

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso



Optimización robusta en IMPT

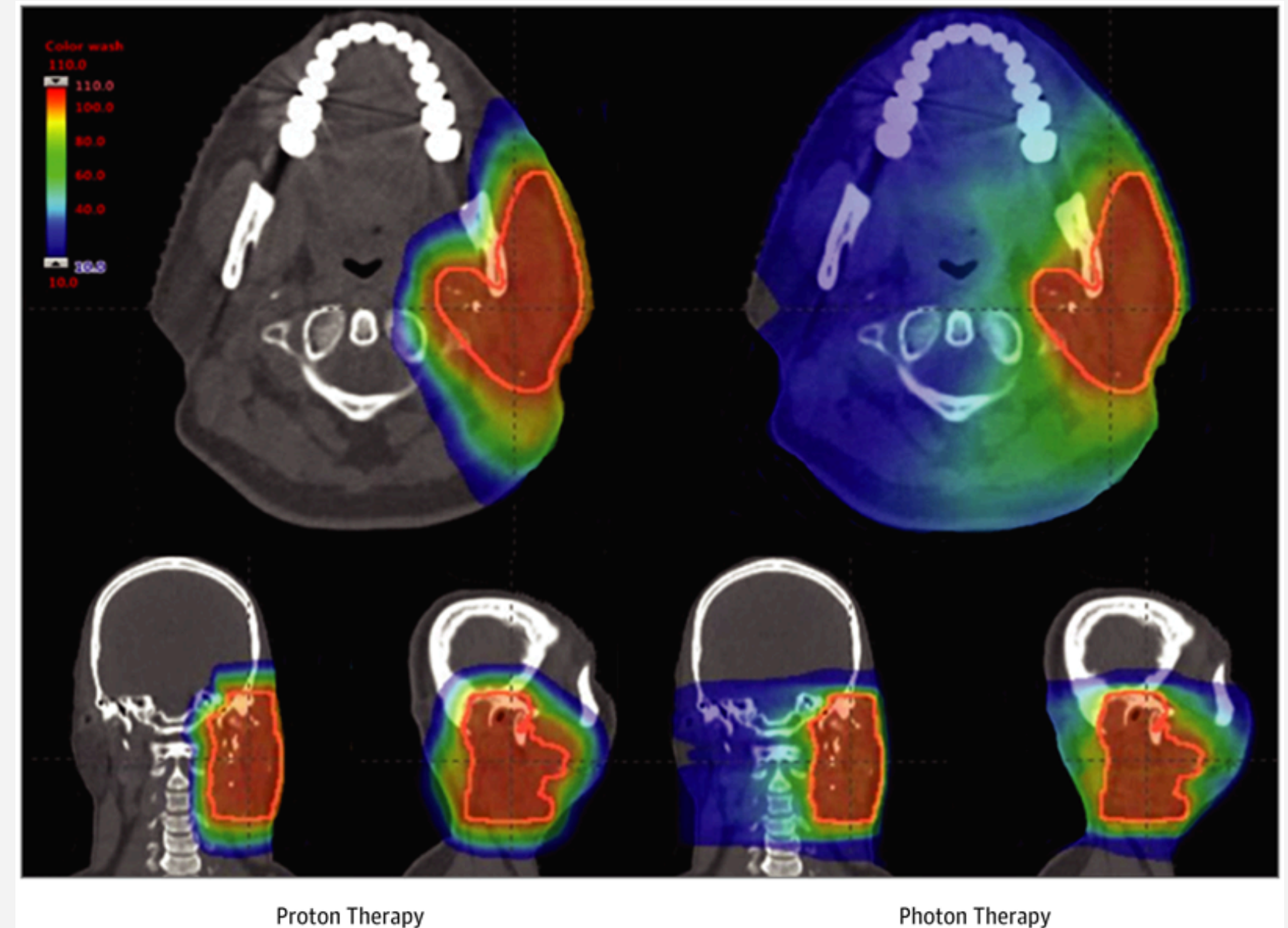
Nicolás Brevis

Ingeniería Civil Informática

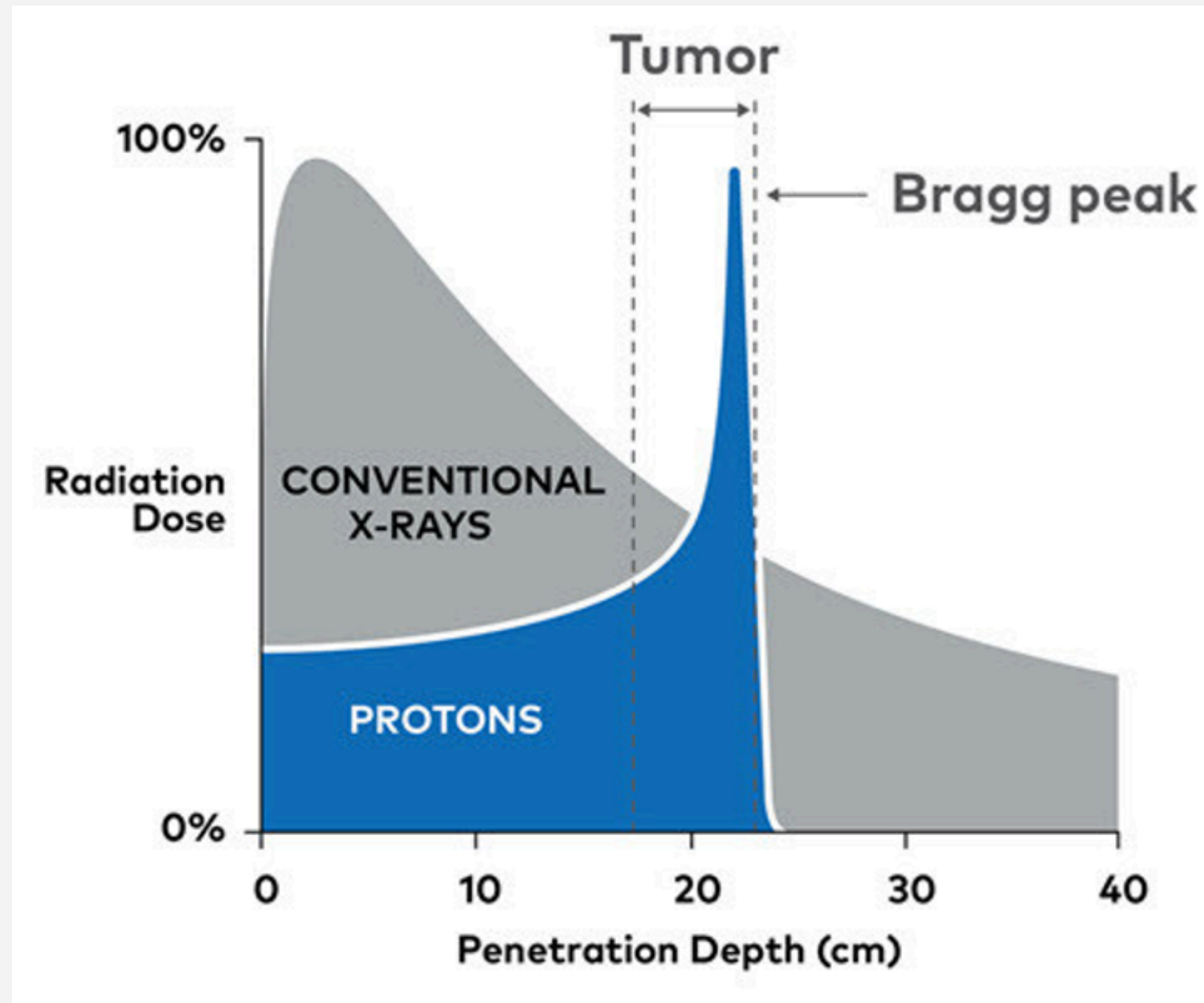
¿Qué es la radioterapia?

