Parador de Antequera

JORNADAS SARH

Nuevas Técnicas y Retos de los Sistemas de Planificación de Tratamientos de Radioterapia

Antequera, 23 de octubre 2026



SOCIEDAD ANDALUZA DE RADIOFÍSICA HOSPITALARIA

www.sarh.es

Planificación robusta en protonterapia



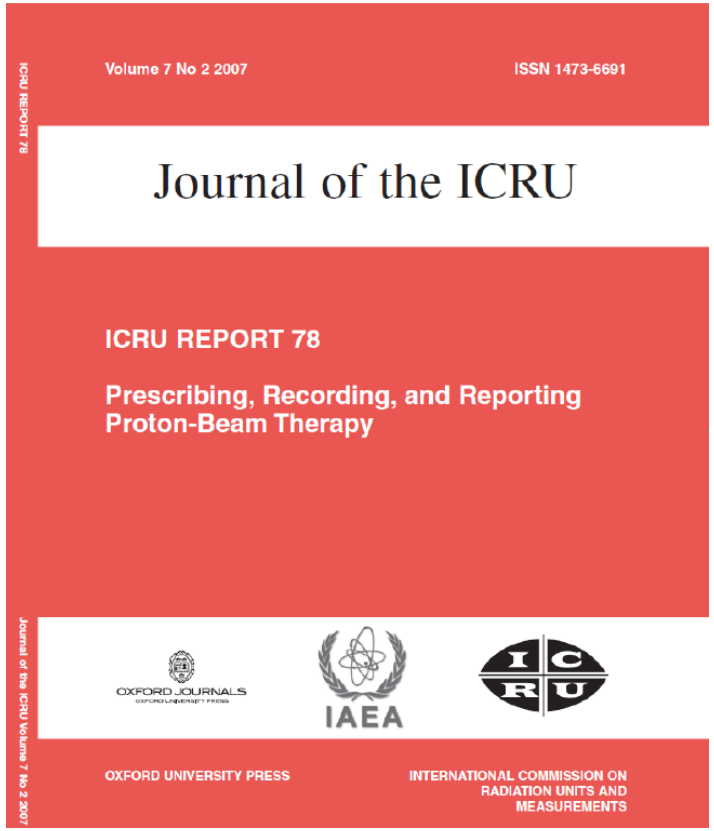


Juan María Pérez Moreno

SaludMadrid Hospital Universitario de Fuenlabrada

Introducción

Objetivo: impartir dosis terapeútica al volume
tolerancia al tejido sano



Definici

- GTV
- CTV
- PTV
- OAR

Volúmenes objetivo

Technique	Site	Total Dose	# Fractions	Fraction Pattern	Fraction Dose
Fase1	CTV_54	54.00 CGE	27	Daily	2.00 CGE
Fase1-2	CTV_74	74.00 CGE	37	Daily	2.00 CGE

Objetivos clínicos de los volúmenes objetivo:

- D98% ≥ 95% de la dosis de prescripción
- D2% ≤ 107% de la dosis de prescripción
- D0.03cc ≤ 110% de la dosis de prescripción

OBJETIVOS CLÍNICOS DEL TRATAMIENTO

	Obligatorio	A relajar si su cumplimiento implica pérdida de cobertura volumen objetivo
Optic Nerve R	D0.03cc ≤ 54 GyRBE	
Optic Nerve L	D0.03cc ≤ 54 GyRBE	
Chiasm	D0.03cc ≤ 54 GyRBE	
Brainstem_Surface	D0.03cc ≤ 60 GyRBE	
Brainstem_Core	D0.03cc ≤ 54 GyRBE	
SpinalCord_Surface	D0.03cc ≤ 60 GyRBE	
SpinalCord_Core	D0.03cc ≤ 54 GyRBE	
Cochlea R	Dmean < 45 GyRBE	Si necesario relajar uno de los dos lados
Cochlea L	Dmean < 45 GyRBE	
Brain - CTV		V70 < 1.5 cc V60 < 5cc
Lens R		D0.03cc ≤ 5 GyRBE
Lens L		D0.03cc ≤ 5 GyRBE
Retina R / EyePost R	D0.03cc ≤ 45 GyRBE	
Retina L / EyePost L	D0.03cc ≤ 45 GyRBE	
EyeAnt R	D0.03cc ≤ 50 GyRBE	
EyeAnt L	D0.03cc ≤ 50 GyRBE	
Eye R	Dmean < 35 GyRBE D0.03 < 50 GyRBE	
Eye L	Dmean < 35 GyRBE D0.03 < 50 GyRBE	
Lacrimal Glnd R		Dmean < 30 GyRBE
Lacrimal Glnd L		Dmean < 30 GyRBE
Parotid_L		Dmean < 26 GyRBE V30 < 50%
Parotid_R		Dmean < 26 GyRBE V30 < 50%
Glnd_Submand_L		Dmean < 35 GyRBE
Glnd_Submand_R		Dmean < 35 GyRBE
Cavity_Oral		Dmean < 40 GyRBE D0.03cc < 50 GyRBE
Larynx_SG		Dmean < 40 GyRBE
Glottis		Dmean < 35 GyRBE
Cricopharyngeal muscle		Dmean < 45 GyRBE

Introducción

Radioterapia fraccionada:

- Asegurar reproducibilidad del tratamiento
- Herramientas y márgenes para asegurar el objetivo terapeútico a pesar de las incertumbres y variabilidad.

Planes de tratamiento robustos

¿Qué entendemos por robustez?

Robustez: baja sensibilidad a cambios (“razonables”)

Baja sensibilidad: desviaciones aceptables de la planificación aprobada

Cambios razonables: variaciones esperadas, compatibles con las incertidumbres de nuestro centro.

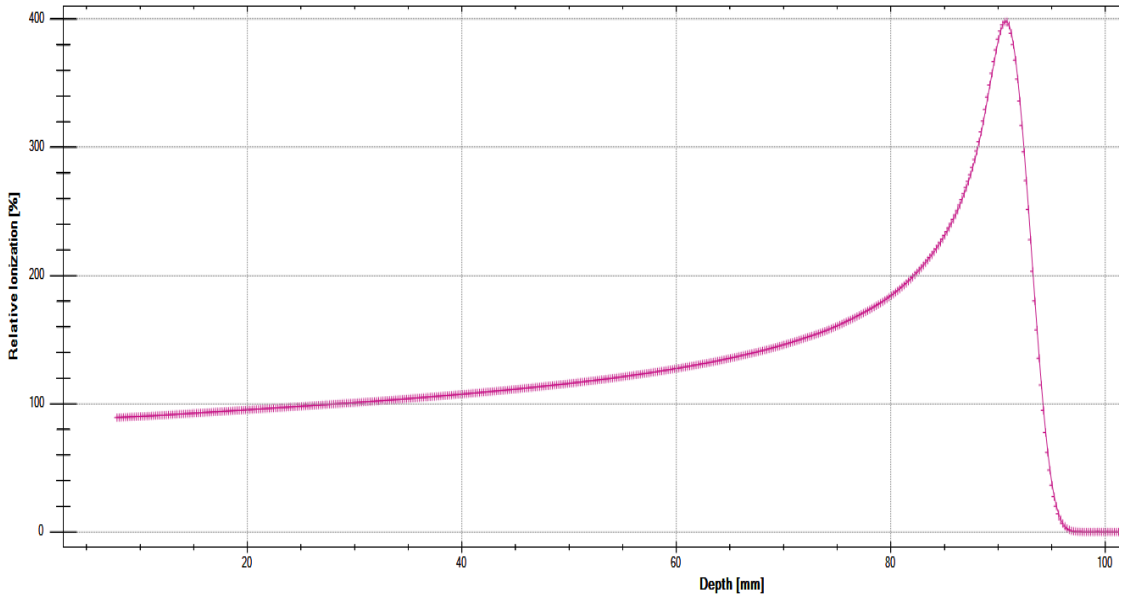
Binomio robustez-incertidumbre

Robustez e incertidumbre: protones

Las mismas fuentes de incertidumbre que en fotones: dosimetría relativa y de referencia, cálculo de dosis, imagen, delineación de volúmenes, setup y de irradiación.

+

Incertidumbre de Rango



Robustez y margen de rango

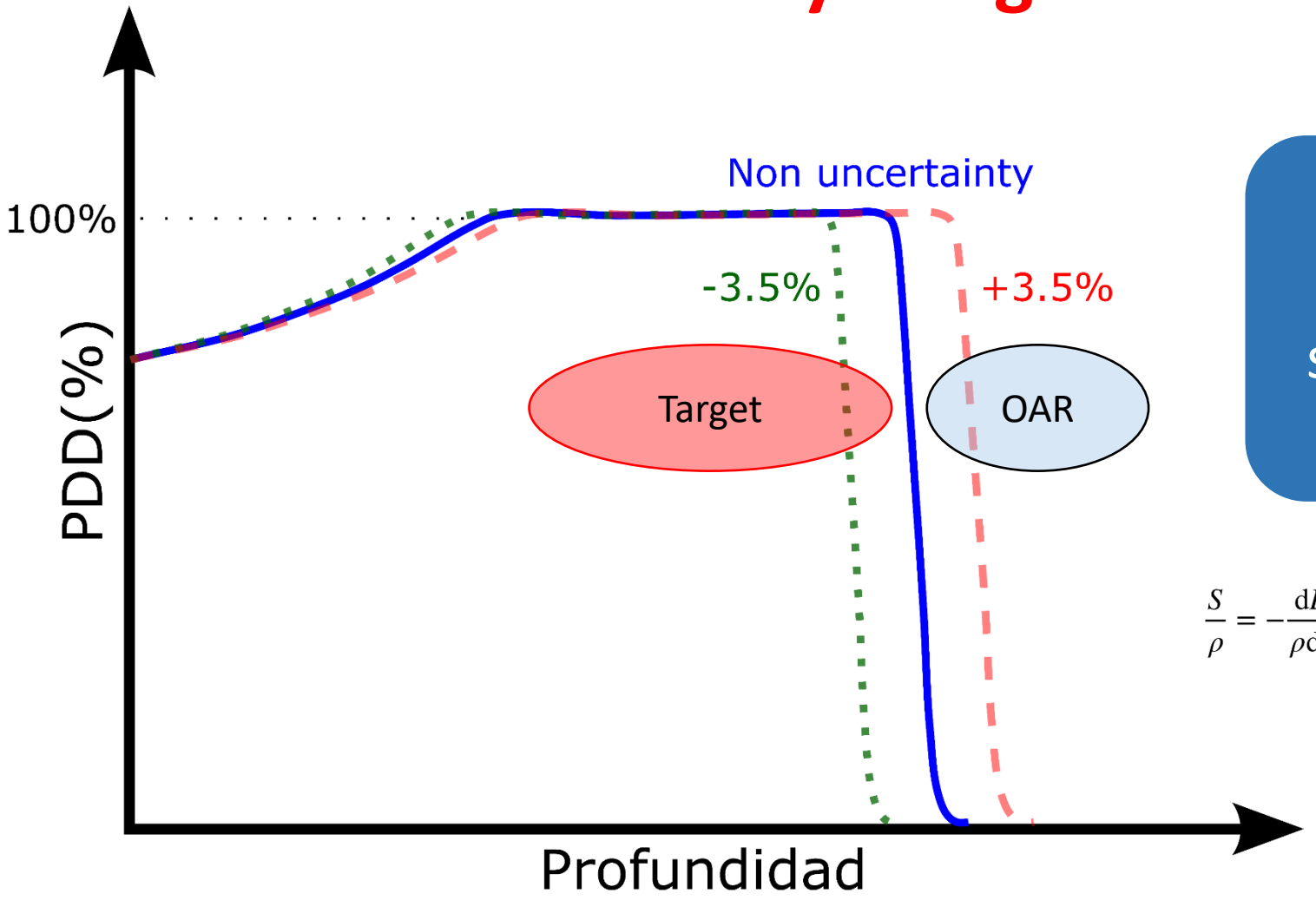
H Paganetti: Phys Med Biol. 2012 Jun 7; 57(11): R99–R117

Source of range uncertainty in the patient	Range uncertainty without Monte Carlo	Range uncertainty with Monte Carlo
Independent of dose calculation:		
Measurement uncertainty in water for commissioning	± 0.3 mm	± 0.3 mm
Compensator design	± 0.2 mm	± 0.2 mm
Beam reproducibility	± 0.2 mm	± 0.2 mm
Patient setup	± 0.7 mm	± 0.7 mm
Dose calculation:		
Biology (always positive) ^	+ ~0.8% [g]	+ ~0.8% [g]
CT imaging and calibration	± 0.5% [b]	± 0.5% [b]
CT conversion to tissue (excluding I-values)	± 0.5% [a]	± 0.2% [d]
CT grid size	± 0.3%	± 0.3%
Mean excitation energy (I-values) in tissues	± 1.5% [c]	± 1.5% [c]
Range degradation; complex inhomogeneities	− 0.7% [e]	± 0.1 %
Range degradation; local lateral inhomogeneities *	± 2.5% [f]	± 0.1 %
Total (excluding *, ^)	2.7% + 1.2 mm	2.4% + 1.2 mm
Total (excluding ^)	4.6% + 1.2 mm	2.4% + 1.2 mm

$$\frac{S}{\rho} = -\frac{\mathrm{d}E}{\rho \mathrm{d}x} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2}\left[\ln\frac{2m_e c^2\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z}\right]$$

Conversión de HU a poderes de frenado

Robustez y margen de rango

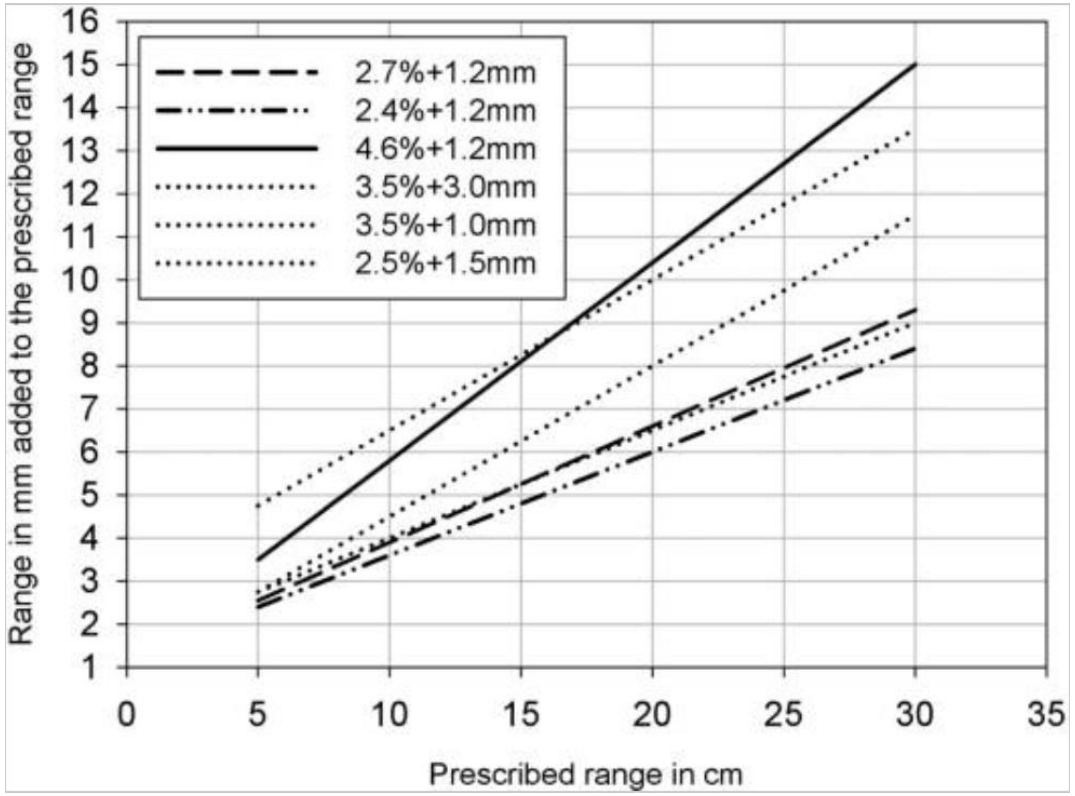


Infradosificación en targets / sobredosificación en OARs

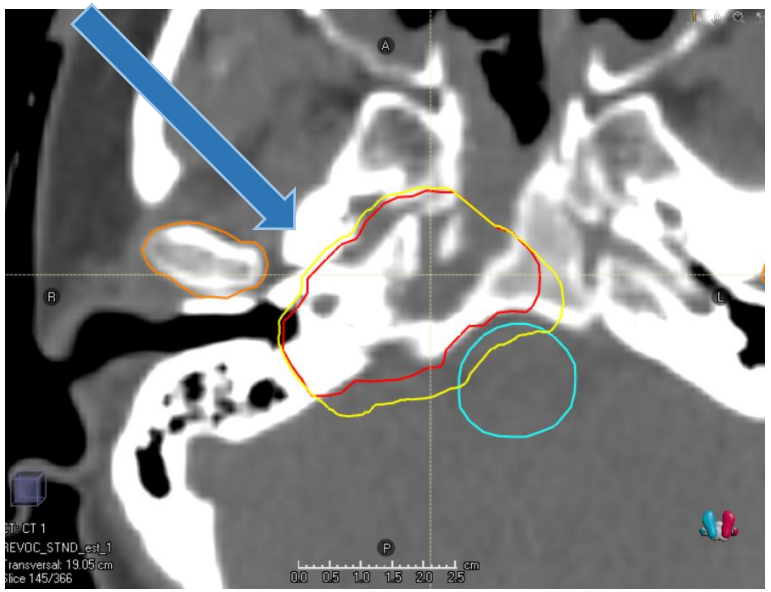
$$\frac{S}{\rho} = -\frac{dE}{\rho dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2}\left[\ln\frac{2m_e c^2\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z}\right]$$

Robustez y margen de rango

H Paganetti: Phys Med Biol. 2012 Jun 7; 57(11): R99–R117.



