [Accessed 8 Sept. 2018.]

PRESUPUESTO

MARÍA JOSÉ ORTIZ RUIZ

Trabajo de fin de Master | Ingeniería Biomédica

PRESUPUESTO

En este apartado se realizará un estudio económico del desarrollo del proyecto realizado, en el que se realizará la estimación de los costes totales del trabajo. Para ello, se han dividido los costes en cuatro grandes grupos, dependiendo de su procedencia: costes de personal, costes de equipos, costes del *software* y costes de materiales físicos.

1. COSTES DE PERSONAL

Debido a las características de este proyecto, la mayor parte de los costes proceden de los honorarios de los trabajadores, que se han calculado de manera aproximada en base al convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos, y a la beca FPU para la formación de doctores. El número de horas especificado hace referencia al tiempo de planificación del proyecto, diseño del código, realización de los apartados del taller y realización del documento escrito (Tabla 2).

<i>Concepto</i>	<i>Horas</i>	<i>Honorarios</i>	<i>TOTAL</i>
<i>Ingeniero</i>	320 h	12,38 €/h	3.961,60 €
<i>Tutor</i>	30 h	32 €/h	960 €
<i>Técnico de ERESA</i>	2 h	8,75 €/h	17,5 €
<i>Total:</i>			4.939,1 €

Tabla 2. Costes de personal del proyecto

2. COSTES DE EQUIPOS

En cuanto a los costes de los equipos utilizados, se ha realizado un análisis dependiendo del periodo de uso y el periodo de amortización de cada uno de ellos. A pesar de las altas cifras obtenidas, se debe tener en cuenta que no se ha tenido exclusividad de los equipos, por lo que estas cifras estarían divididas entre varios proyectos (Tabla 3).

3. COSTES DE MATERIALES

A continuación se especifican los materiales físicos utilizados para la realización del proyecto. En este caso, los materiales se encuentran divididos en dos tablas diferenciadas según los costes reales que se han tenido durante el proyecto (tabla 4) y los costes hipotéticos que deberían tenerse al realizarse el taller finalmente para un grupo de 15 niños, por lo que esta tabla podría variar si este número aumenta (tabla 5).

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Equipo	Coste total	P. amortización	P. de uso	TOTAL
<i>Philips Ingenia</i>	1.500.000 €	10 años	2 h	34,24 €
<i>Impresora 3D</i>	620 €	20.000 h	1 h	0,03 €
<i>Ordenador</i>	1.000 €	5 años	150 h	3,42 €
Total:				37,69 €

Tabla 3. Costes de equipo del proyecto

Material	Valor de la unidad	Coste de la unidad	Cantidad utilizada	Coste
<i>Frutas y verduras</i>	-	5 €	1 u	5 €
<i>Filamento PLA</i>	1 kg	20 €	500 g	10 €
Total:				15 €

Tabla 4. Costes de materiales físicos utilizados

Material	Valor de u.	Coste de u.	Cantidad	Coste
<i>Limaduras de Fe en vidrio</i>	1 u	38,12 €	3 u	114,36 €
<i>Tubo de aluminio</i>	1 u	23,53 €	3 u	70,59 €
<i>Tubo de gel, limaduras de Fe</i>	1 u	30 €	3 u	90 €
<i>Slime magnético</i>	1 u	10 €	3 u	30 €
<i>Recipiente mediano</i>	1 u	1 €	3 u	3 €
<i>Tapones de botella</i>	1 u	0,3 €	30 u	9 €
<i>Imanes de neodimio</i>	50 u	8 €	50 u	8 €
<i>Pilas</i>	4 u	4 €	3 u	3 €
<i>Alambre de Cobre</i>	15 m	10 €	6 m	9 €
<i>Maletín de brújulas</i>	1 u	52 €	1 u	52 €
<i>Platos magnéticos</i>	1 u	63,62 €	3 u	190,86 €
<i>Grafito diamagnético</i>	1 u	42,22 €	3 u	126,66 €
<i>Pack de placas</i>	1 u	30 €	1 u	30 €
<i>Pelota de cobre</i>	1 u	20 €	1 u	20 €
Total:				756,47 €

Tabla 5. Costes de materiales necesarios para la realización del taller

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

4. COSTES DEL SOFTWARE

Finalmente, en este apartado se van a exponer los costes debidos al software descargado para la realización del proyecto (tabla 6). Matlab resulta ser un caso especial, dado que la Universidad de Valencia pone a disposición de los alumnos su licencia de manera gratuita.

<i>Software</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coste real</i>	<i>TOTAL</i>
<i>Matlab</i>	1 u	800 €/año	0 €
<i>Meshlab</i>	1 u	Gratuito	0 €
<i>Meshmixer</i>	1 u	Gratuito	0 €
<i>Photoshop / AE</i>	1 u	25 €/mes	100 €
<i>ATK-SNAP</i>	1 u	Gratuito	0 €
<i>Mango</i>	1 u	Gratuito	0 €
<i>Microsoft Office 365</i>	1 u	10 €/mes	40 €
<i>Total:</i>			140 €

Tabla 6. Costes de software

COSTES TOTALES DEL PROYECTO

Por último se va a calcular el sumatorio de los costes totales del proyecto teniendo en cuenta los costes desglosados calculados en los apartados anteriores. Una vez calculados estos costes, se obtendrán los gastos de la empresa (13% del coste de ejecución) y el beneficio industrial (6% del coste de ejecución), para obtener de esta manera el presupuesto parcial final del proyecto. De modo que, únicamente faltará añadir el impuesto sobre el valor añadido (IVA), que será el 21% del presupuesto parcial final.

<i>Concepto</i>	<i>Coste</i>
<i>Costes de personal</i>	4.939,10 €
<i>Costes de equipos</i>	37,69 €
<i>Costes de materiales físicos</i>	15 €
<i>Costes de materiales para el taller</i>	756,47 €
<i>Costes de software</i>	140 €
<i>Total:</i>	
	5.888,26 €

Tabla 7. Costes totales de ejecución del proyecto

DESARROLLO DE UN TALLER DIDÁCTICO PARA DAR A CONOCER DE FORMA PRÁCTICA Y AMENA LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE UNA IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA

<i>Concepto</i>	<i>Coste</i>
<i>Coste de ejecución</i>	5.888,26 €
<i>Gastos de empresa (13%)</i>	765,47 €
<i>Beneficio industrial (6%)</i>	353,29 €
<i>Presupuesto parcial</i>	7.007,02 €
<i>IVA (21%)</i>	1.471,47 €
<i>Total:</i>	8.478,49 €

Tabla 8. Coste final del proyecto

En conclusión, el presupuesto final del proyecto será de ocho mil cuatrocientos setenta y ocho euros con cuarenta y nueve céntimos.