La radioterapia es un tratamiento médico que utiliza radiación ionizante, como rayos X o partículas, para destruir células cancerosas y reducir tumores

La protonterapia es un tipo de radioterapia que utiliza haces de protones para tratar el cáncer



¿Por qué protonterapia?



A diferencia de los rayos X, que depositan energía de forma más difusa, los protones liberan la mayor parte de su energía al final de su recorrido.

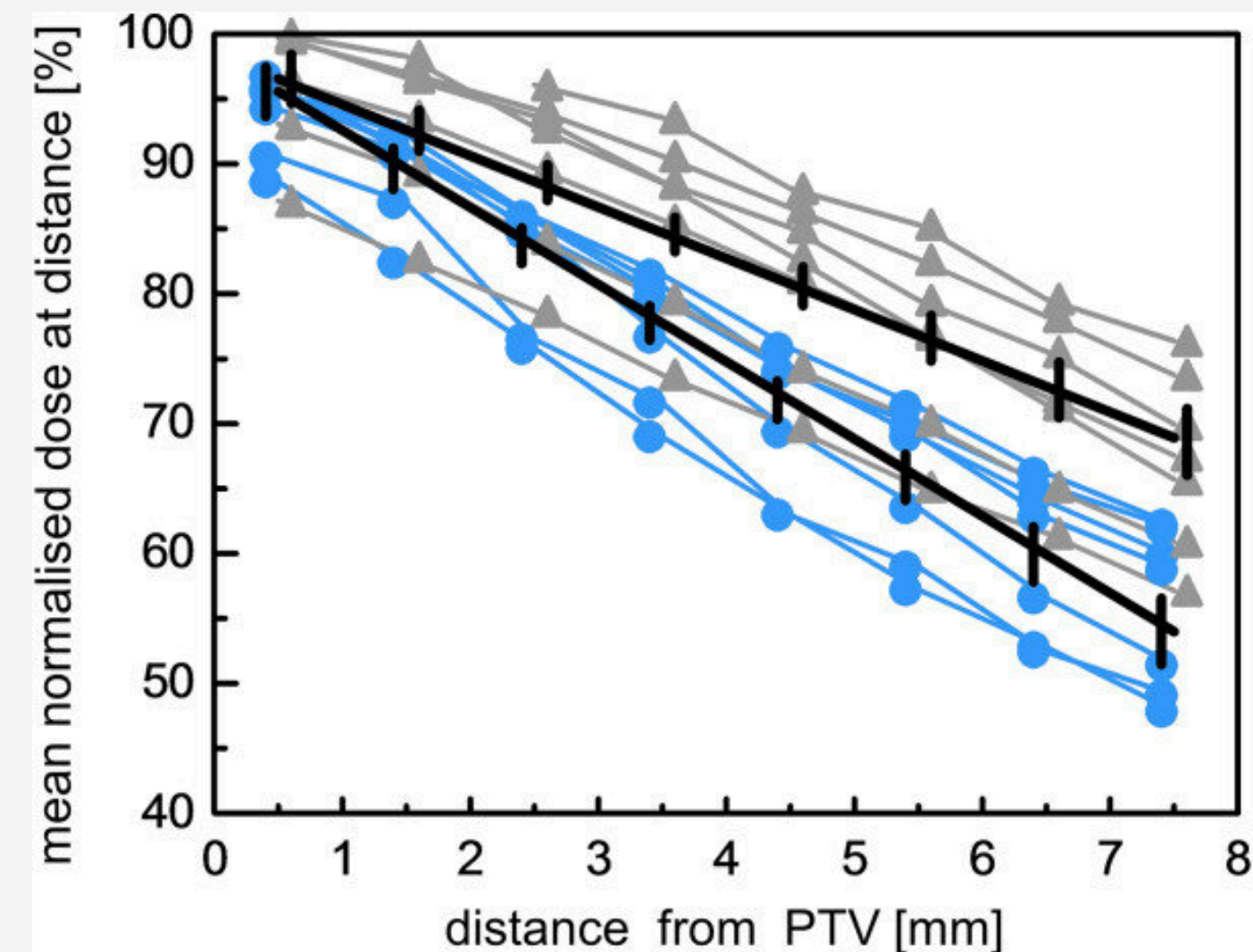
Este fenómeno se conoce como el pico de Bragg, lo que permite conformar la dosis con alta precisión, protegiendo los tejidos circundantes.

¿Qué es optimización robusta?

La optimización robusta es una estrategia que busca encontrar soluciones que funcionen bien incluso cuando hay incertidumbre o errores en los datos o condiciones.

¿Por qué se necesita?

- Errores de posicionamiento del paciente
- Variaciones anatómicas
- Movimiento interno durante el tratamiento
- Errores en el rango de los protones



¿Qué técnicas existen en la literatura?

Robust optimization

Worst-case optimization

Busca garantizar que el plan funcione bien incluso en el peor escenario posible.

$$\min_{\mathbf{w}} \max_{s \in \mathcal{S}} f(\mathbf{D}^{(s)} \mathbf{w})$$

- **w**: Es el vector de pesos o intensidades de los beamlets.
- **S**: Es el conjunto de escenarios de incertidumbre.
- **D(s)**: Es la matriz de deposición de dosis (DDM) en el escenario s.
- **f(D(s)w)**: función de penalización o evaluación de la calidad del plan en el escenario s.
- **max_{s ∈ S}**: Evalúa el peor caso entre todos los escenarios posibles
- **min_w**: Buscamos el vector de intensidades w que minimice la penalización en el peor escenario.

¿Qué técnicas existen en la literatura?

Robust optimization

Enfoque probabilístico

Usa múltiples escenarios de incertidumbre y optimiza la dosis promedio.

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbb{E}_{s \in \mathcal{S}} \left[f \left(\mathbf{D}^{(s)} \mathbf{w} \right) \right]$$

- **w**: Es el vector de pesos o intensidades de los beamlets.
- **S**: Conjunto de escenarios posibles
- **D(s)**: Es la matriz de deposición de dosis (DDM) en el escenario s.
- **f**: función de penalización o evaluación de la calidad del plan en el escenario s.
- **E**: Esperanza matemática, o valor esperado (el promedio ponderado según la probabilidad de cada escenario).

¿Qué es la matriz de deposición de dosis (DDM)?