Margen específico para cada haz(BSTV), además del margen CTV-PTV de setup



Correlación entre setup y rango

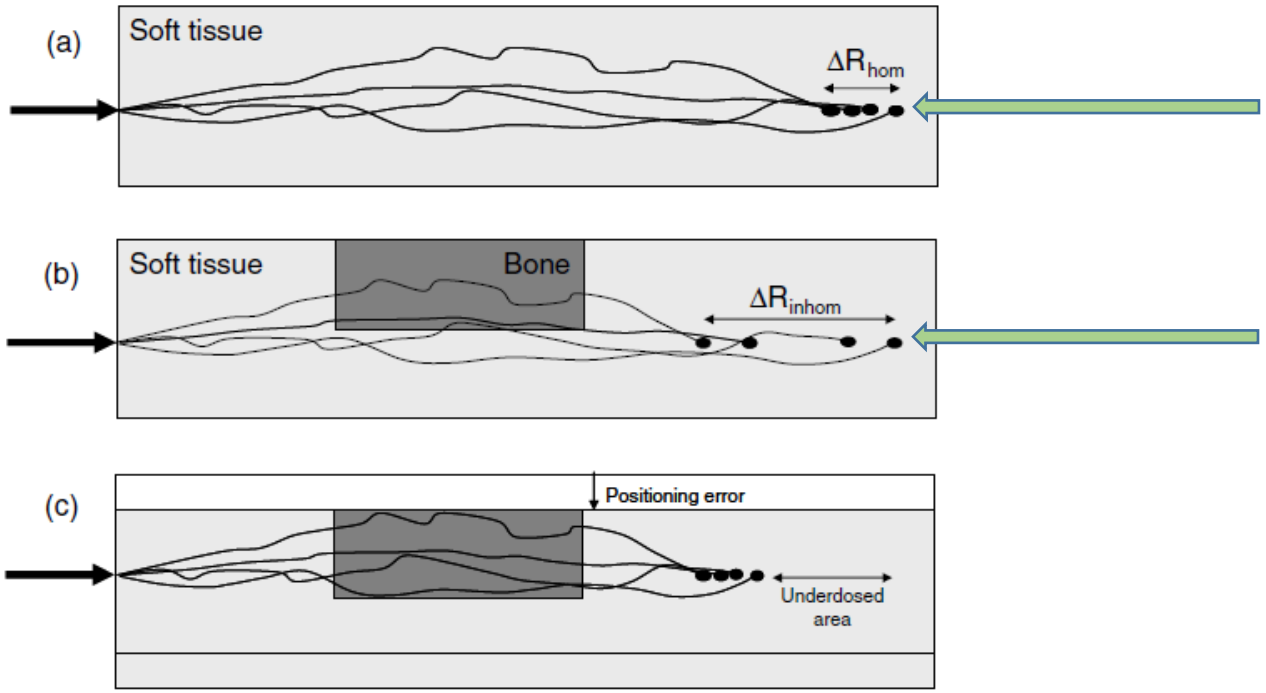


Figure 1. Potential effect of shifted density heterogeneities on the Bragg peak dose distribution. (a) Proton tracks through a homogenous medium. (b) Similar tracks through a heterogeneous medium. (c) Same tracks through a shifted version of the density heterogeneity. Note the range smearing effect in case b, which disappears in case c, even though the ranges of all Bragg peaks are now reduced.

Cambio en el rango según el recorrido individual = incertidumbre y sensibilidad en la distribución de dosis en el borde distal

IOP Publishing — Physics in Medicine and Biology
Phys. Med. Biol. **53** (2008) 1027–1042 — doi:10.1088/0031-9155/53/4/014

Intensity modulated proton therapy and its sensitivity to treatment uncertainties 1: the potential effects of calculational uncertainties

A J Lomax

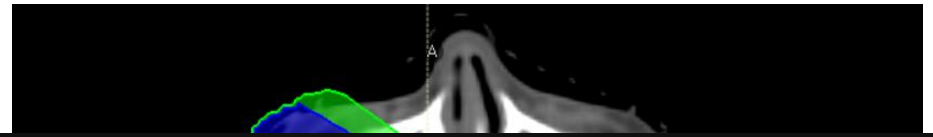
Centre for Proton Radiotherapy, Paul Scherrer Institute, 5232 Villigen-PSI, Switzerland

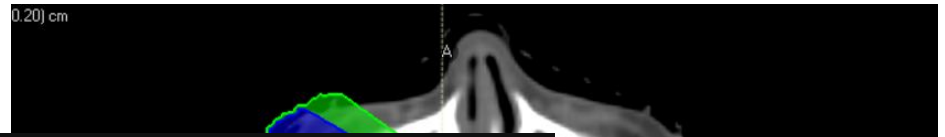
E-mail: tony.lomax@psi.ch

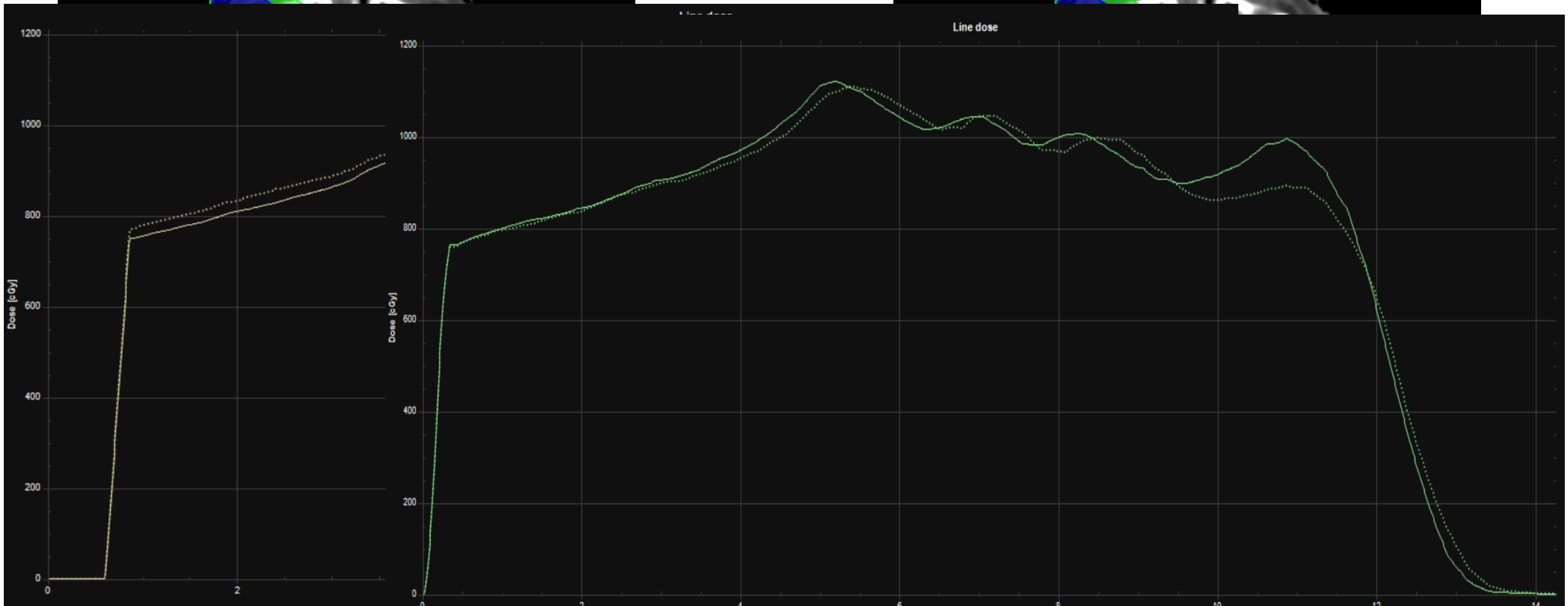
Received 16 July 2007, in final form 29 November 2007
Published 28 January 2008
Online at stacks.iop.org/PMB/53/1027

Efecto de la incertidumbre en protonterapia

2mm in AP
2mm in LAT
3% in Range







Robustez y gestión de la incertidumbre

Fotones: margen setup/geométrico (+ regiones evitables en algunas situaciones)

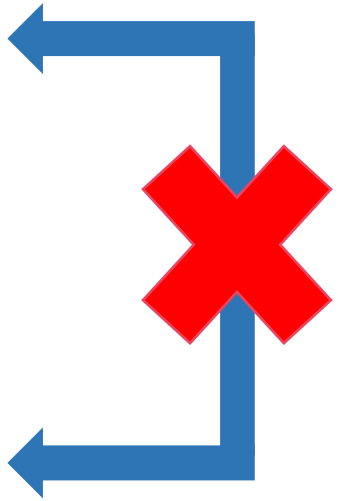
Protones:

- Margen de setup
- Margen dosimétrico (rango)
- Planes robustos (elección de haces)

Robustez: mitigación de influencia de incertidumbres

Estrategia general de planificación:

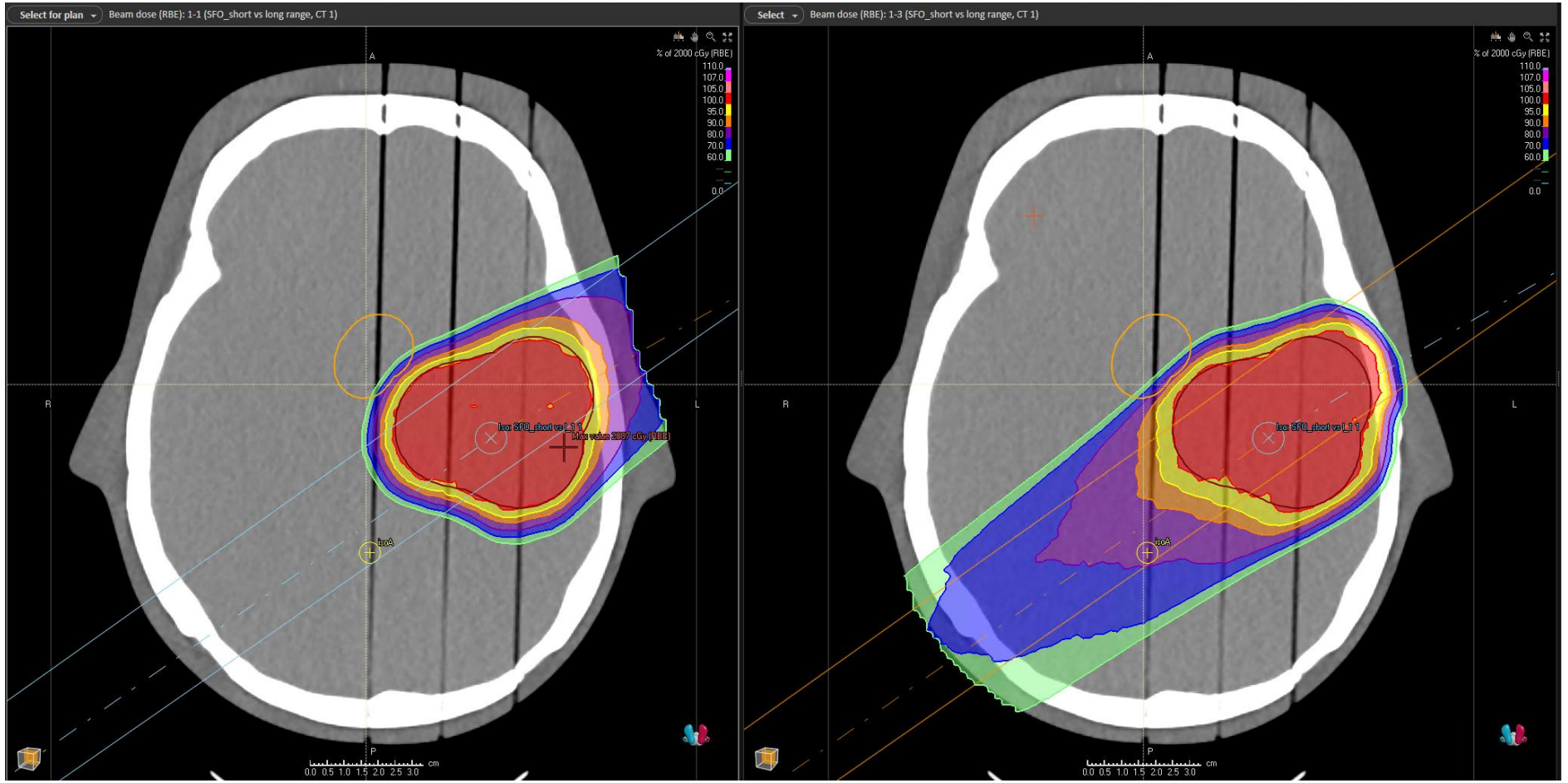
- Minimizar recorrido radiológico
- Evitar bordes distales en OARs
- Evitar heterogeneidades
  - Susceptibles de cambio diario
  - Incidencias tangenciales a interfases



ROBUST PLAN

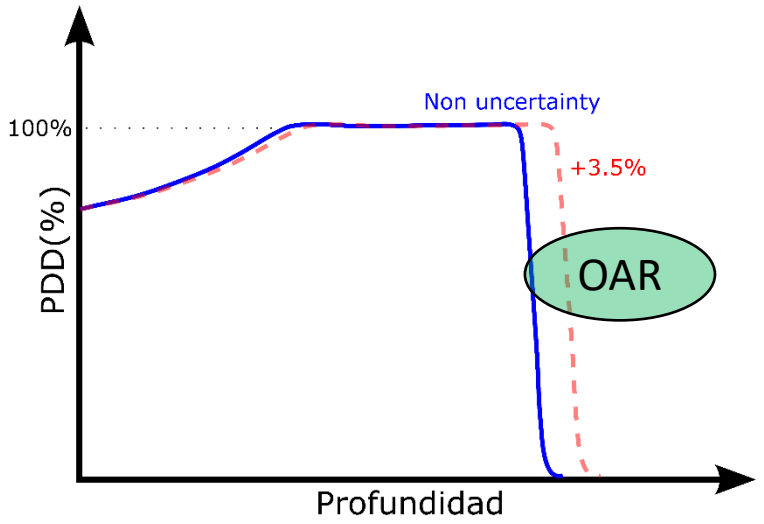
Robustez: mitigación de influencia de incertidumbres

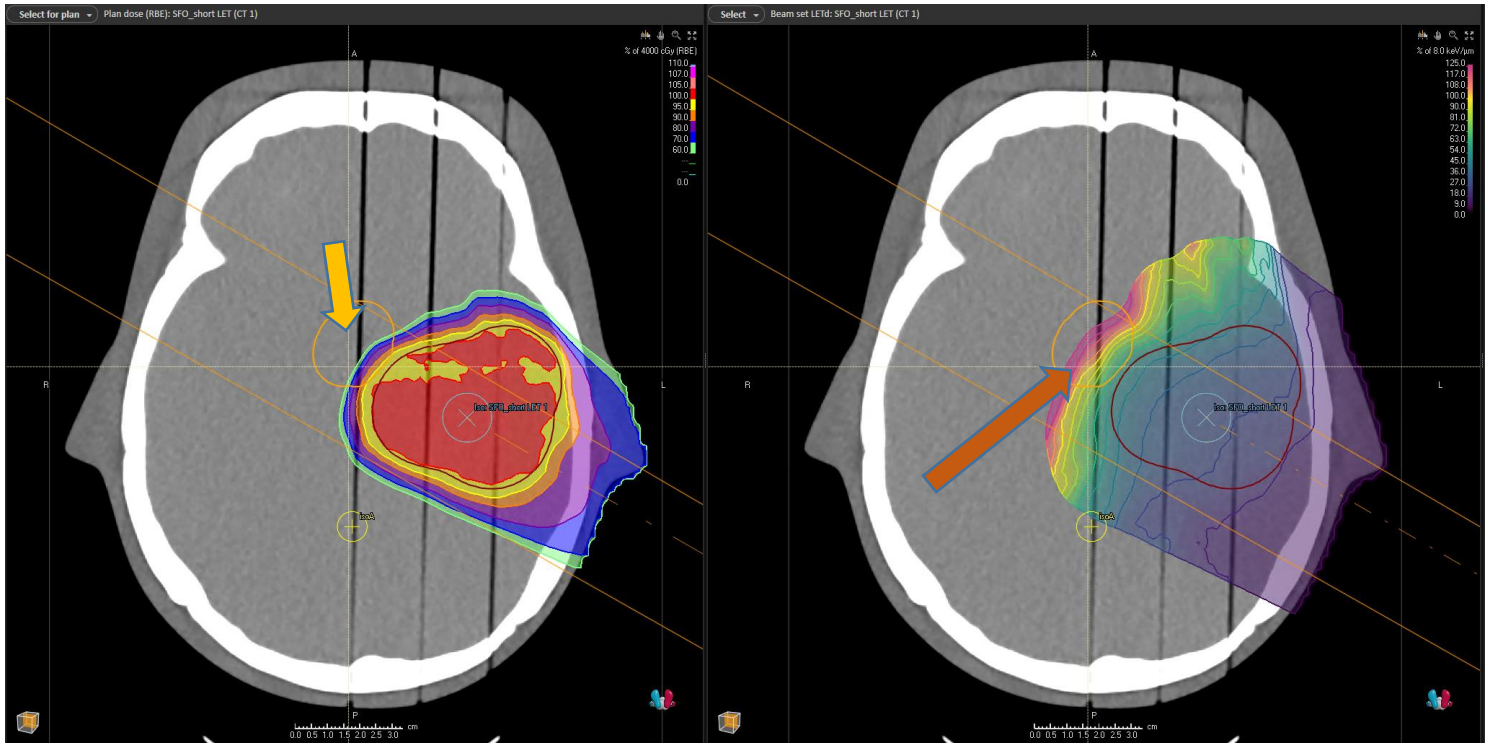
Minimizar recorrido radiológico: tejido sano y dosis integral



Robustez: mitigación de influencia de incertidumbres

Evitar borde distal @ OARs: incertidumbre de rango + efecto biológico





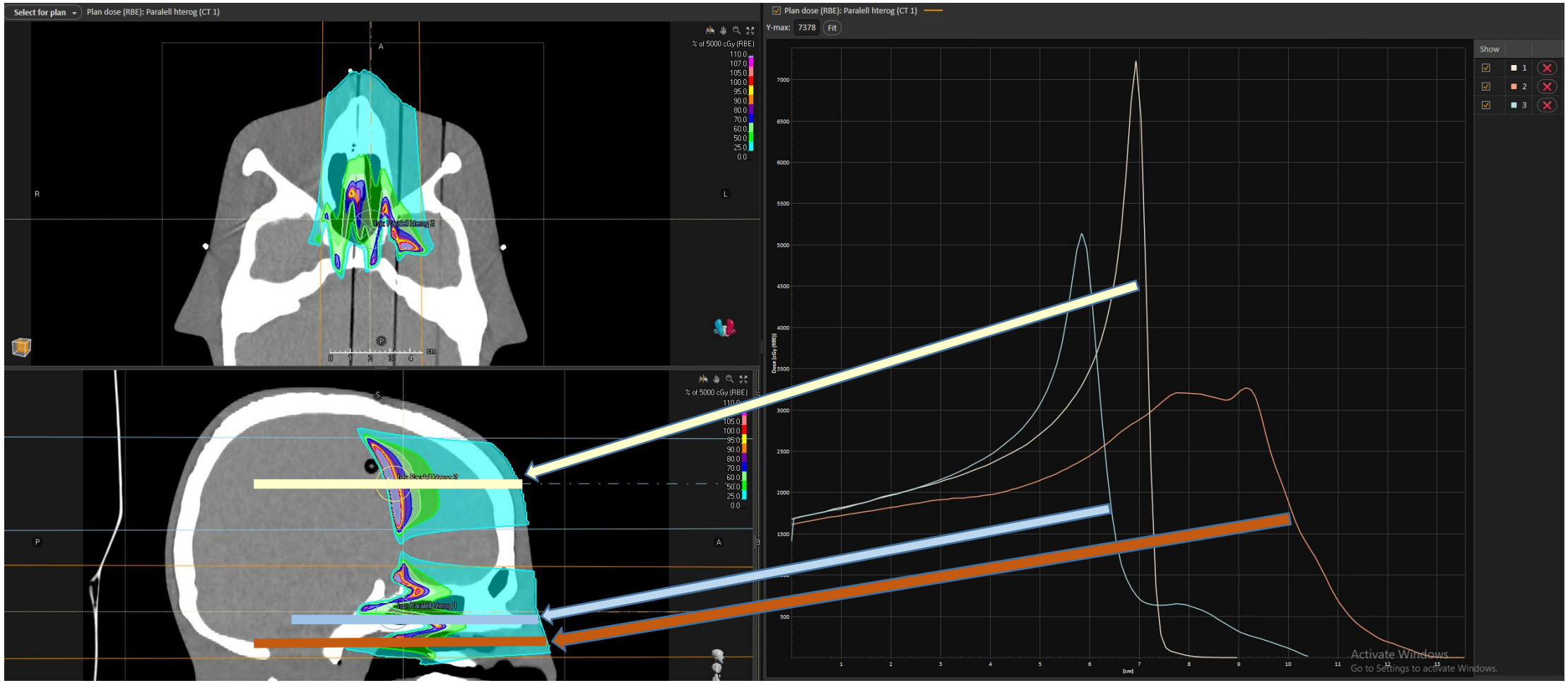
Report of the AAPM TG-256 on the relative biological effectiveness of proton beams in radiation therapy

Harald Paganetti [1,✉], Eleanor Blakely [2], Alejandro Carabe-Fernandez [3], David J Carlson [4], Indra J Das [5], Lei Dong [3], David Grosshans [6], Kathryn D Held [1], Radhe Mohan [6], Vitali Moiseenko [7], Andrzej Niemierko [1], Robert D Stewart [8], Henning Willers [1]

Robustez: mitigación de influencia de incertidumbres

Evitar heterogeneidades paralelas a la dirección del haz

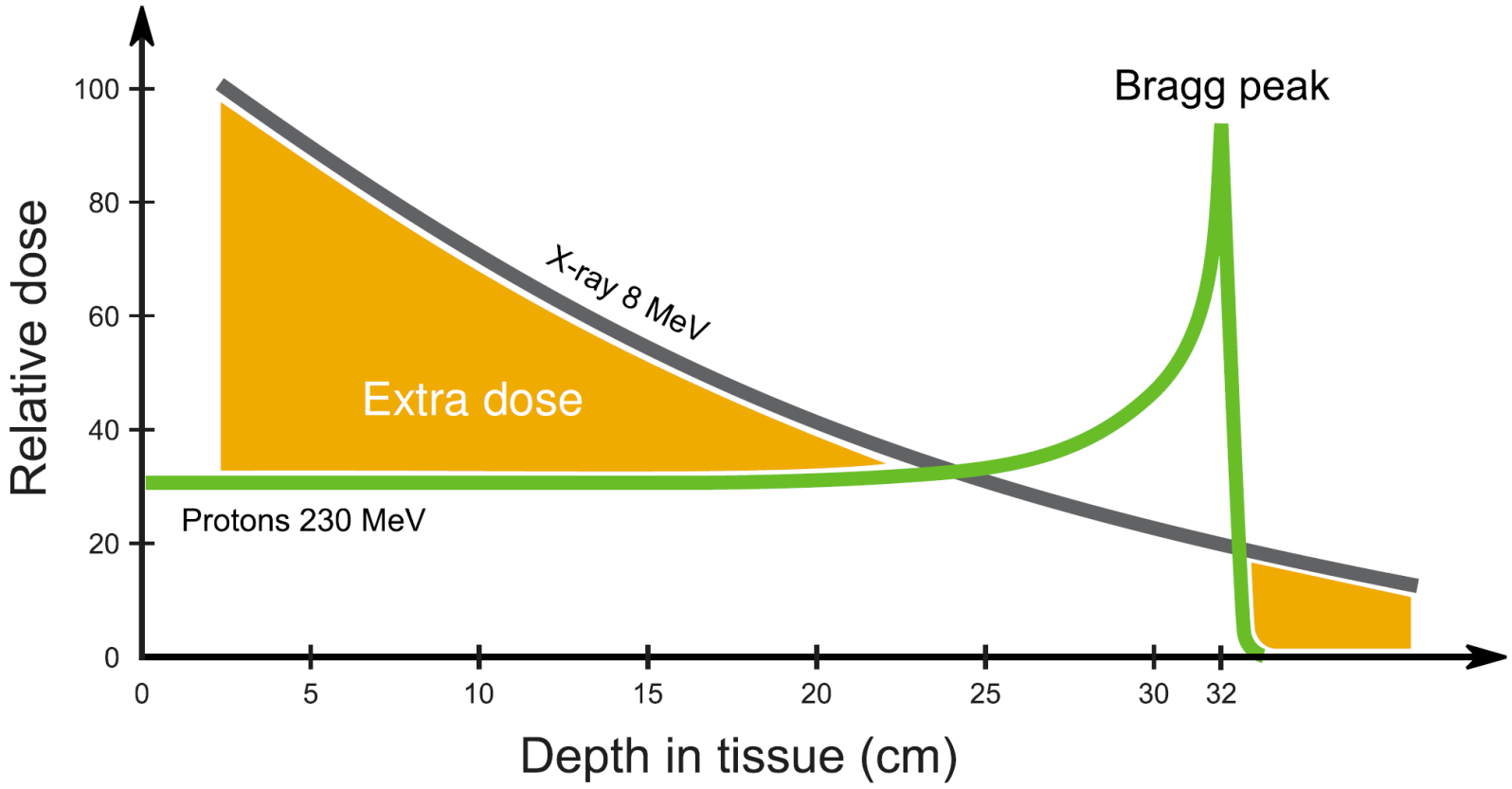
Degradación de la distribución de dosis distal y pérdida del beneficio de p+ (fall off)



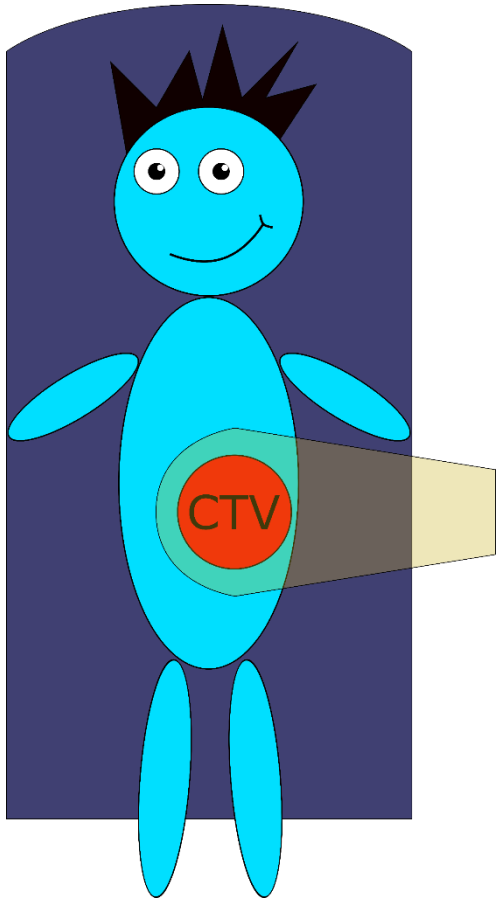
Robustez: mitigación de influencia de incertidumbres