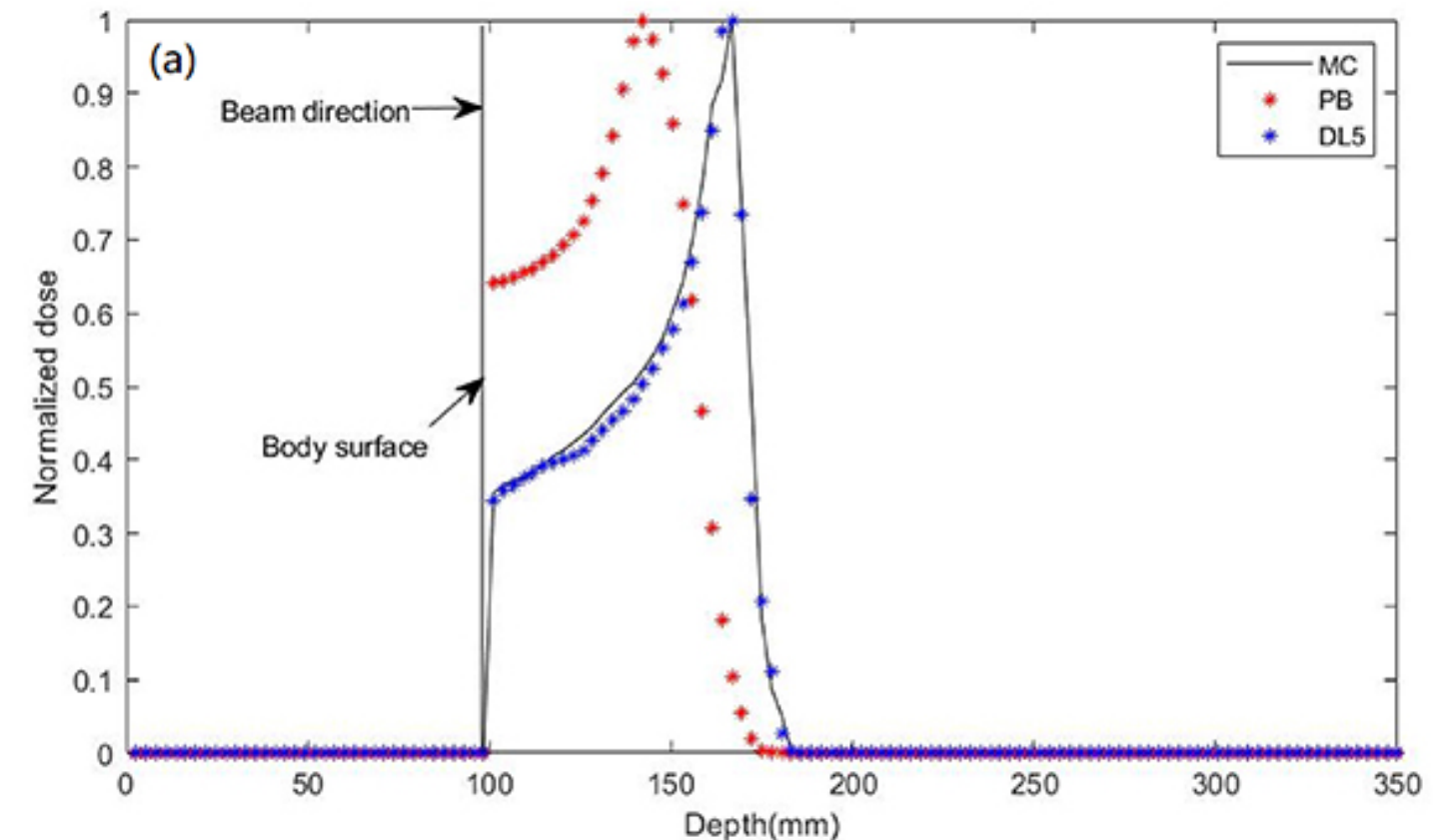
La matriz de deposición de dosis (DDM) es una estructura matemática que representa cuánta dosis deposita cada beamlet en cada vóxel del cuerpo del paciente.

Esta ecuación permite calcular la distribución de dosis a partir de las intensidades de los beamlets.

$$\mathbf{d} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{w}$$

- **d**: vector de dosis entregada en cada vóxel.
- **D**: matriz DDM.
- **w**: vector con la intensidad (peso) de cada beamlet.

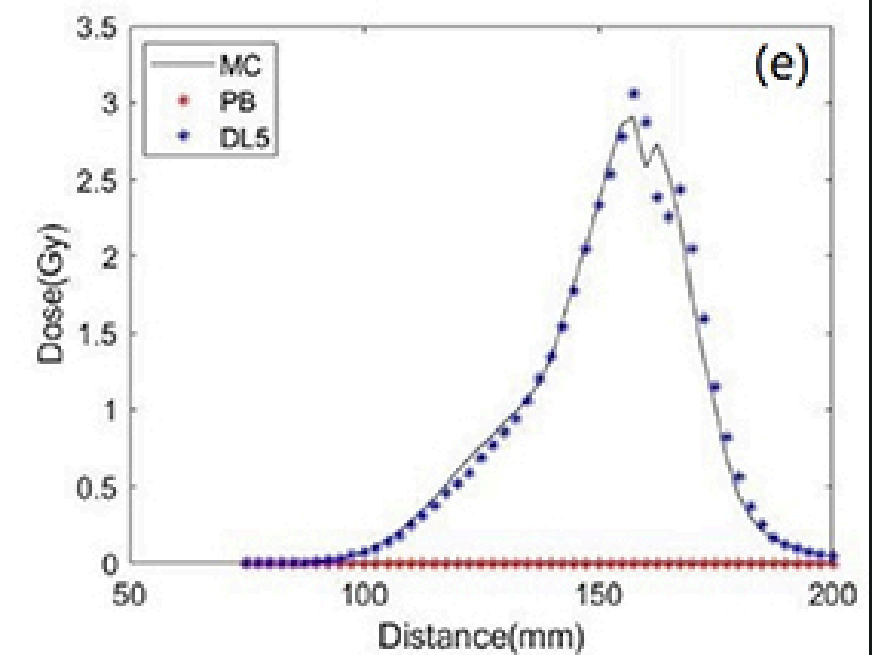
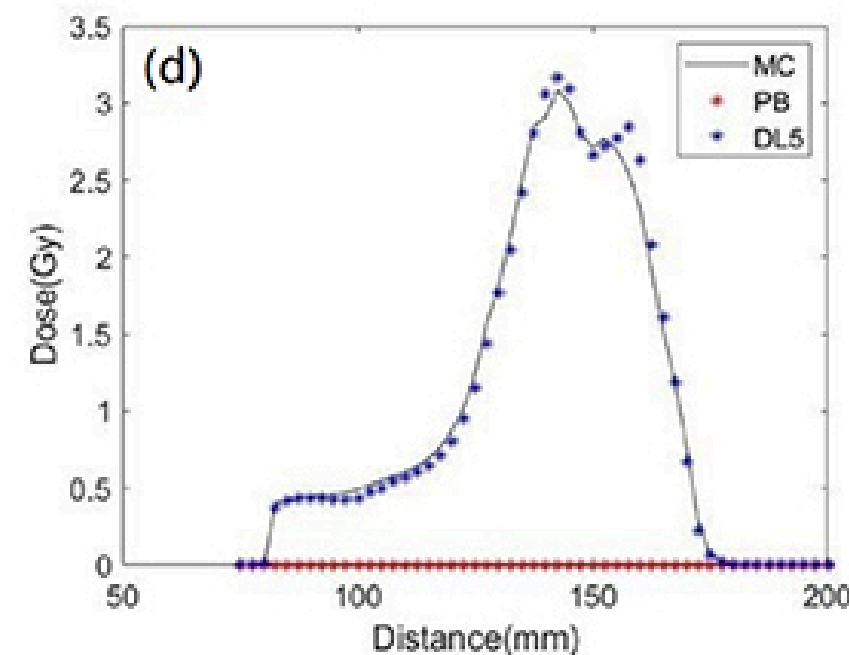
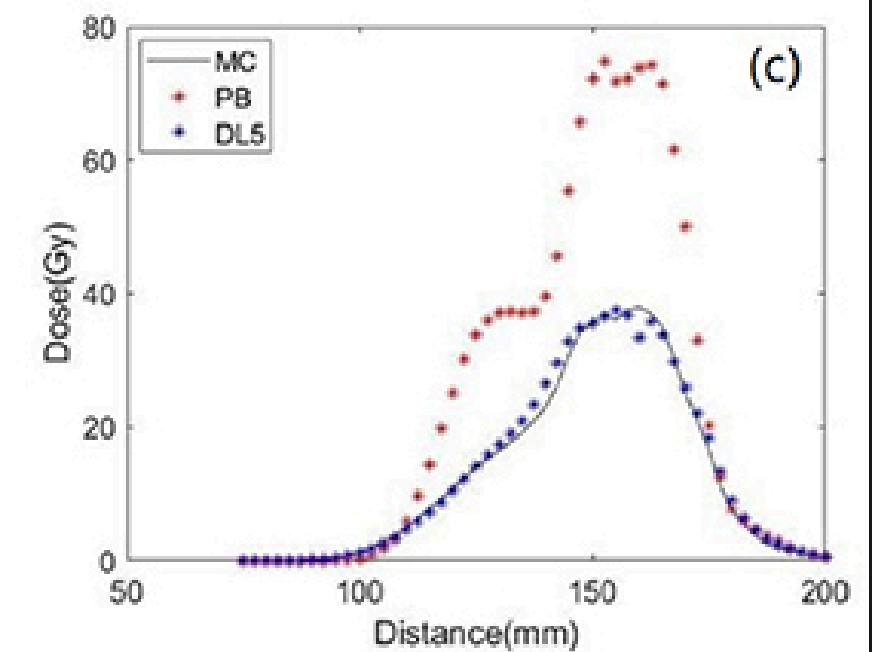
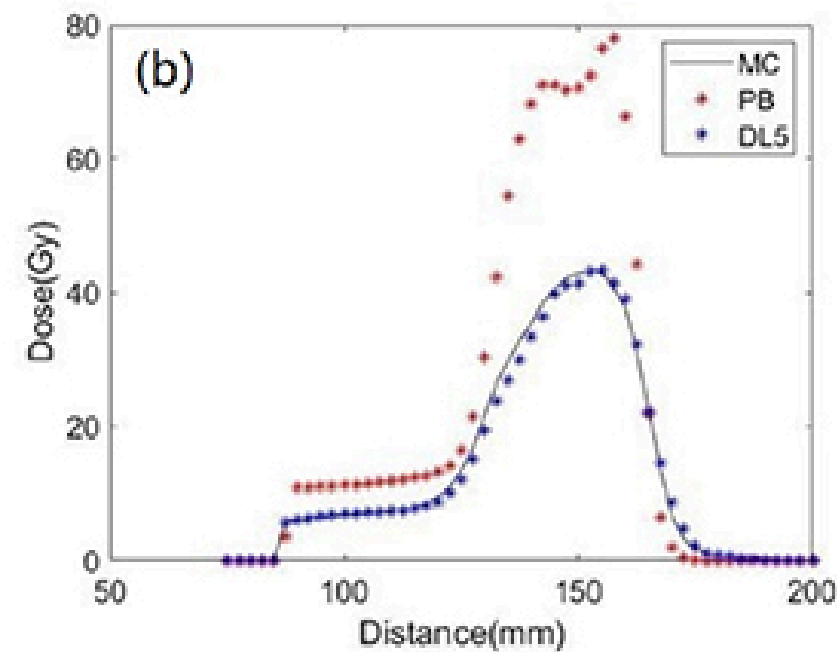
- Es una matriz grande y dispersa (sparse matrix).
- Cada fila representa un vóxel (un punto del volumen del paciente).
- Cada columna representa un beamlet (una subdivisión del haz de protones).