Fotones = Sistema lineal

Protones = Sistema NO lineal

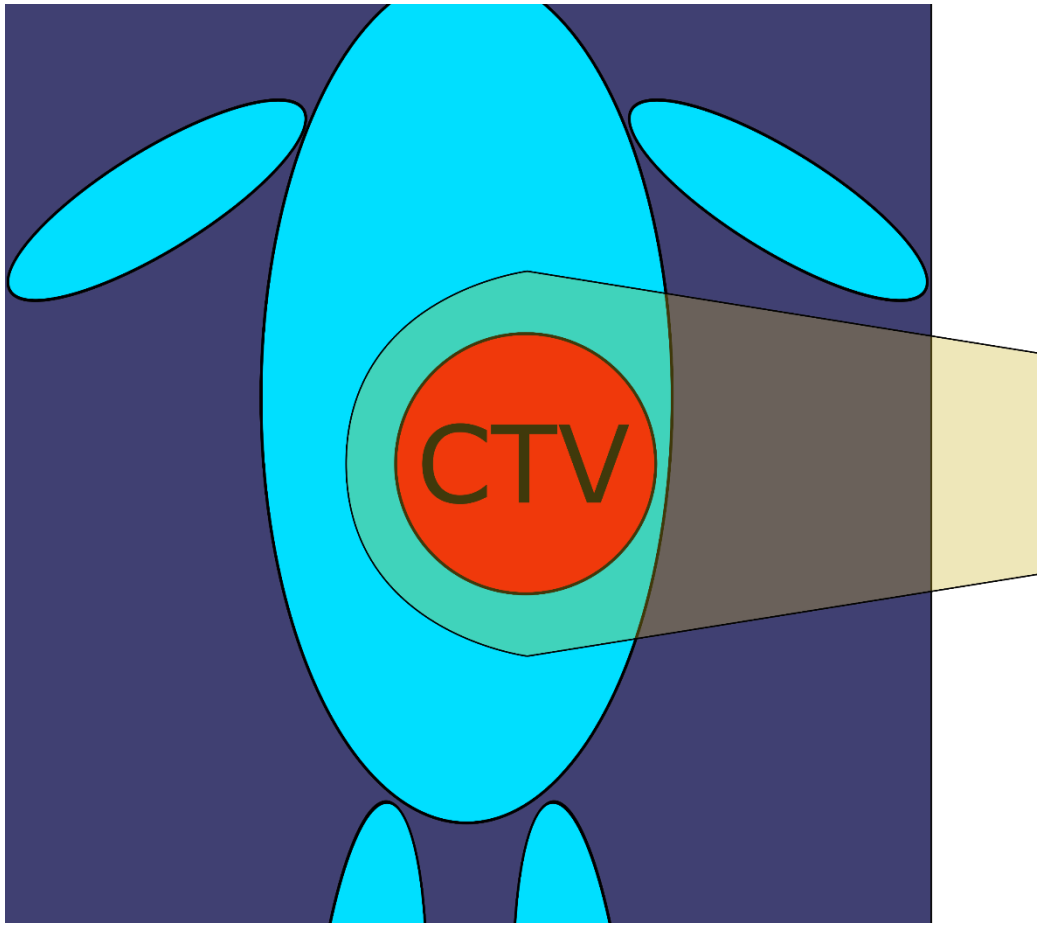


Fotones



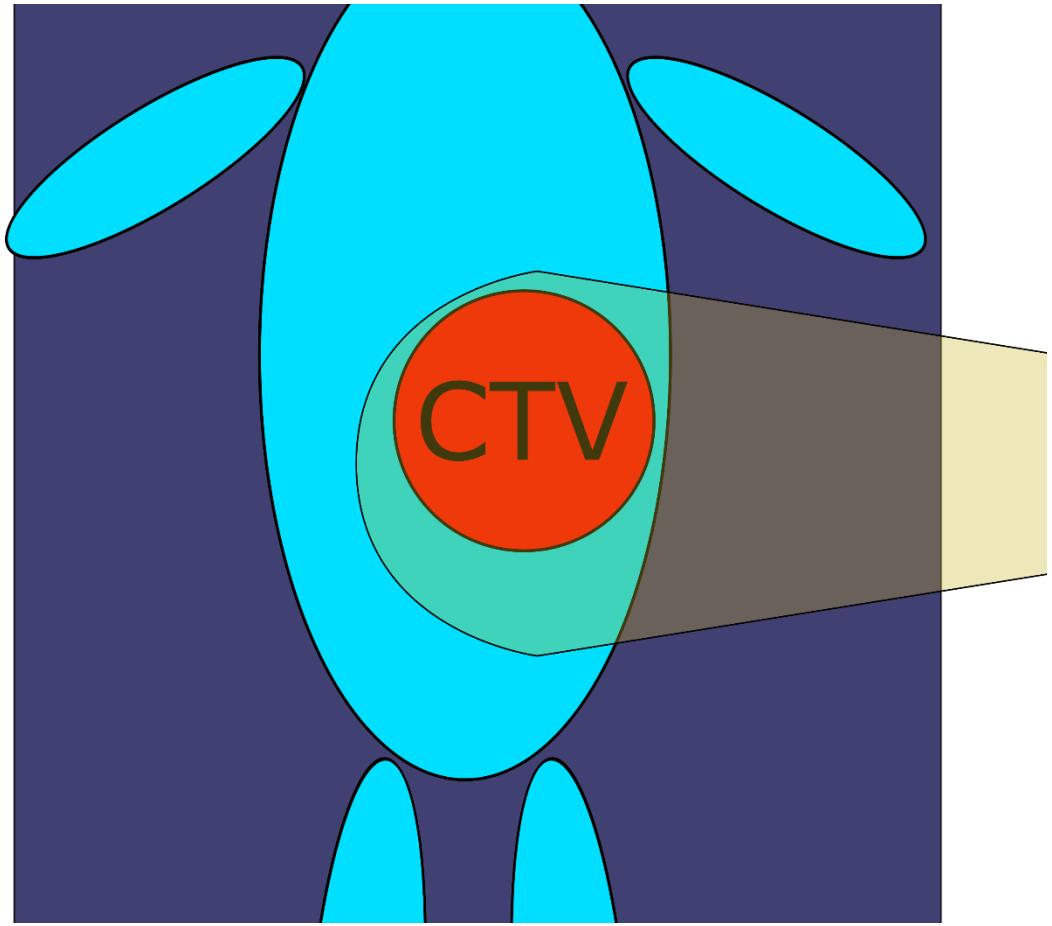
Robustez

Fotones



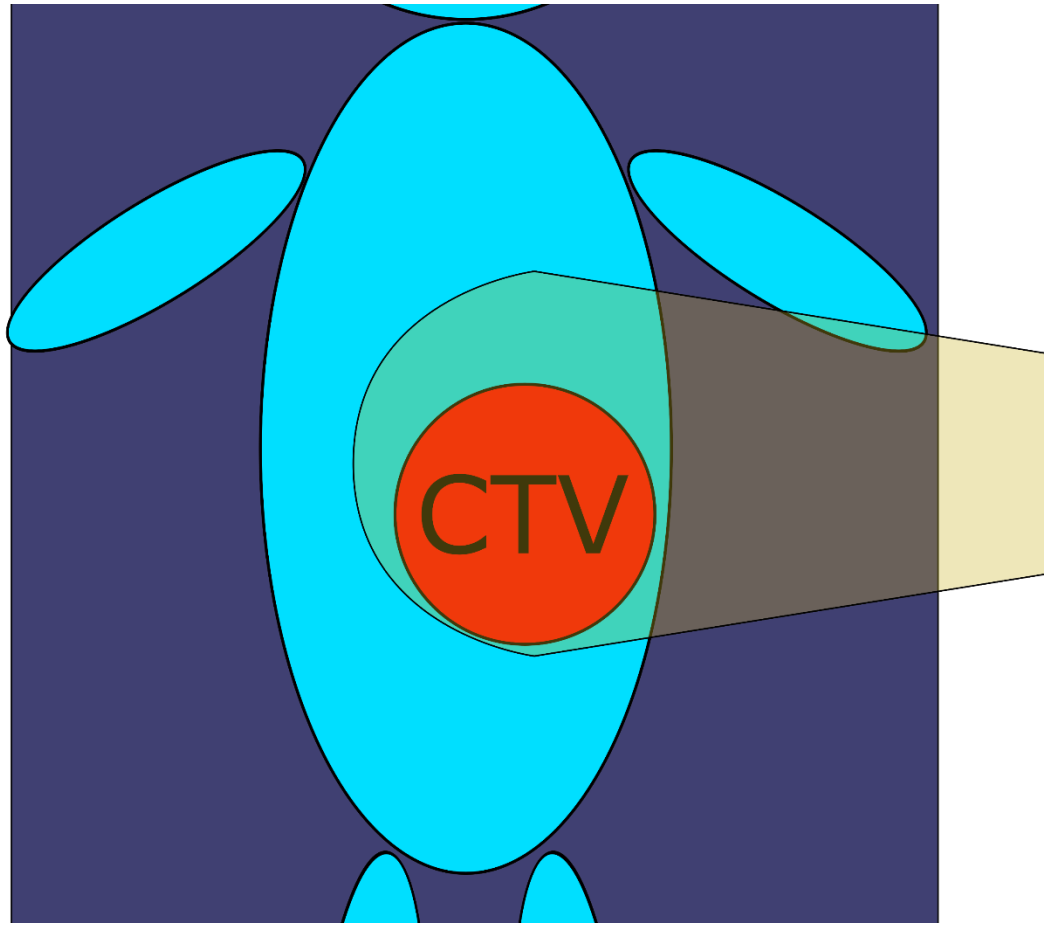
Robustez

Fotones



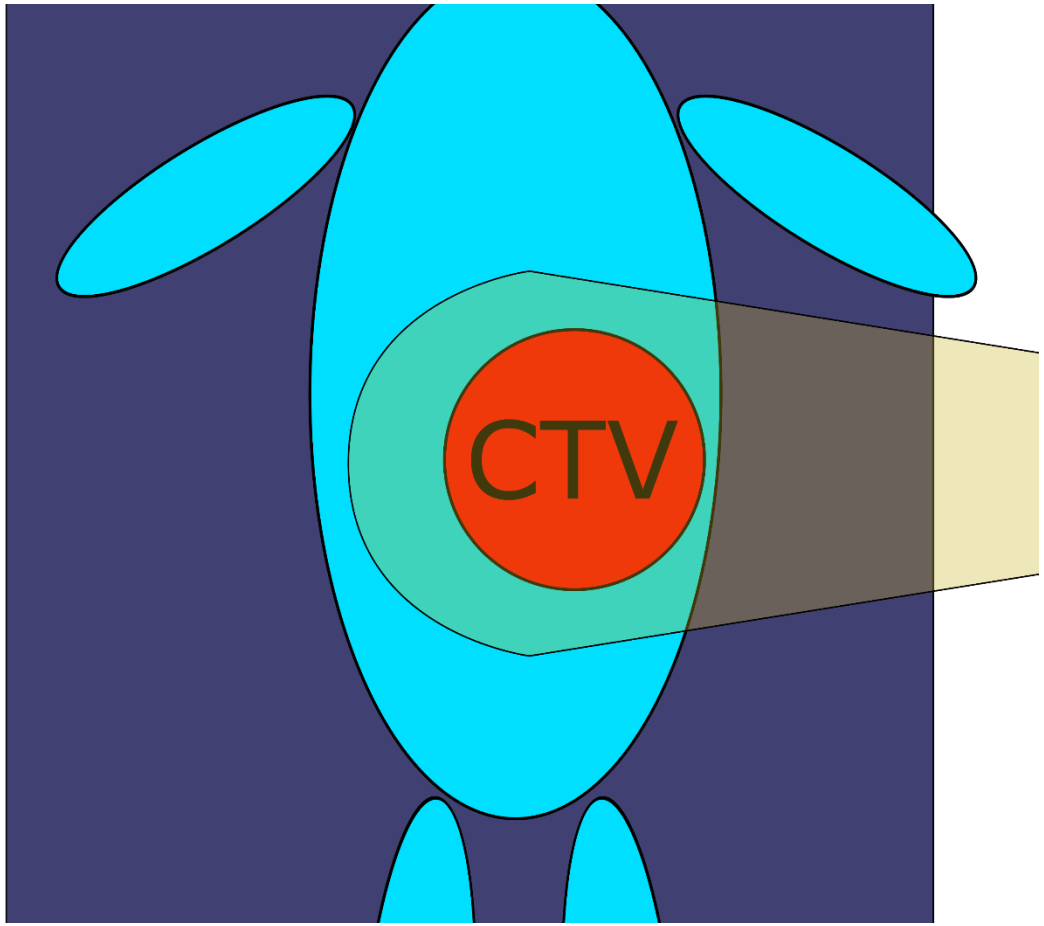
Robustez

Fotones



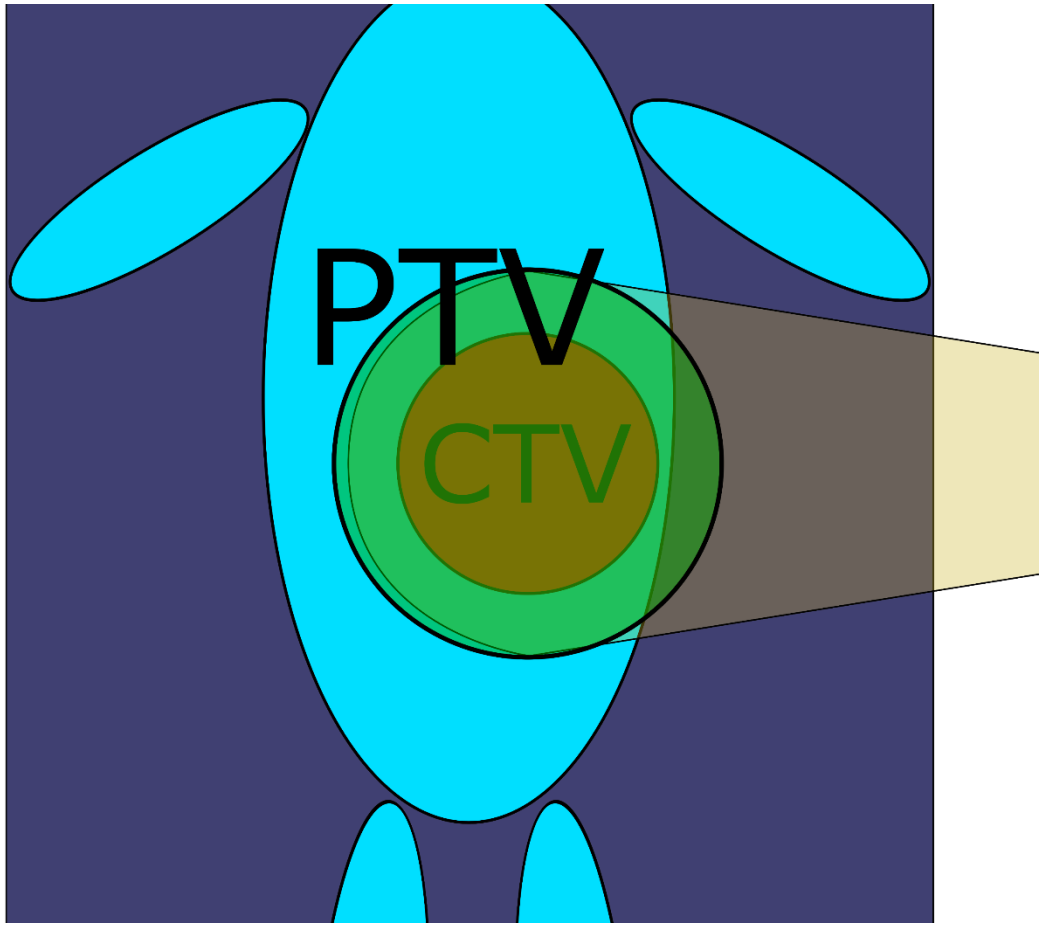
Robustez

Fotones



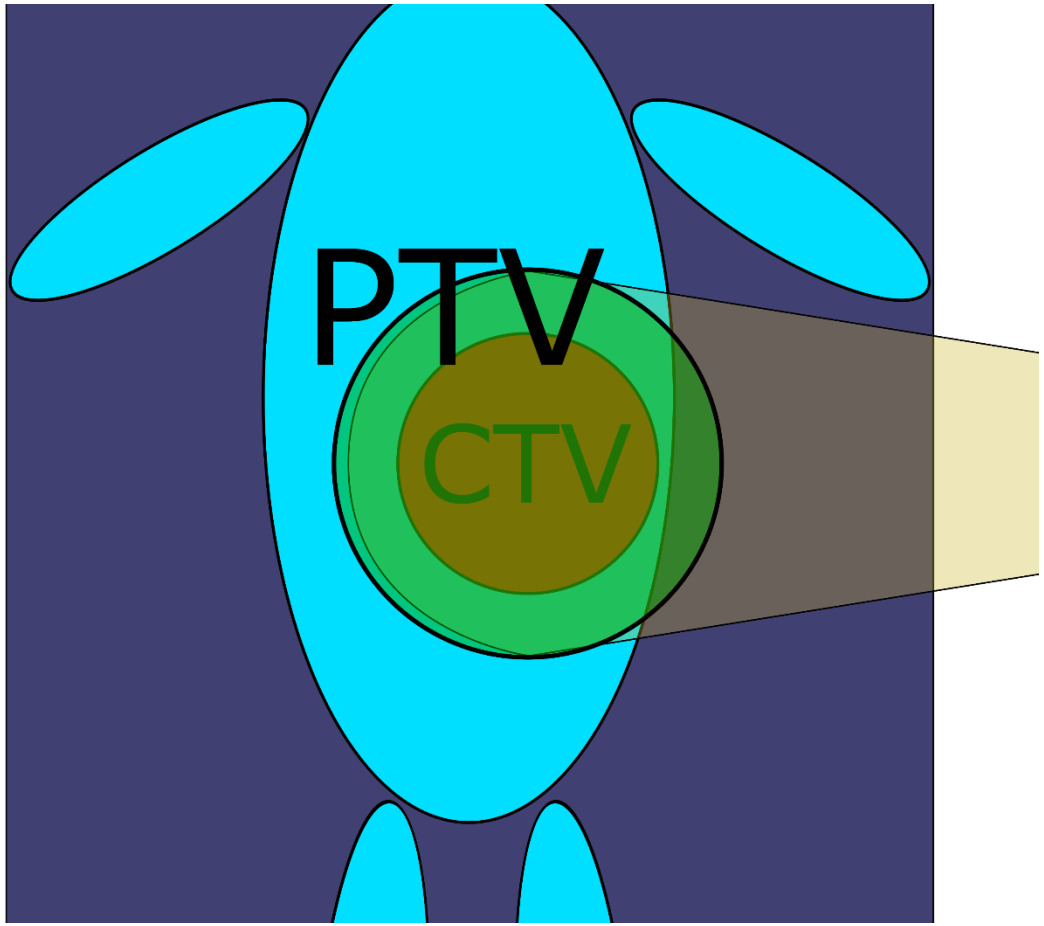
Robustez

Fotones



Robustez

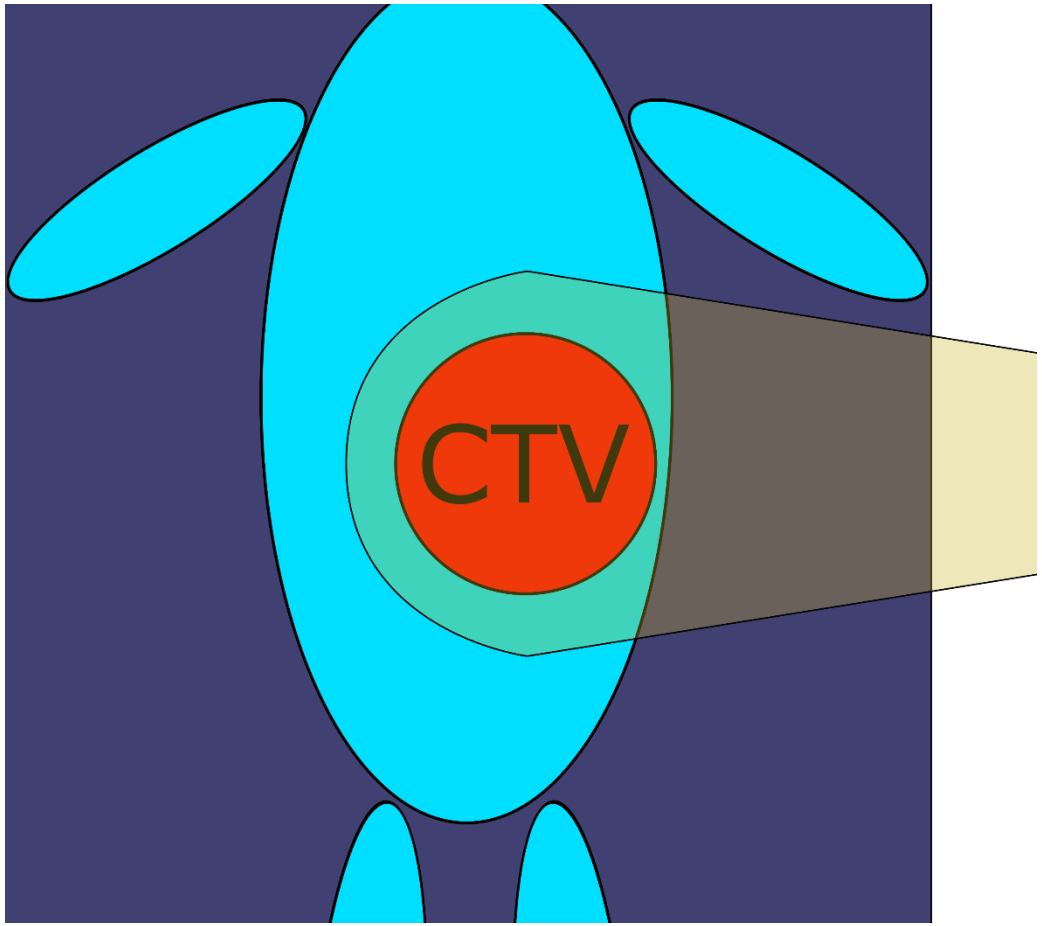
Fotones



Fotones:
Aproximación
de *nube estática*

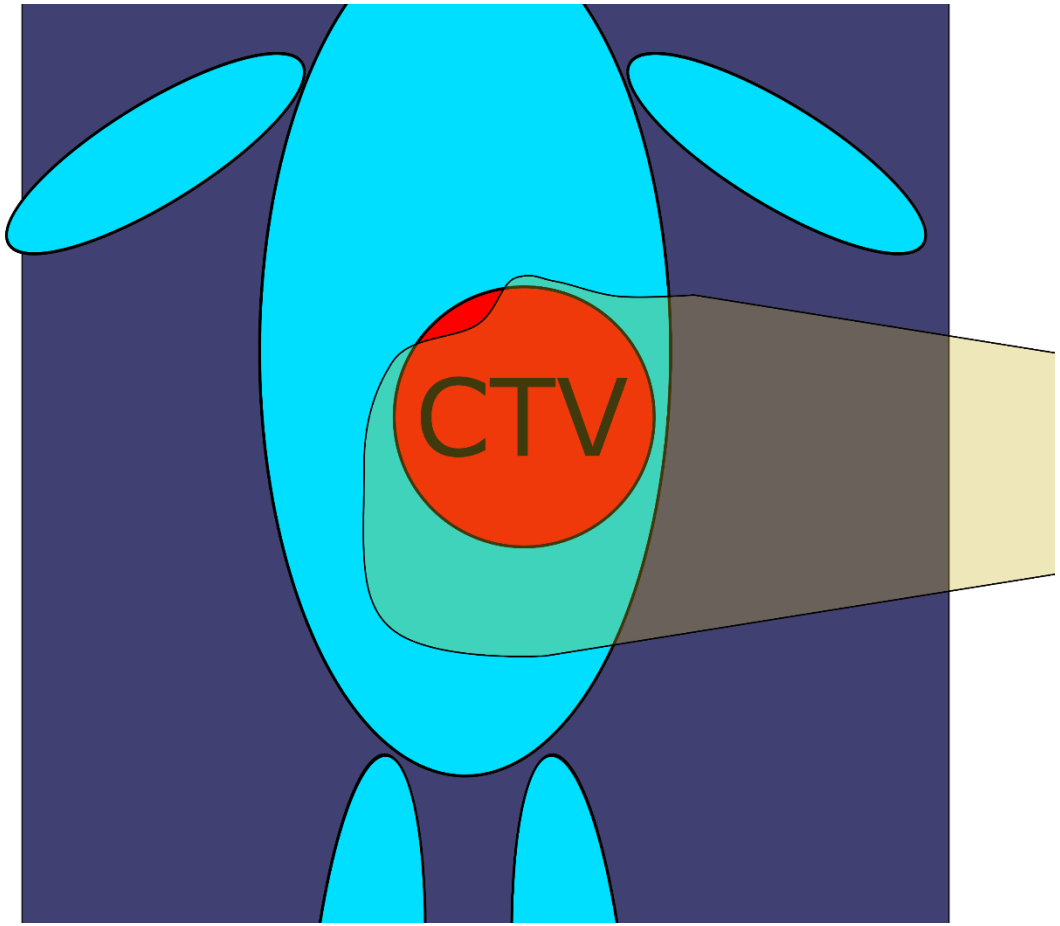
Robustez

Protones



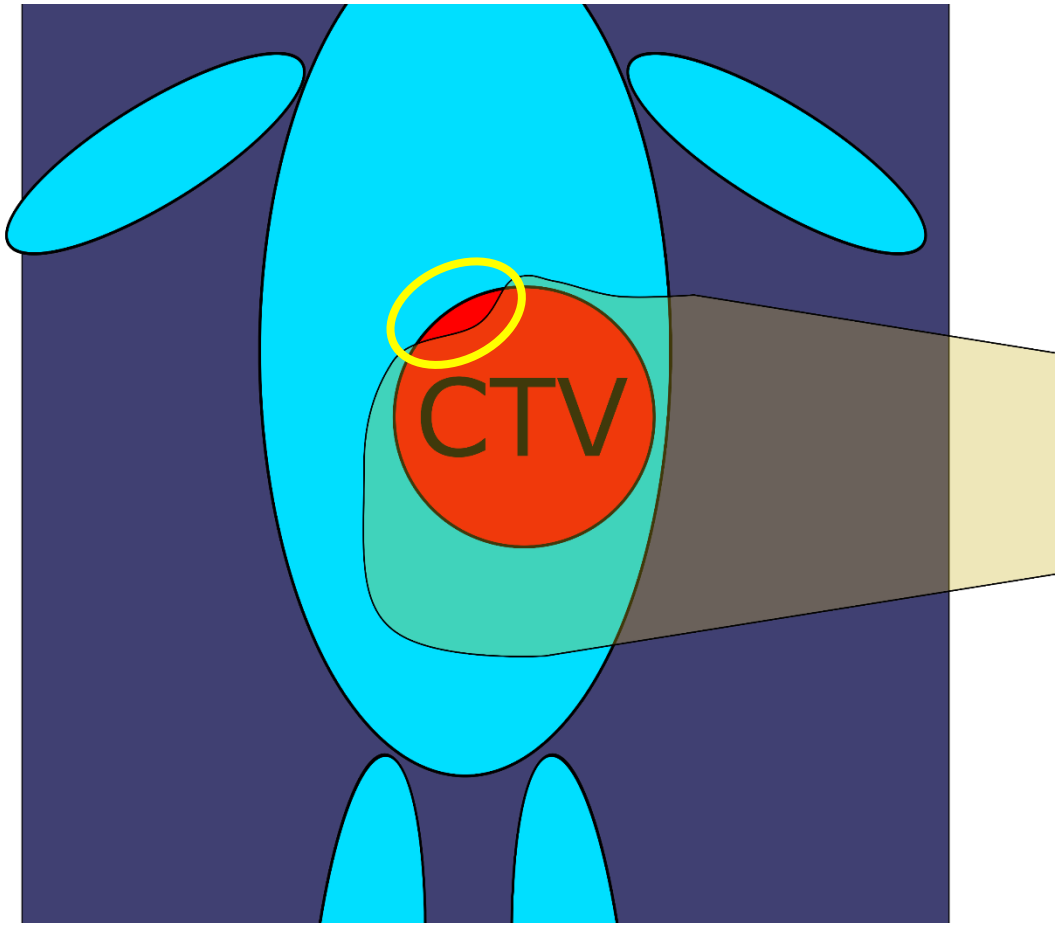
Robustez

Protones



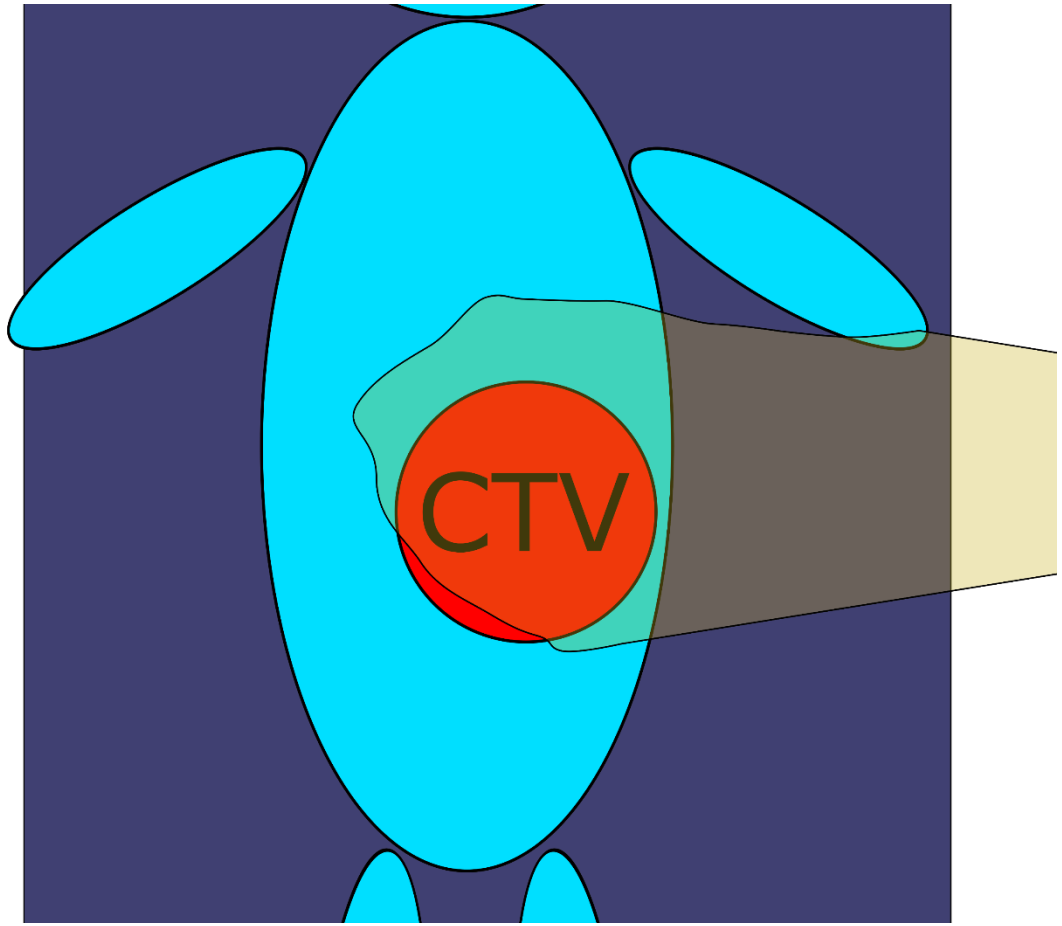
Robustez

Protones