¿Por qué es importante para la optimización?

La DDM es la base matemática de todos los modelos de optimización en IMPT

- Permite calcular cómo los cambios en los pesos de los beamlets afectan la dosis total.
- Al tener una DDM por escenario ($D(s)$), se puede usar para optimizar sobre múltiples condiciones (clones, pseudo-ROIs, etc.).
- Es necesaria para implementar cualquier modelo robusto: probabilístico, worst-case o híbrido.



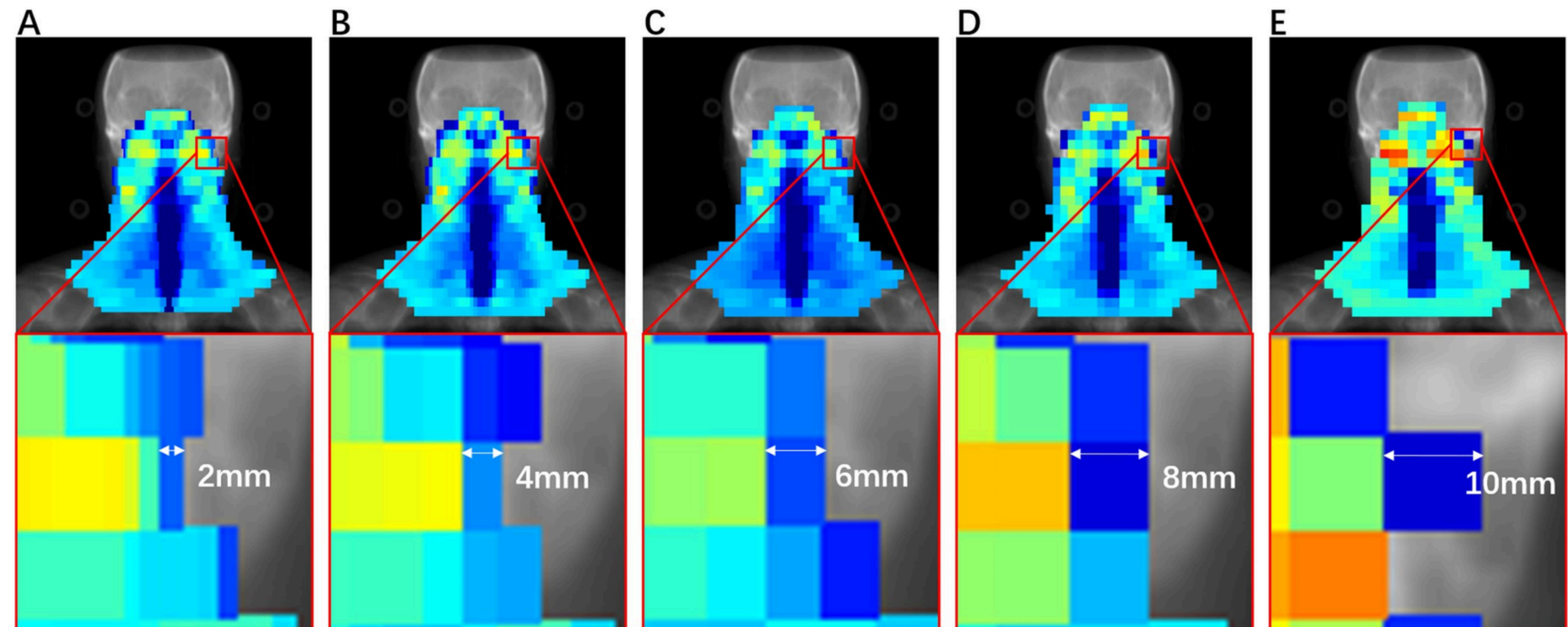
¿Qué es un beamlet?

Un beamlet es una subdivisión muy pequeña del haz de protones (o fotones) utilizado en un tratamiento de radioterapia. Los beamlets permiten modular finamente la distribución de dosis, ajustando la intensidad de cada uno.

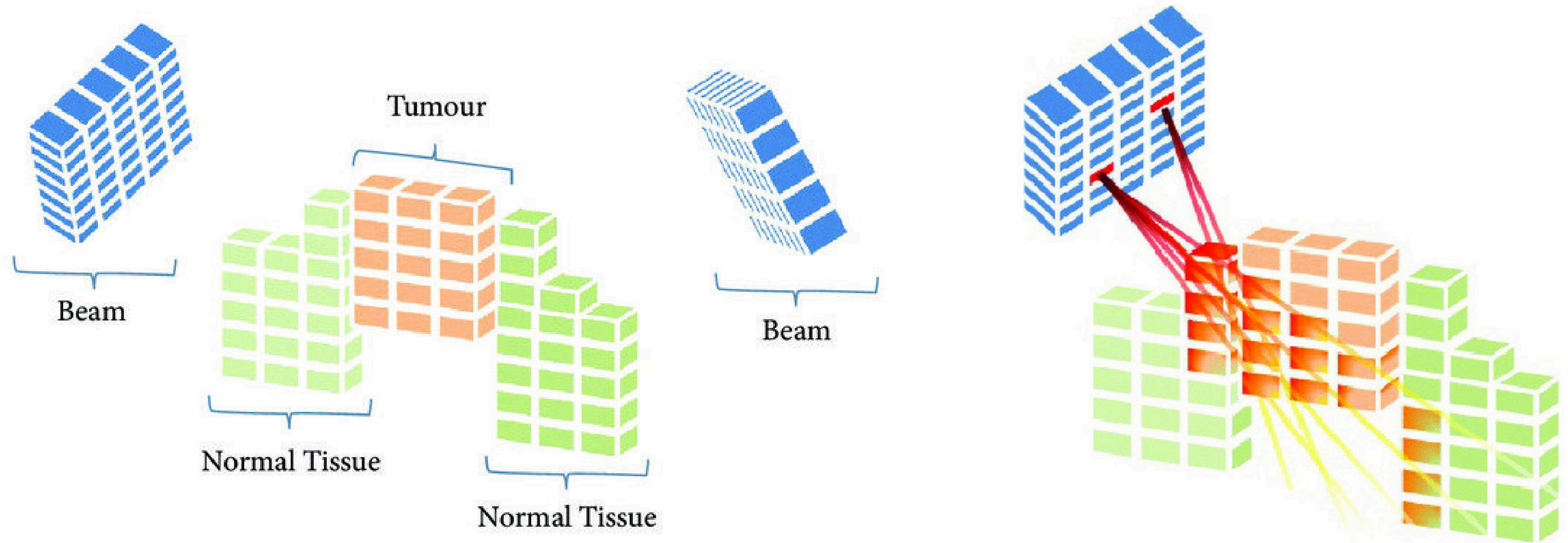
Cada beamlet corresponde a una columna en la matriz de deposición de dosis (DDM). La cantidad de dosis que deposita en cada vóxel se representa en esa matriz.

¿Por qué son clave en IMPT?

- Porque permiten un control preciso sobre la forma de la dosis.
- Son la unidad base que se optimiza en todos los modelos de planificación inversa.
- La optimización robusta ajusta los pesos de los beamlets (w) para cumplir restricciones clínicas bajo incertidumbre.



¿Qué es un beamlet?

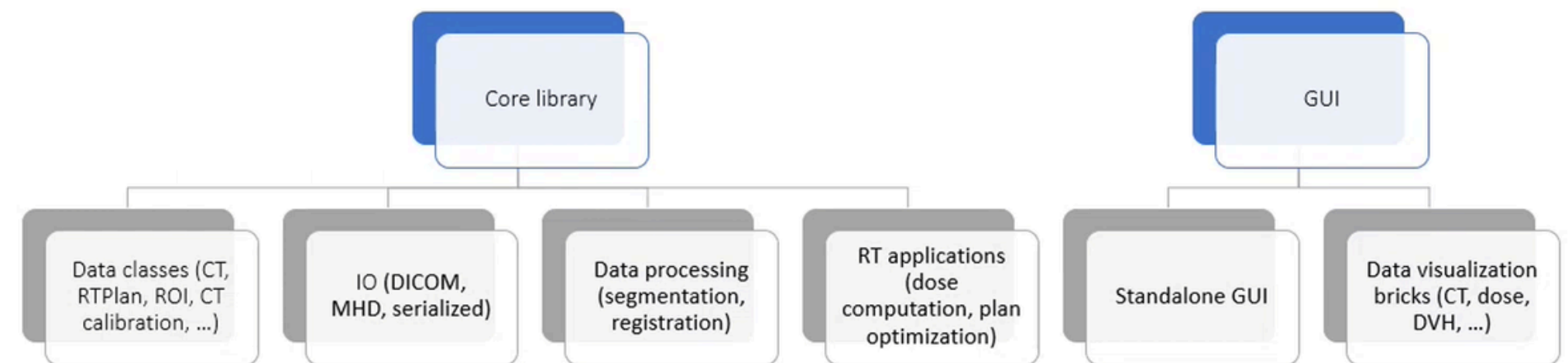
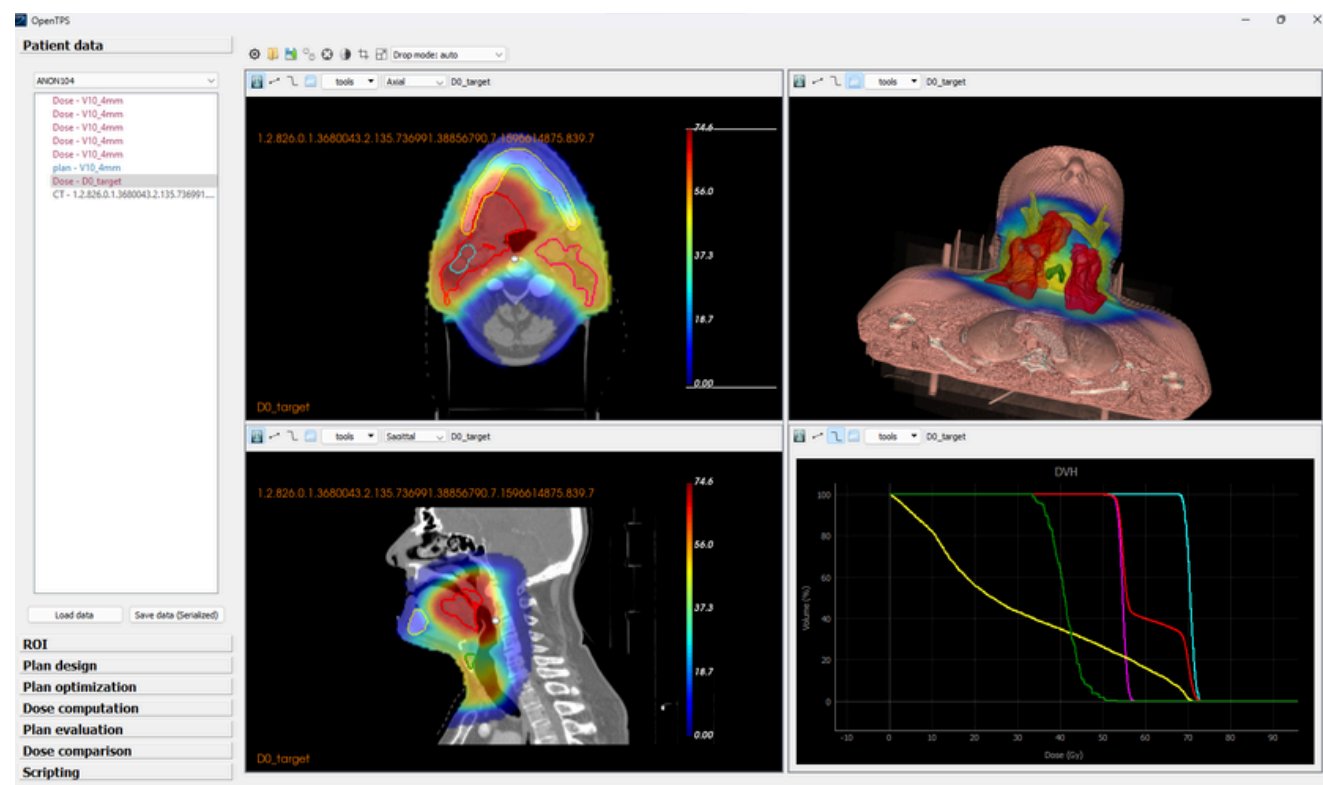


¿Qué es OpenTPS y cómo se aplicó en este trabajo?