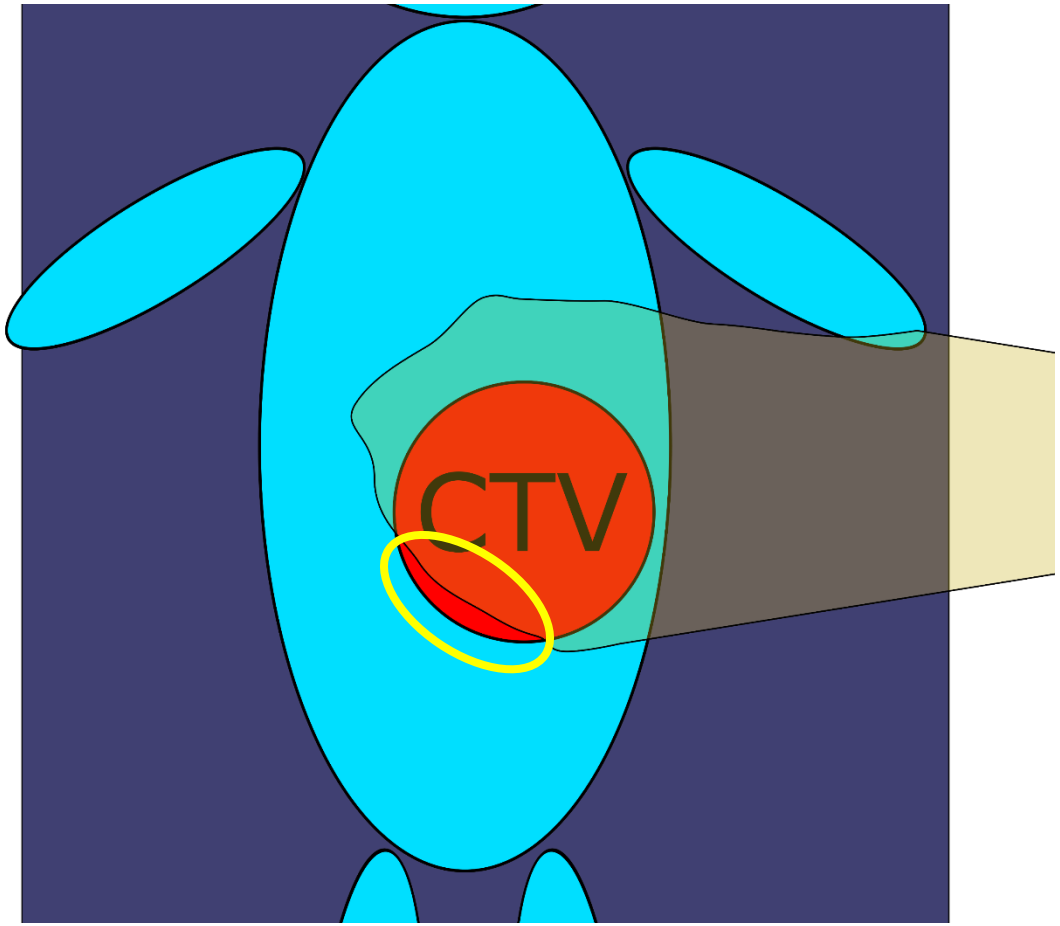
Robustez

Protones



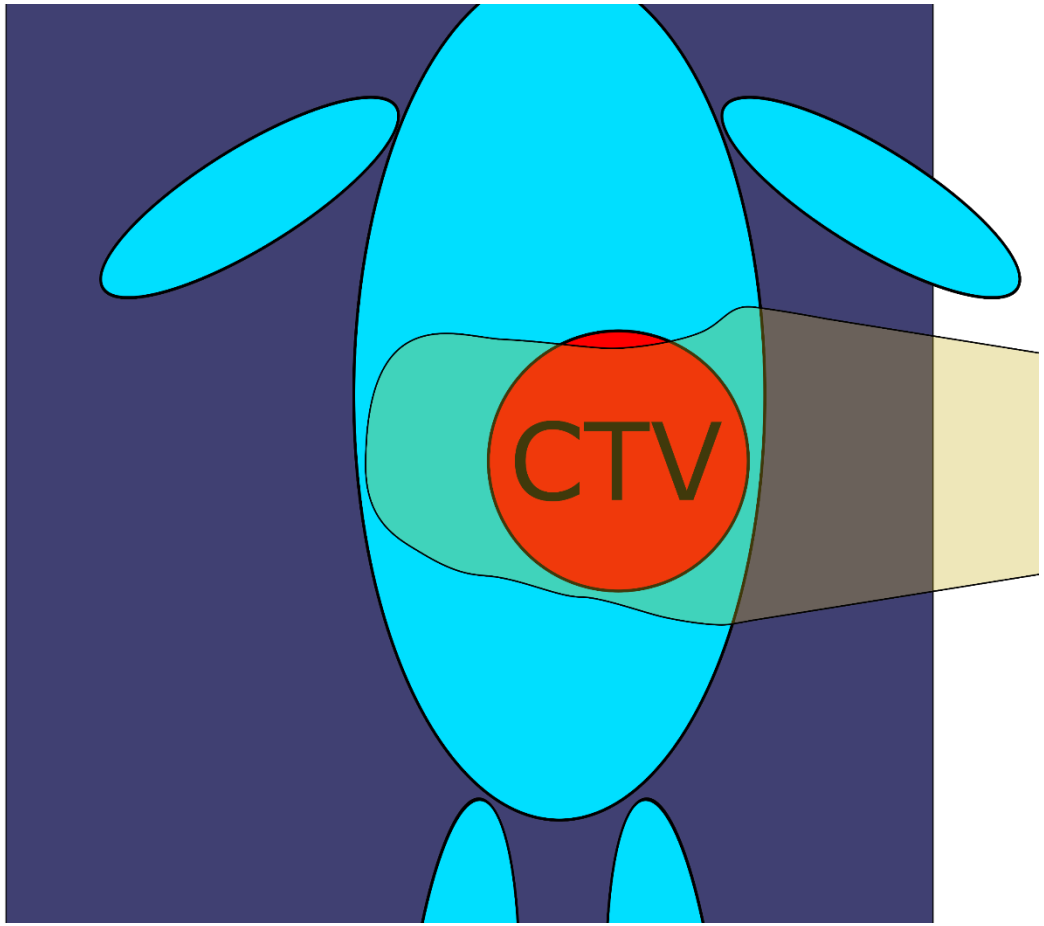
Robustez

Protones



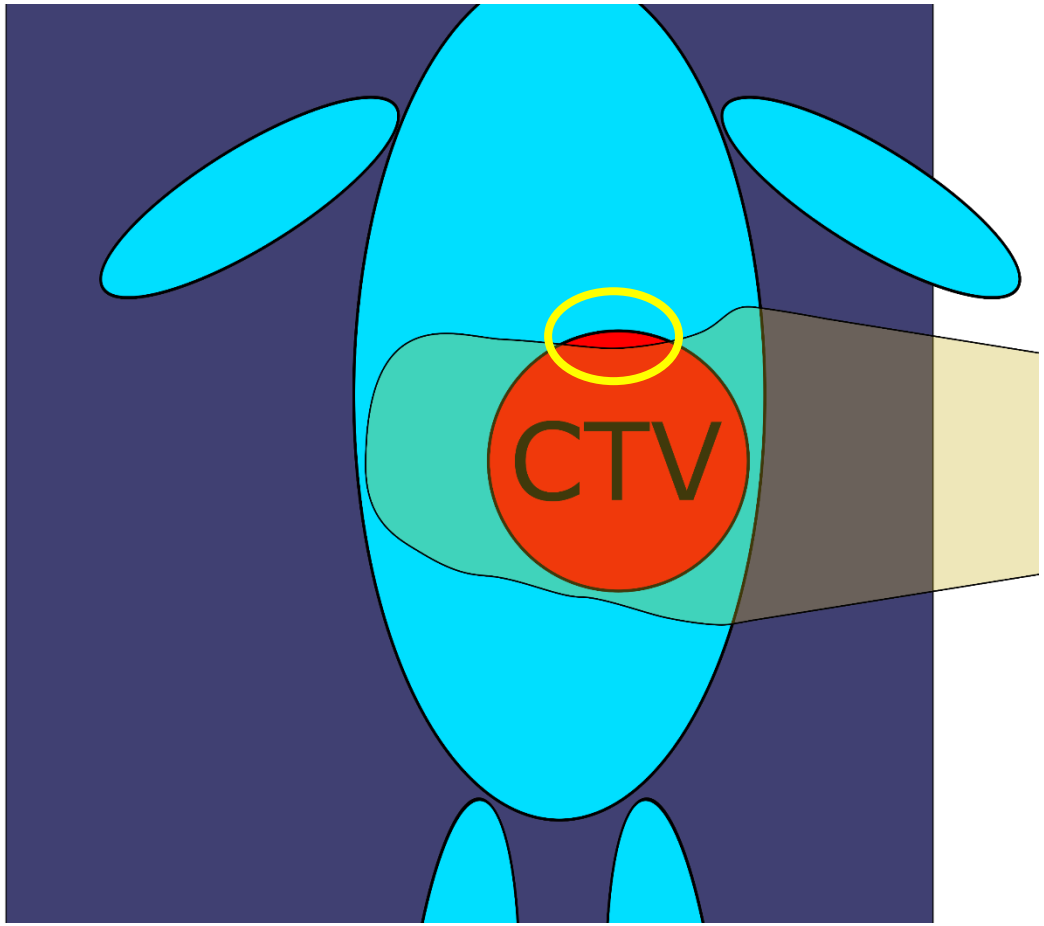
Robustez

Protones



Robustez

Protones



Cambios en el posicionamiento del paciente pueden causar variaciones en la “forma” de dosis

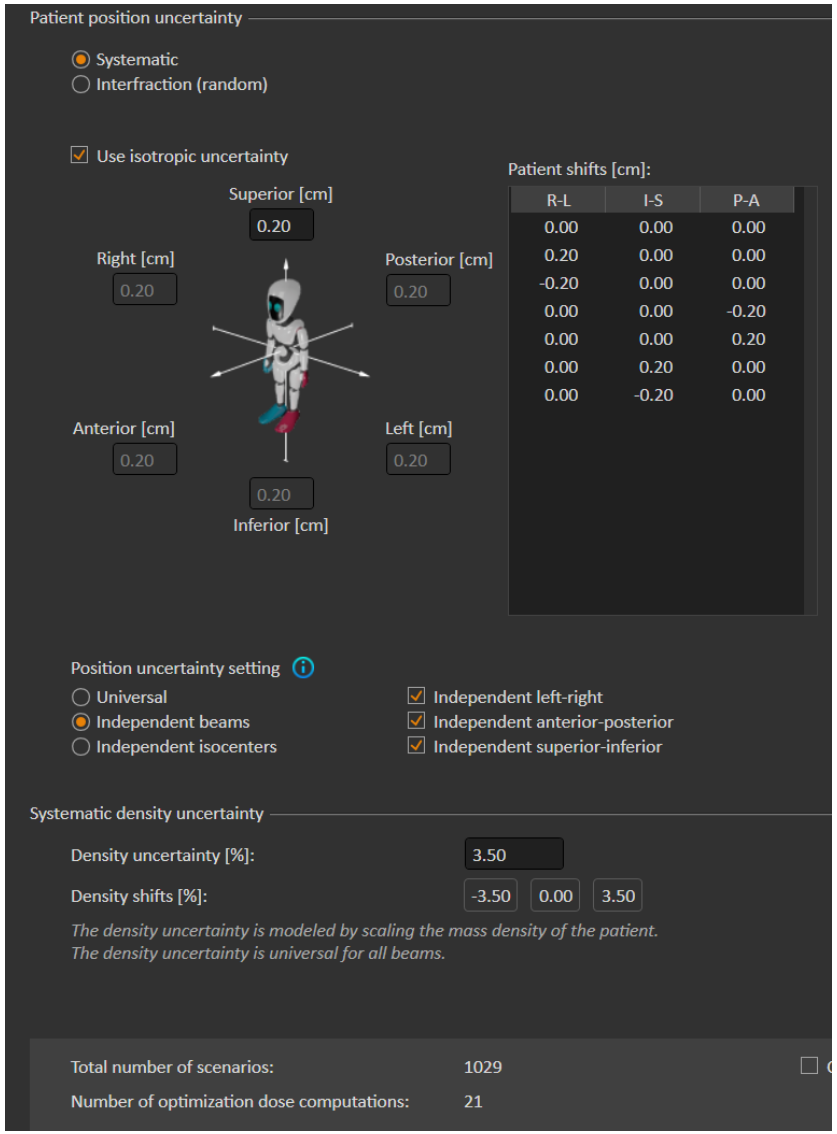
Robustez

Protones



Cambios en el posicionamiento del paciente causan deformaciones de la distribución de dosis

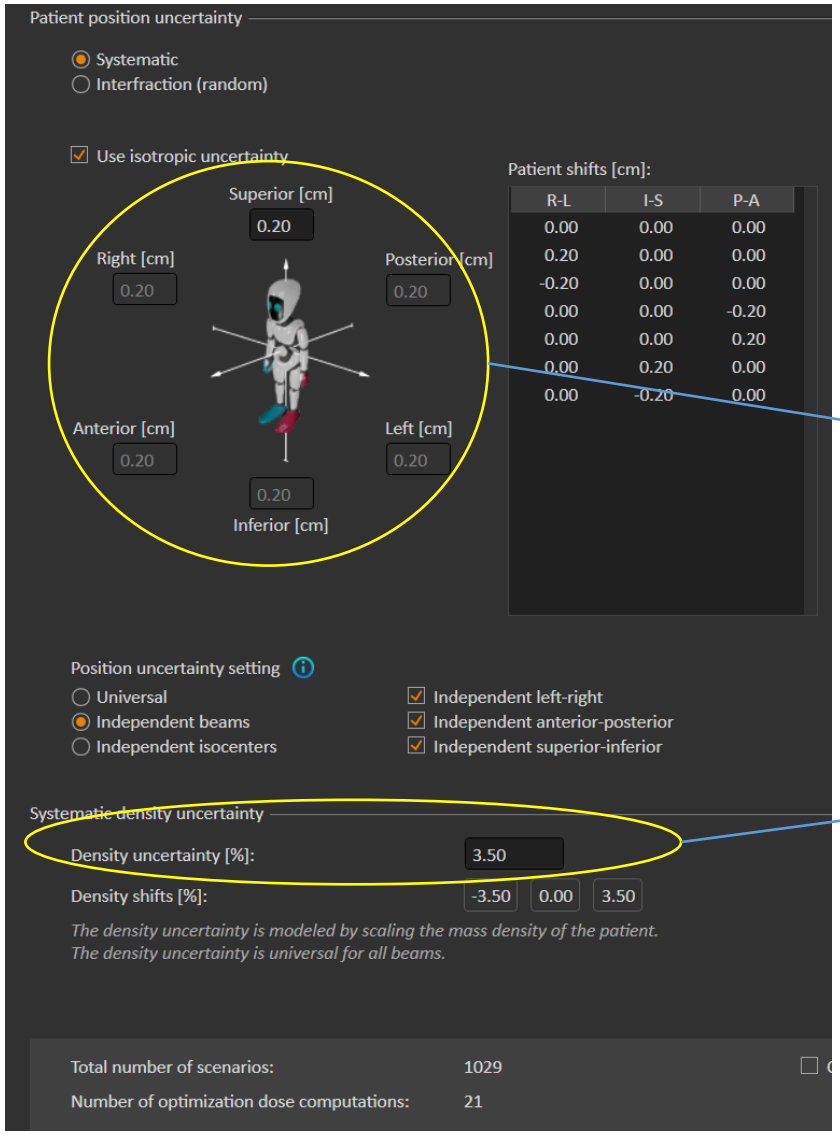
Robustez



Optimización robusta

Consideración explícita de las incertidumbres en el proceso de planificación y optimización

Optimización robusta



21 escenarios a considerar en la optimización (o más)

Optimización robusta

Optimización de una función de coste

$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$



Optimización robusta

Optimización de una función de coste

$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9
Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12
Escenario 13	Escenario 14	Escenario 15
Escenario 16	Escenario 17	Escenario 18
Escenario 19	Escenario 20	Escenario 21



Optimización robusta

Optimización robusta tipo MIN-MAX

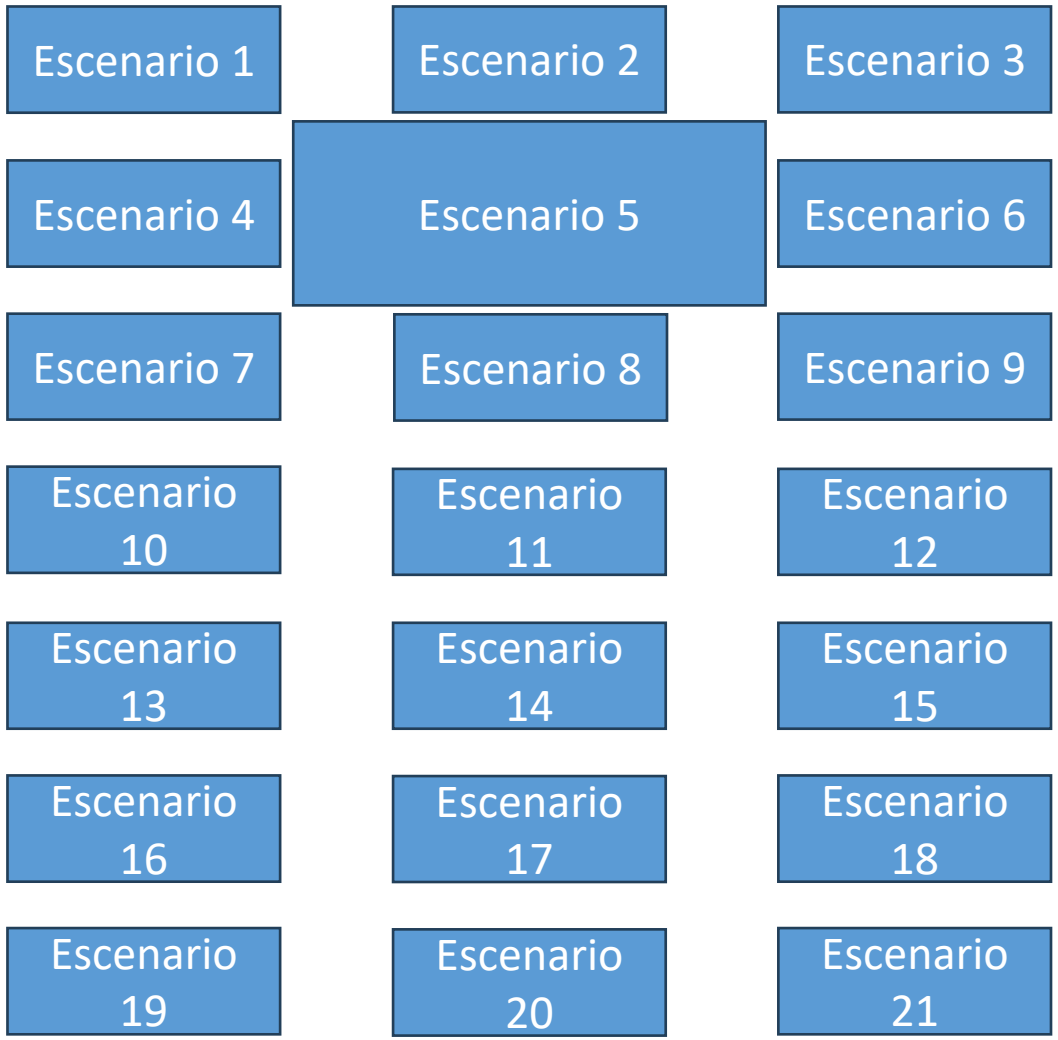
$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9
Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12
Escenario 13	Escenario 14	Escenario 15
Escenario 16	Escenario 17	Escenario 18
Escenario 19	Escenario 20	Escenario 21