Software a utilizar



Prototyping in RT with OpenTPS



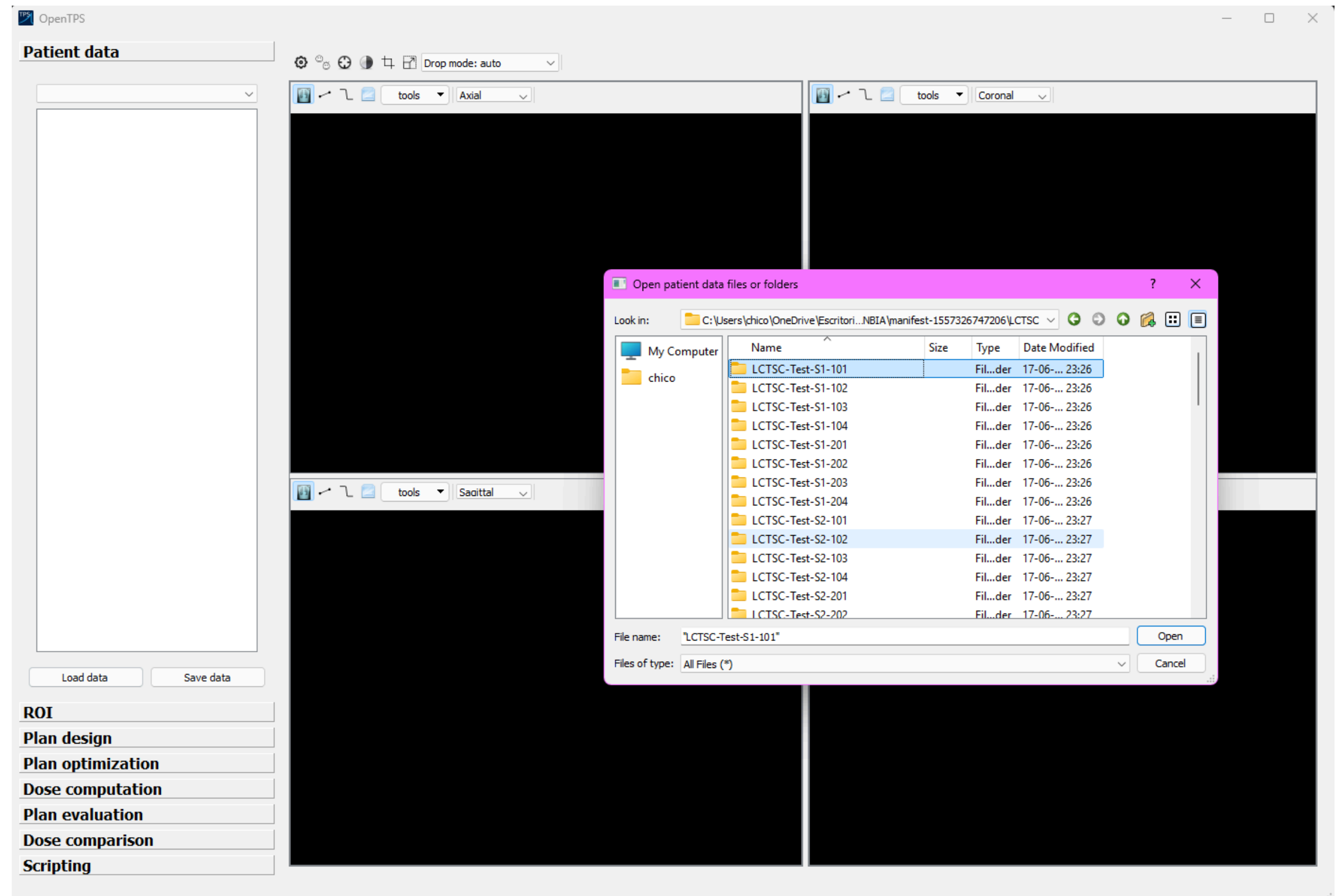
CT, ROI, DICOM y plan de tratamiento

Plan

Un plan de tratamiento en radioterapia es el conjunto completo de parámetros físicos y clínicos necesarios para irradiar un tumor de forma segura y efectiva.

CT

Las imágenes de tomografía computarizada (CT) son escaneos tridimensionales del cuerpo del paciente, compuestos por miles de “rebanadas” o cortes axiales.



CT, ROI, DICOM y plan de tratamiento

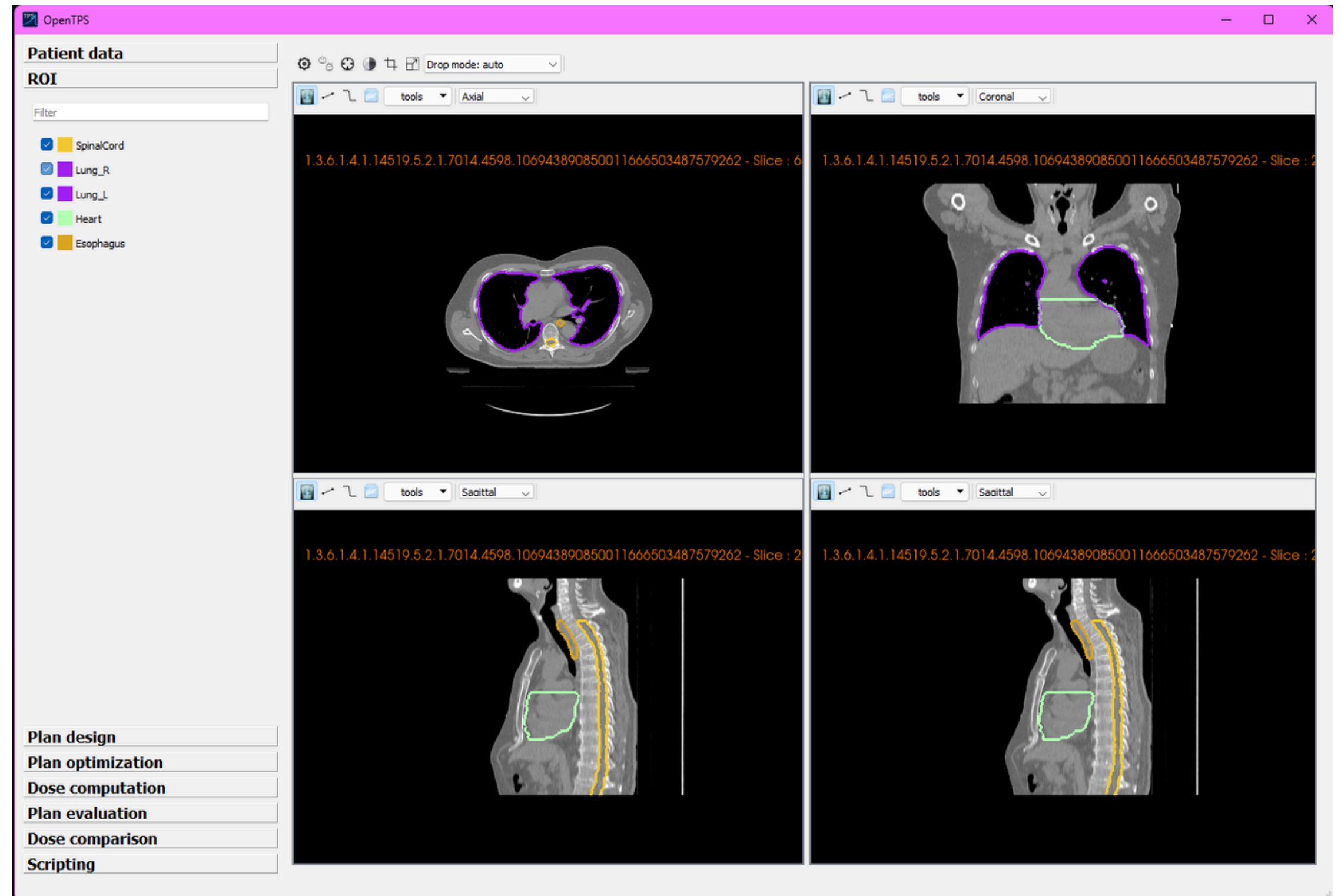
ROI

Los ROI (Regions of Interest) son áreas anatómicas delineadas manual o automáticamente sobre la imagen CT.

Los puntos de interés se centran más en facilitar la visualización y posición del tumor y los órganos.

DICOM

DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) es el estándar internacional para el manejo, almacenamiento e intercambio de imágenes médicas.