Optimización robusta

Optimización robusta tipo MIN-MAX

$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$



Optimización robusta

Optimización robusta tipo MIN-MAX

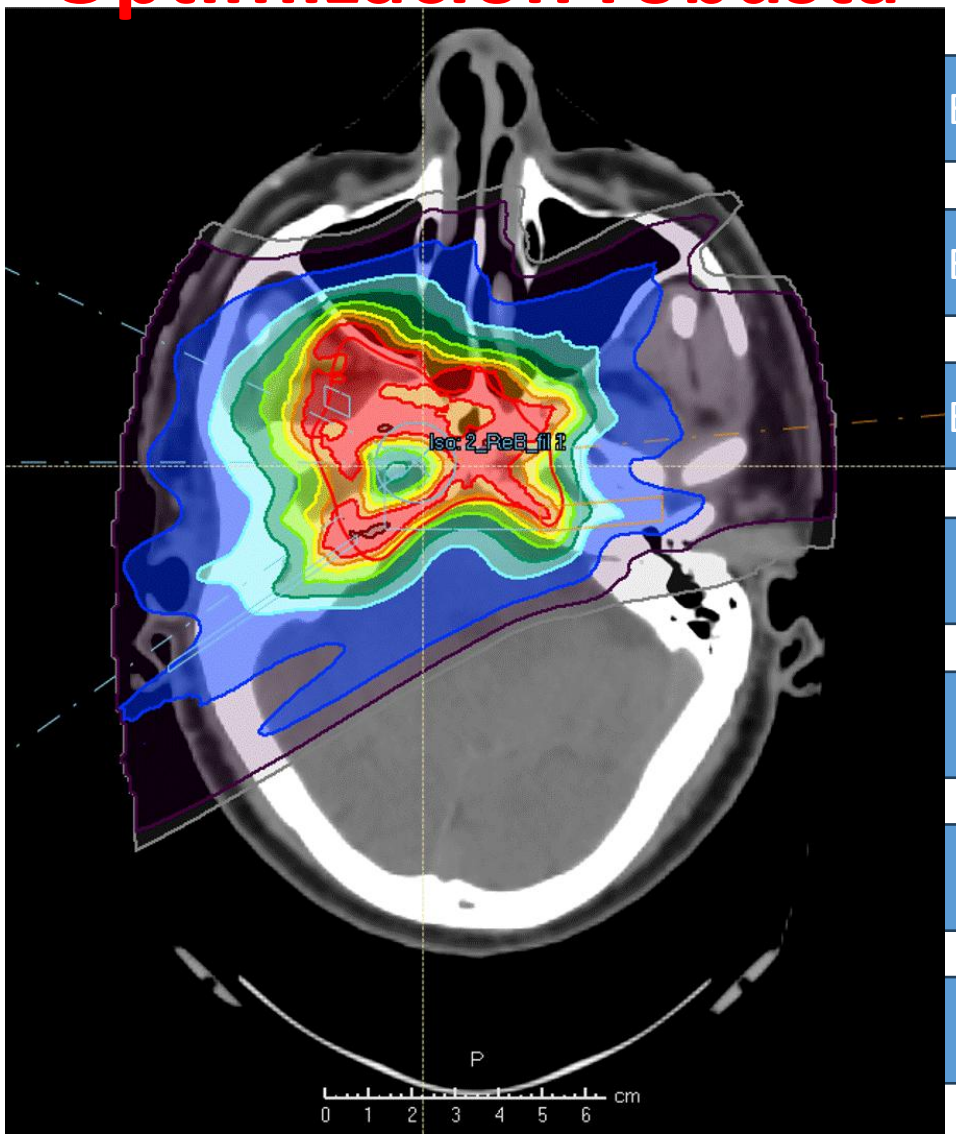
$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9
Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12
Escenario 13	Escenario 14	Escenario 15
Escenario 16	Escenario 17	Escenario 18
Escenario 19	Escenario 20	Escenario 21

Optimización robusta

Optimización robusta tipo MIN-MAX

$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j \right)^2}{V_i}$$



Escenario 3

Escenario 6

Escenario 9

Escenario 12

Escenario 15

Escenario 18

Escenario 21

Optimización robusta

Optimización robusta tipo MIN-MAX

$$F = \sum_i \frac{\nu_j \left(D_Q^j - D_C^j\right)^2}{V_i}$$



Escenario 3

Escenario 6

Escenario 9

Escenario 12

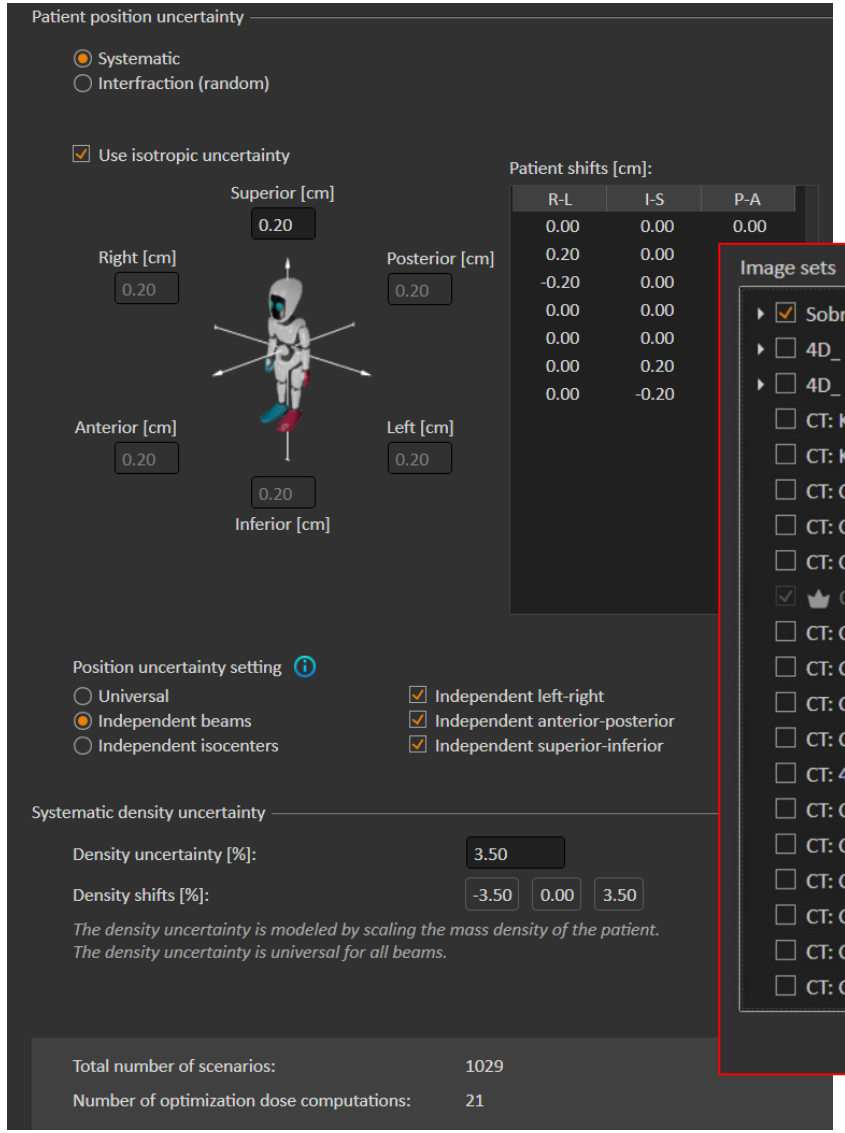
Escenario 15

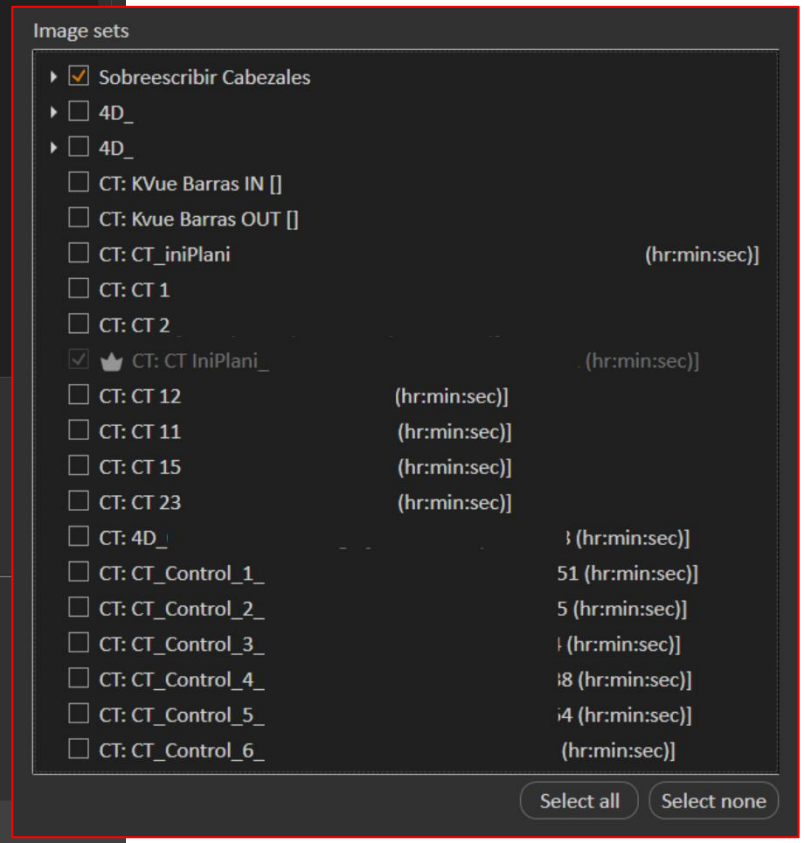
Escenario 18

Escenario 21

Optimización robusta

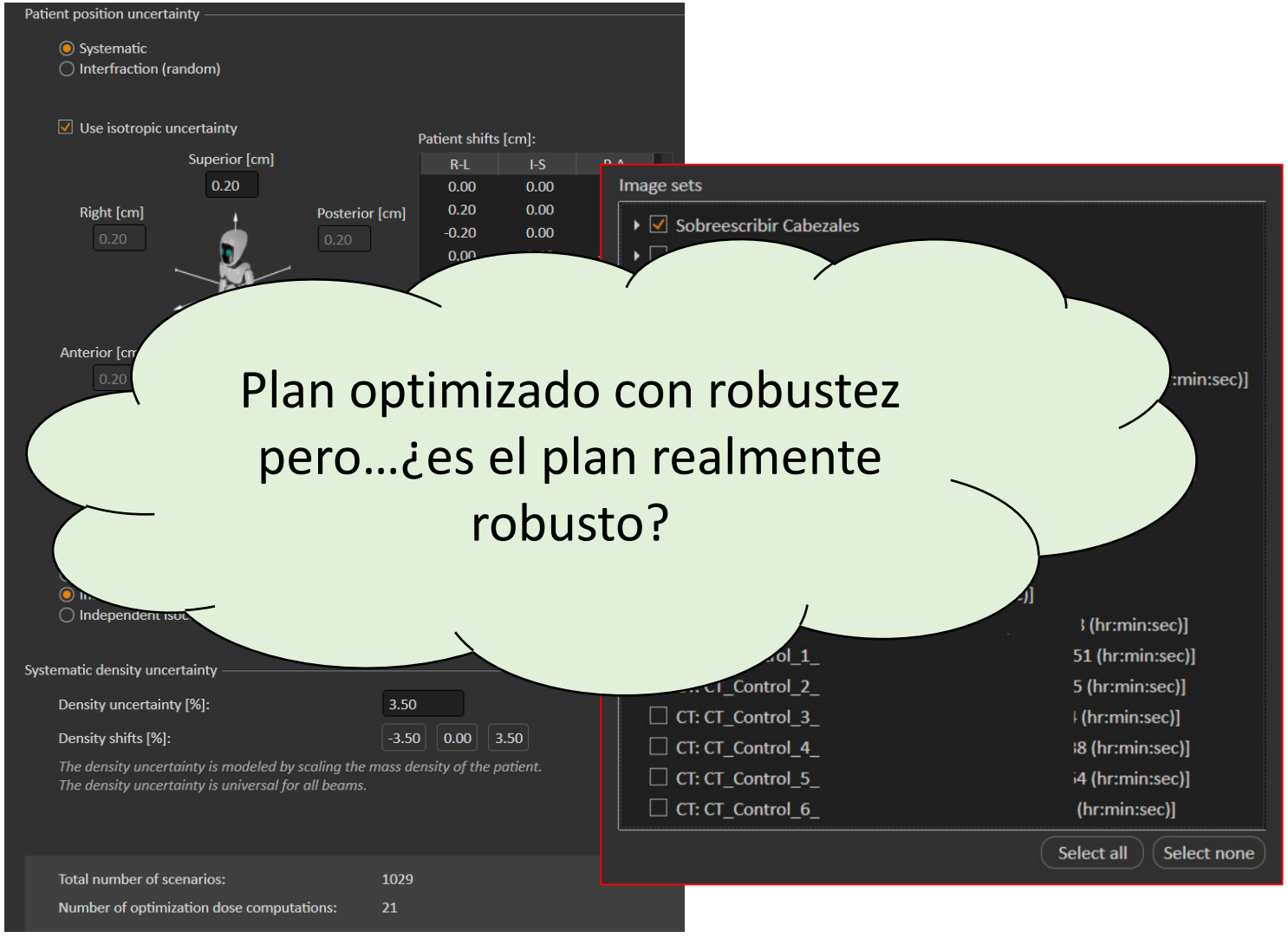
Flexibilidad: considerar fuentes de incertidumbres adicionales (movimiento, cambios de densidad, variaciones anatómicas, etc)