Modificacion de OpenTPS

```
ator.py C:\...\doseCalculation 2 | doseCalculationConfig.py C:\...\site-packages\... | doseCalculationConfig.py C:\...\opentps_core\... 2
s > chico > OneDrive > Escritorio > tesis > opentps > opentps_core > opentps > core > processing > doseCalculation > protons > mcsquareDoseCa
44 class MCsquareDoseCalculator(AbstractMCDoseCalculator, AbstractDoseInfluenceCalcul
438 def computeBeamlets(self, ct: Sequence[CTImage], plan: ProtonPlan, roi: Option
475
476     if platform.system() == "Linux2":
477         beamletDose = self._computeBeamletsLinux()
478     else:
479         self._startMCsquare()
480         beamletDose = self._importBeamlets()
481
482     # INICIO DEL CÓDIGO AÑADIDO
483     try:
484         from opentps.core.io.serializedObjectIO import saveBeamlets
485
486         ruta_de_guardado = 'C:/Users/chico/openTPS_workspace/Simulations/ddm_exportada_auto.blm'
487
488         saveBeamlets(beamletDose, ruta_de_guardado)
489
490         logger.info(f"DDM guardada automáticamente en: {ruta_de_guardado}")
491     except Exception as e:
492         logger.error(f"Error al intentar guardar la DDM: {e}")
493     # FIN DEL CÓDIGO AÑADIDO
494
495     return beamletDose
```

Se tuvo que modificar el código fuente de OpenTPS con el objetivo de interceptar la matriz calculada en la memoria RAM antes de que el software la procesara internamente y la desechara. La modificación se realizó en el módulo encargado de la comunicación con el motor de simulación Monte Carlo (MCsquare).

Creacion del plan

Plan design

plan name:

New plan design

Scanner folder:

\\MCsquare\Scanners\UCL_Toshiba

Validate

BDL file:

BDL_default_DN_RangeShifter.txt

Validate

Spot spacing:

5,00 mm

Layer spacing:

2,00 mm

Target margin:

5,00 mm

Proximal layers:

1

Distal layers:

1

Beam 1: G=30.0°, C=0.0°

Beam 2: G=330.0°, C=0.0°

Se definieron 2 angulos en donde se irradiará, de 30 y 330 grados.

Luego de crear el plan, se optimiza, definiendo objetivos para cada Región de Interés. en este caso, para GTV-1

python								
	ROI	Robust	Weight	Dmin (Gy)	Weight	Dmax (Gy)	Weight	Dmean (Gy)
1	Lung-Right	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	1.0	999.0	1.0	999.0
2	Lung-Left	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	1.0	999.0	1.0	999.0
3	Heart	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	1.0	999.0	1.0	999.0
4	Esophagus	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	1.0	999.0	1.0	999.0
5	Spinal-Cord	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0	1.0	999.0	1.0	999.0
6	GTV-1	<input type="checkbox"/>	200	54	200	45	1.0	999.0

Plan optimization

Plan design:

New plan design

CT:

1.3.6.1.4.1.32722.99.99.34905847539837720

Objectives:

200.0 x GTV-1>54.0 Gy

200.0 x GTV-1<45.0 Gy

Open objectives panel

Optimization algorithm:

Scipy-LBFGS (recommended)

Advanced configuration

☒ Place spots

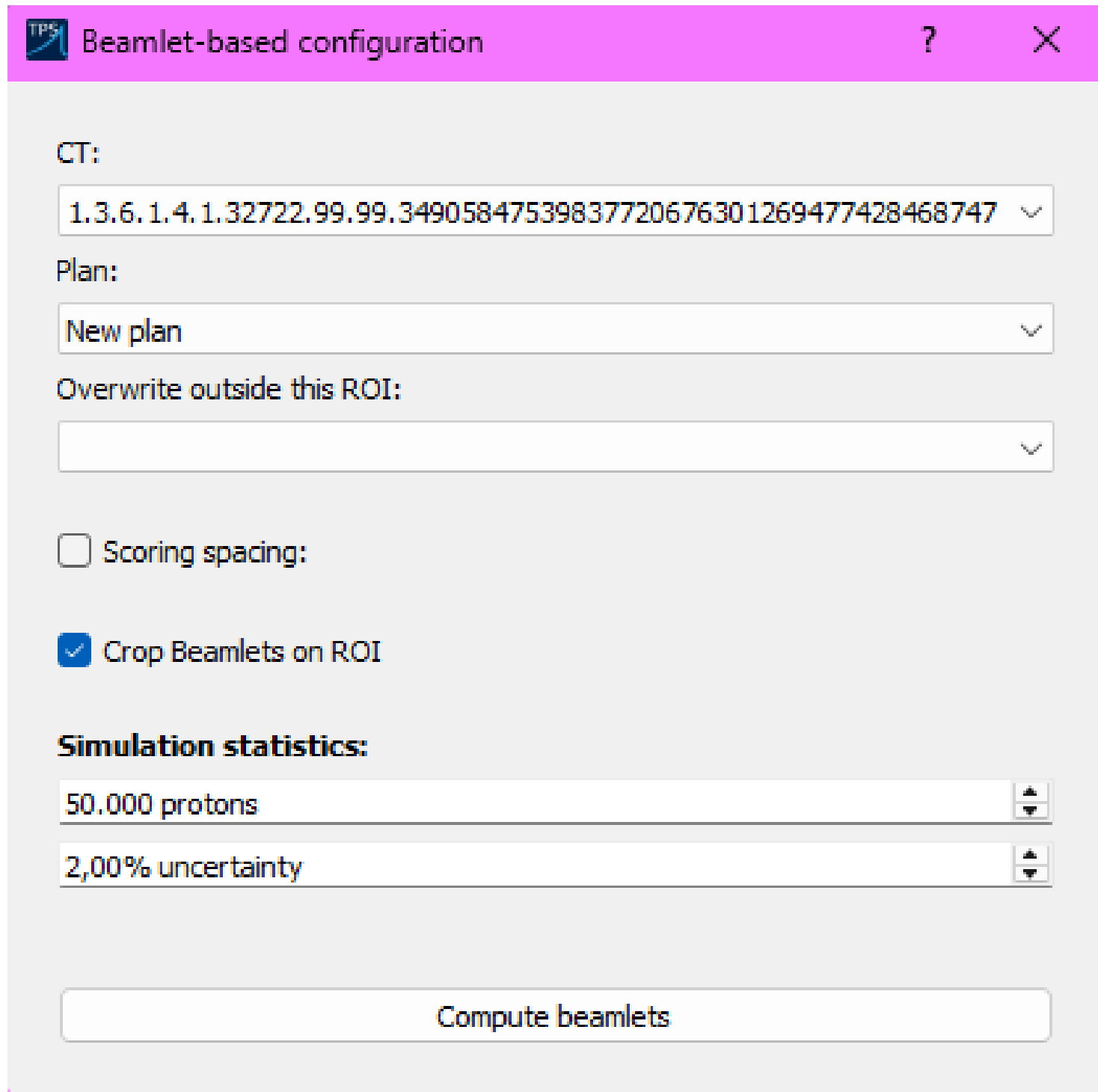
☒ Compute beamlets

plan name:

New plan

Optimize plan

Optimización del plan



Beamlet-based configuration

CT:
1.3.6.1.4.1.32722.99.99.34905847539837720676301269477428468747

Plan:
New plan

Overwrite outside this ROI:

☐ Scoring spacing:

☒ Crop Beamlets on ROI

Simulation statistics:

50.000 protons

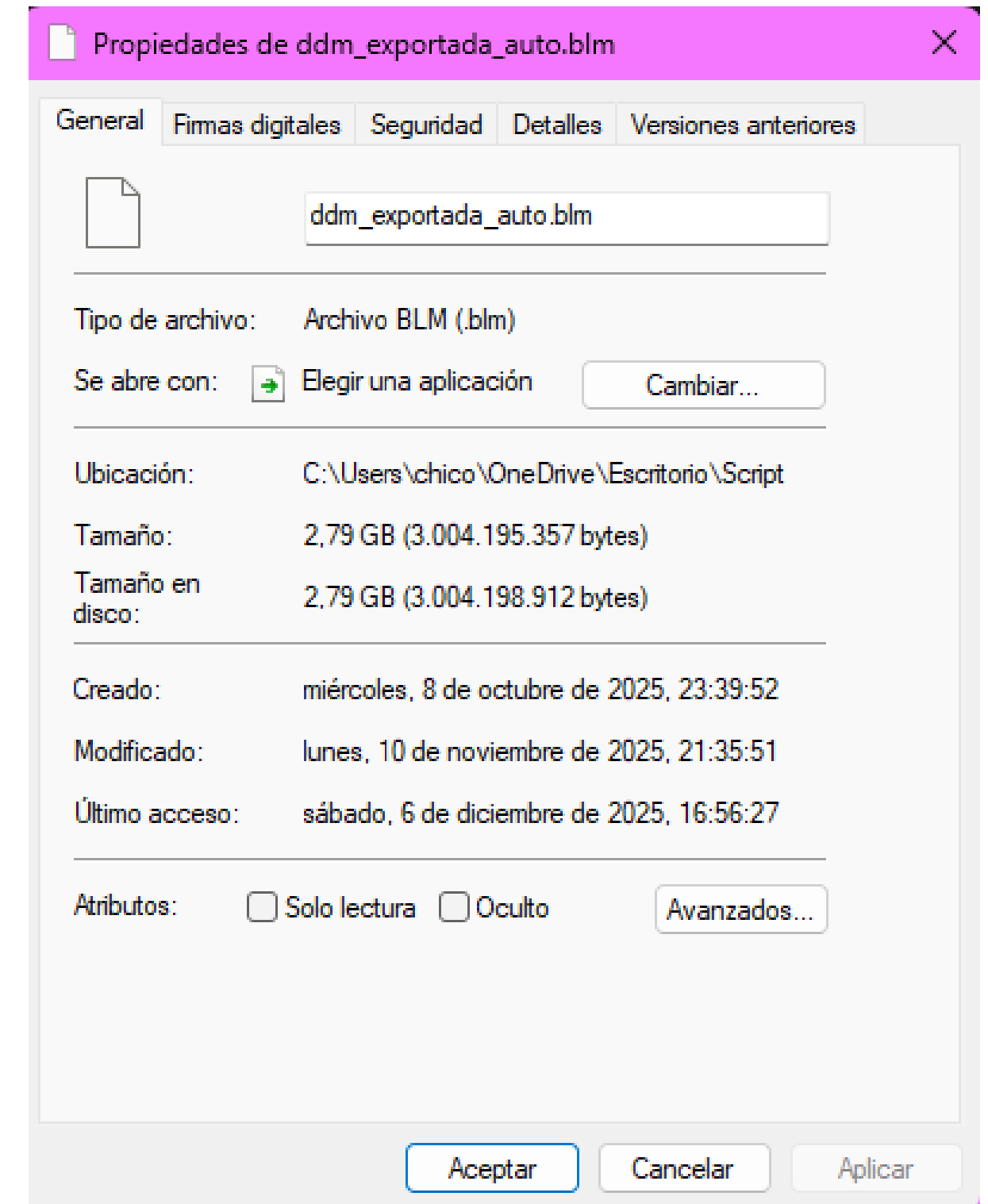
2,00% uncertainty

Compute beamlets

En este caso, estamos seleccionando 50.000 protones por spot. Esto es un estándar para optimización porque nos ofrece un equilibrio perfecto: es lo suficientemente rápido para no detener el flujo de trabajo clínico, pero tiene la precisión estadística suficiente para que el optimizador tome decisiones correctas sobre los pesos de cada punto.

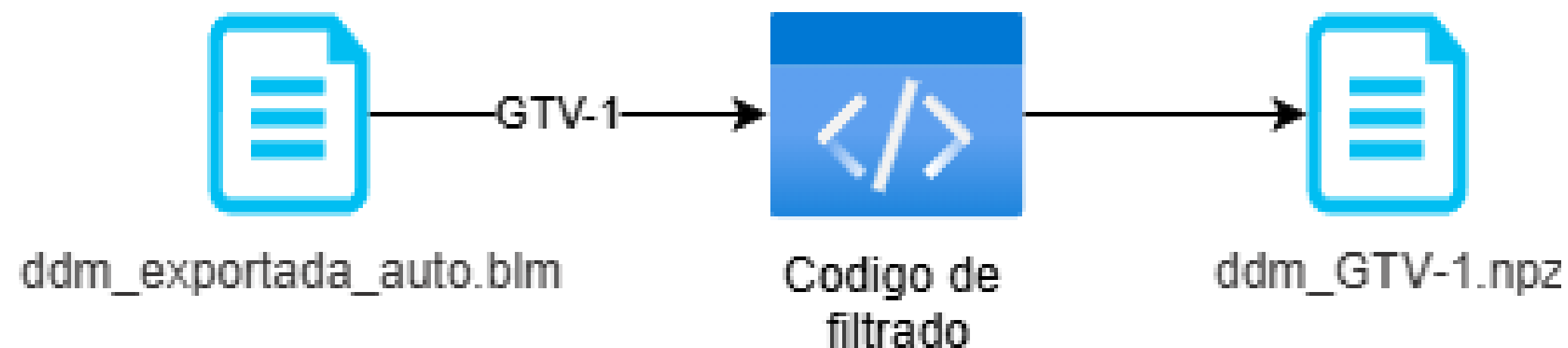
Outputs

Una vez terminada la optimización, se obtiene un archivo llamado “ddm_exportada_auto.blm”, la cual es un archivo binario que contiene la matriz de deposición de dosis de todo el paciente. con Dimensiones de la matriz (Vóxeles x Beamlets): (23855104, 4604)

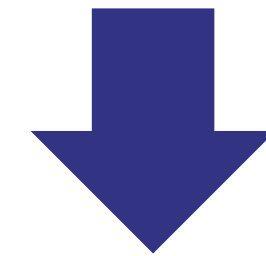


Filtrado

Se filtró toda la matriz para obtener exclusivamente la matriz del objeto de interés (GTV-1) con la ayuda de un algoritmo, el cual busca en los archivos .dcm del paciente para hacer match con el objeto necesitado.



```
verDDM.py > ...  
1 import numpy as np  
2 data = np.load('ddm_GTV-1.npz')  
3 print(data.files)  
4 matriz1 = data['indices']  
5 matriz2 = data['indptr']  
6 matriz3 = data['format']  
7 matriz4 = data['shape']  
8 print("Matriz indices:", matriz1)  
9 print("Matriz indptr:", matriz2)  
10 print("Matriz format:", matriz3)  
11 print("Matriz shape:", matriz4)  
12
```



```
['indices', 'indptr', 'format', 'shape', 'data']  
Matriz indices: [30298 30030 29941 ... 25584 25511]  
Matriz indptr: [ 0 93 105 ... 226124 226125]  
Matriz format: b'csc'  
Matriz shape: [30304 9186]
```


Adaptación a formato .txt

Se utilizó otro algoritmo para poder traspasar el archivo desde el formato .npz hacia .txt, con las columnas necesarias para utilizarlo dentro de la investigación de la escuela.

Los resultados fueron 2 archivos .txt por ángulo, con las columnas:
voxel; beamlet; intensidad

```
voxel;beamlet;intensidad  
30298;0;0.0008819002  
30030;0;0.0010555763  
29941;0;0.0016270606  
29939;0;0.0064525763  
29886;0;0.0002219828  
29885;0;0.0009188232  
29769;0;0.00056283426  
29768;0;0.00024760846
```

```
voxel;beamlet;intensidad  
12539;4588;0.0017771515  
24520;4589;0.0011725448  
24219;4589;0.0011340622  
27812;4592;0.0026487655  
27919;4593;9.693477e-05  
27918;4593;0.0014603417  
30264;4595;0.0011088465  
29760;4596;0.00050207716
```

Muchas gracias por su atención



Nicolás Brevis
ni.brevis@gmail.com