Optimización con varios CT

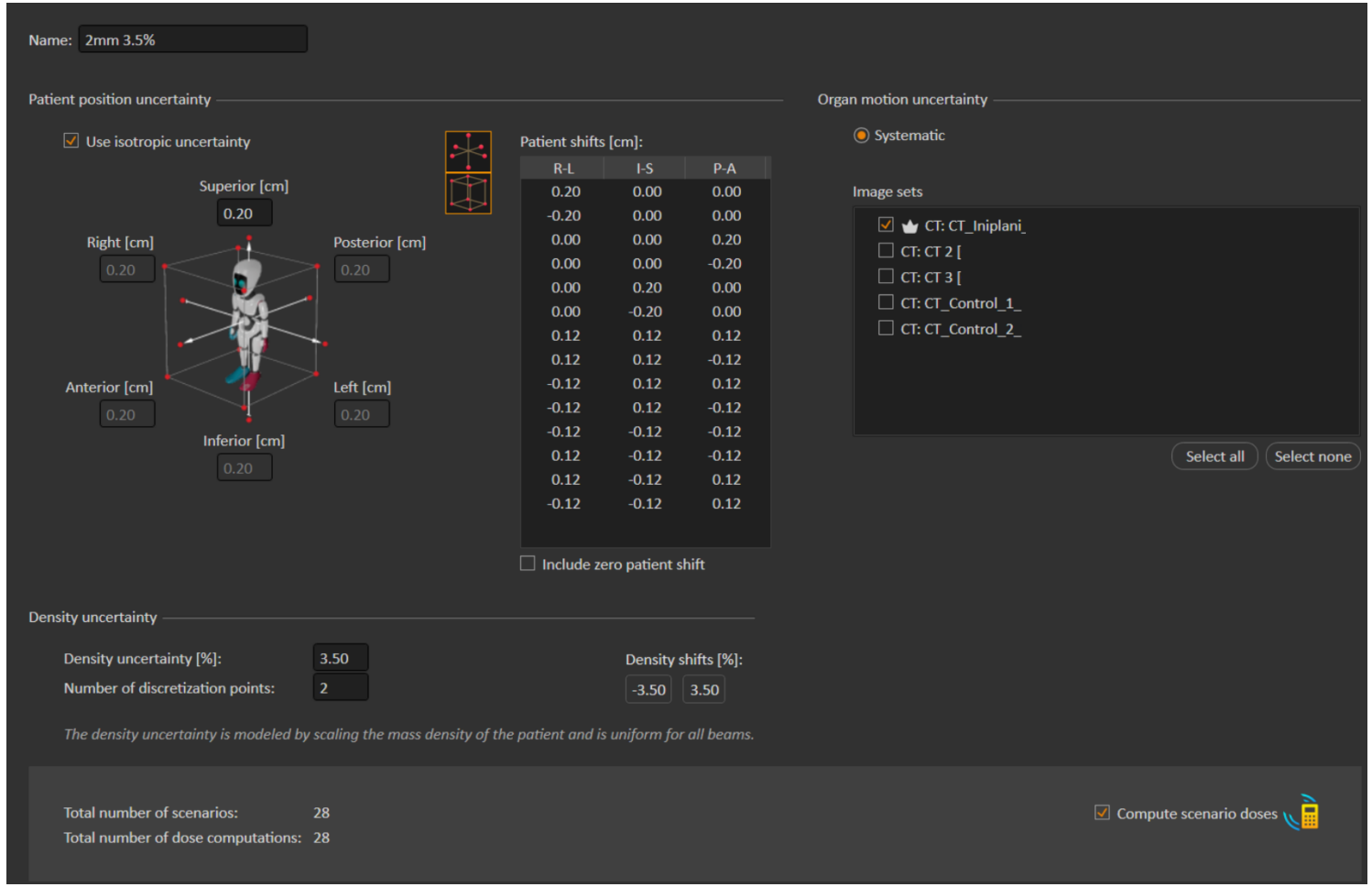
Evaluación robusta



Plan optimizado con robustez pero…¿es el plan realmente robusto?

Evaluación robusta

Cálculo de la distribución de dosis en una muestra de escenarios

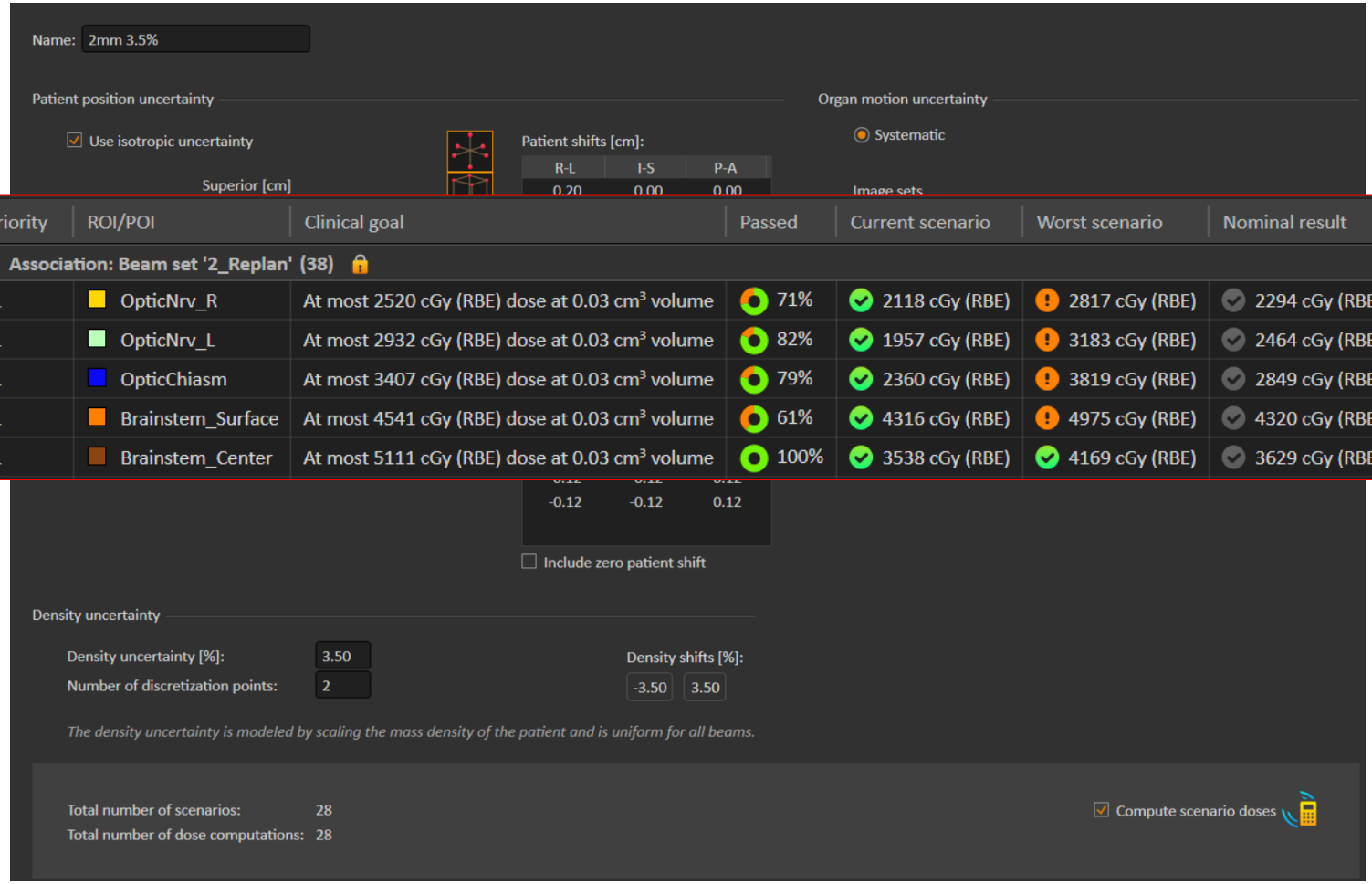


Evaluación robusta

Cálculo de la distribución de dosis en una muestra de escenarios

+

Análisis “estadístico” de los resultados



Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set '2_Replan' (38)						
1	OpticNrv_R	At most 2520 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	71%	2118 cGy (RBE)	2817 cGy (RBE)	2294 cGy (RBE)
1	OpticNrv_L	At most 2932 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	82%	1957 cGy (RBE)	3183 cGy (RBE)	2464 cGy (RBE)
1	OpticChiasm	At most 3407 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	79%	2360 cGy (RBE)	3819 cGy (RBE)	2849 cGy (RBE)
1	Brainstem_Surface	At most 4541 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	61%	4316 cGy (RBE)	4975 cGy (RBE)	4320 cGy (RBE)
1	Brainstem_Center	At most 5111 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	100%	3538 cGy (RBE)	4169 cGy (RBE)	3629 cGy (RBE)

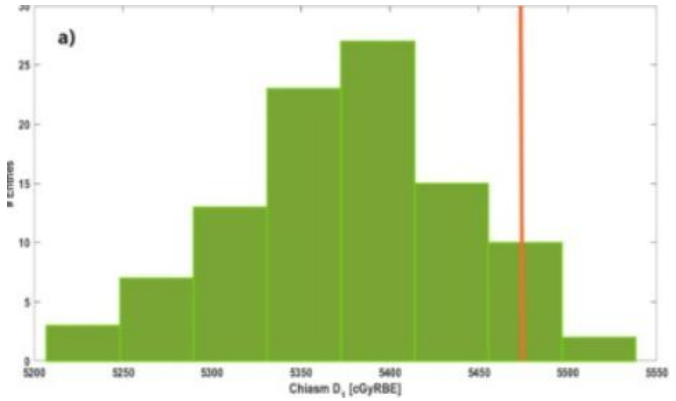
Evaluación robusta

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set '2_Replan' (38)						
1	OpticNrv_R	At most 2520 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	71%	2118 cGy (RBE		
1	OpticNrv_L	At most 2932 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	82%	1957 cGy (RBE		
1	OpticChiasm	At most 3407 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	79%	2360 cGy (RBE		
1	Brainstem_Surface	At most 4541 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	61%	4316 cGy (RBE)	4975 cGy (RBE)	4320 cGy (RBE)
1	Brainstem_Center	At most 5111 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	100%	3538 cGy (RBE)	4169 cGy (RBE)	3629 cGy (RBE)

Distribución derivada a partir de cálculos marginales en la zona superior de incertidumbre

Development and clinical application of a probabilistic robustness evaluation tool for pencil beam scanning proton therapy treatments

Francesco Fracchiolla [a], Lamberto Widesott [a], Roberto Righetto [a], Carlo Algranati [a], Dante Amelio [b], Annalisa Trianni [a], Edmond Sterpin [c d e], Stefano Lorentini [a] Show more



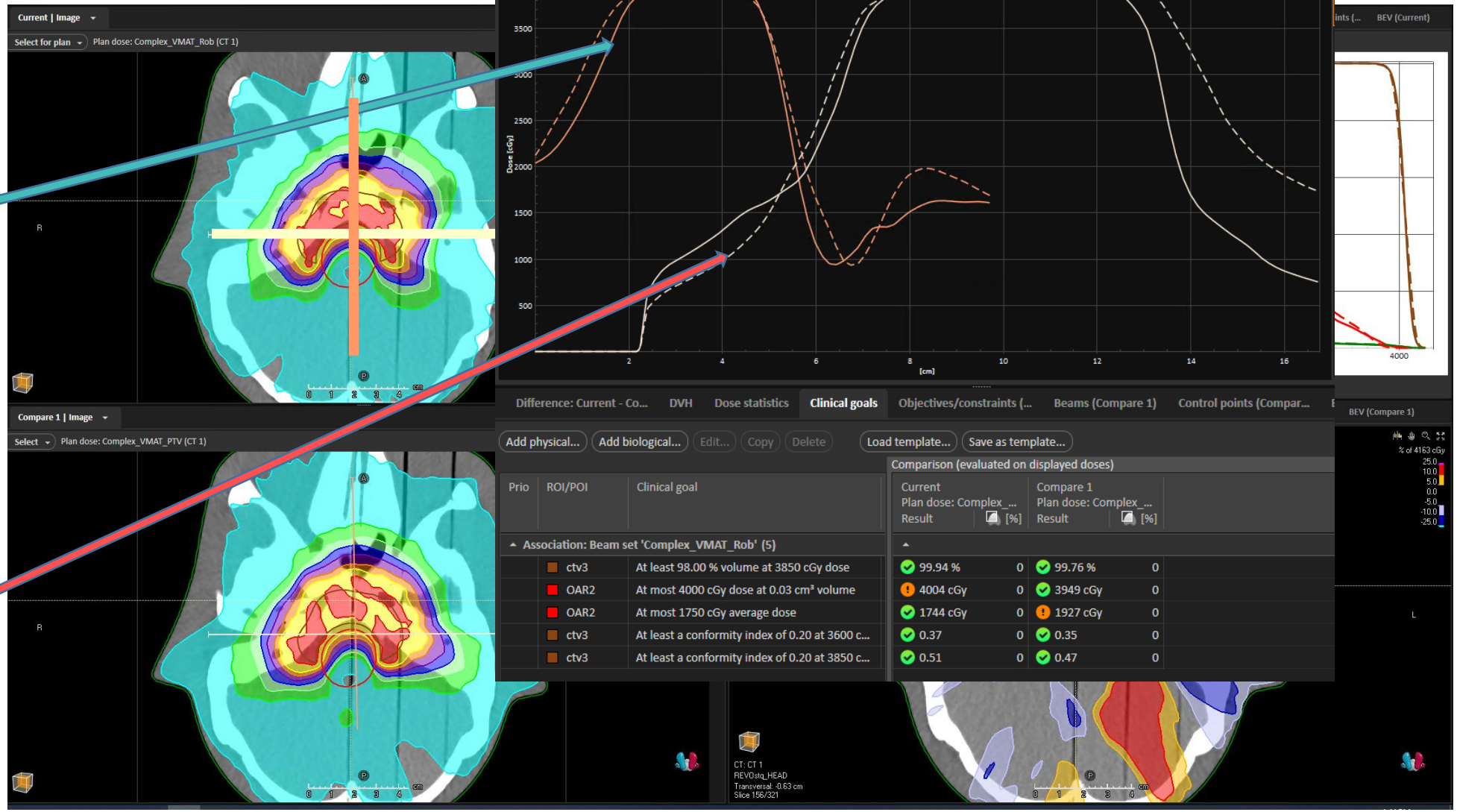
6. Conclusion

Our results showed that there must be extreme caution in choosing the values for the set-up errors to be used in the robustness analysis with a worst-case approach. Numbers that may even seem reasonable, such as 2–3 mm for brain patients, can lead to unrealistic OAR and target dosimetric indexes. Since these robustness analysis tools have been part of the clinical workflow for some years now, it is crucial that they should be carefully validated given their potential impact on clinical choices.

Ejemplo

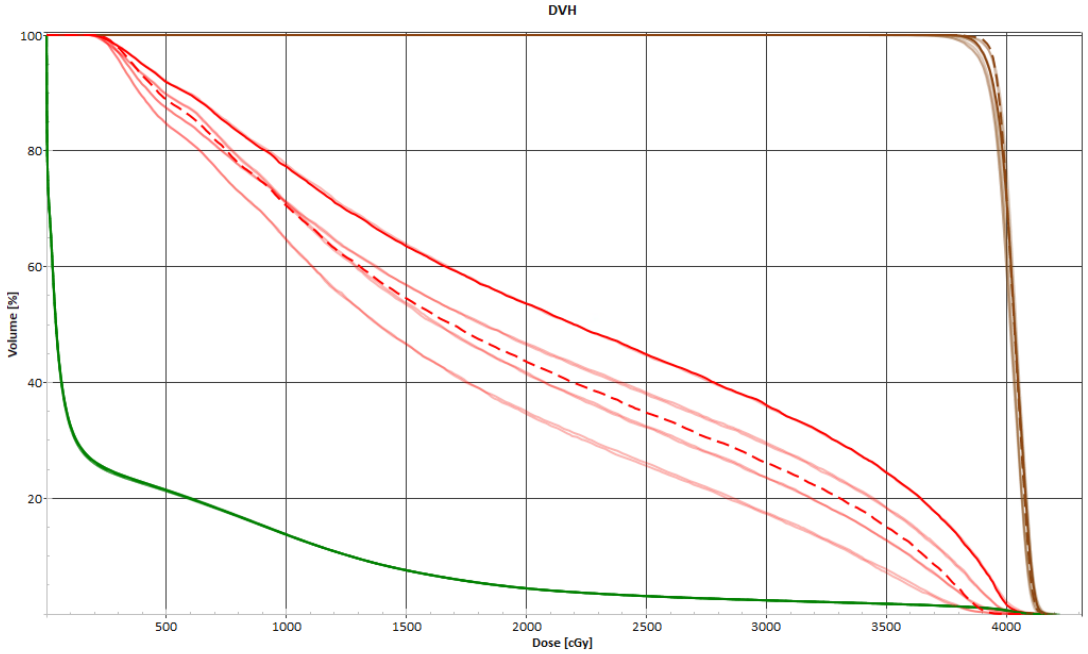
Robusto a CTV

PTV tradicional



Ejemplo fotones

PTV tradicional



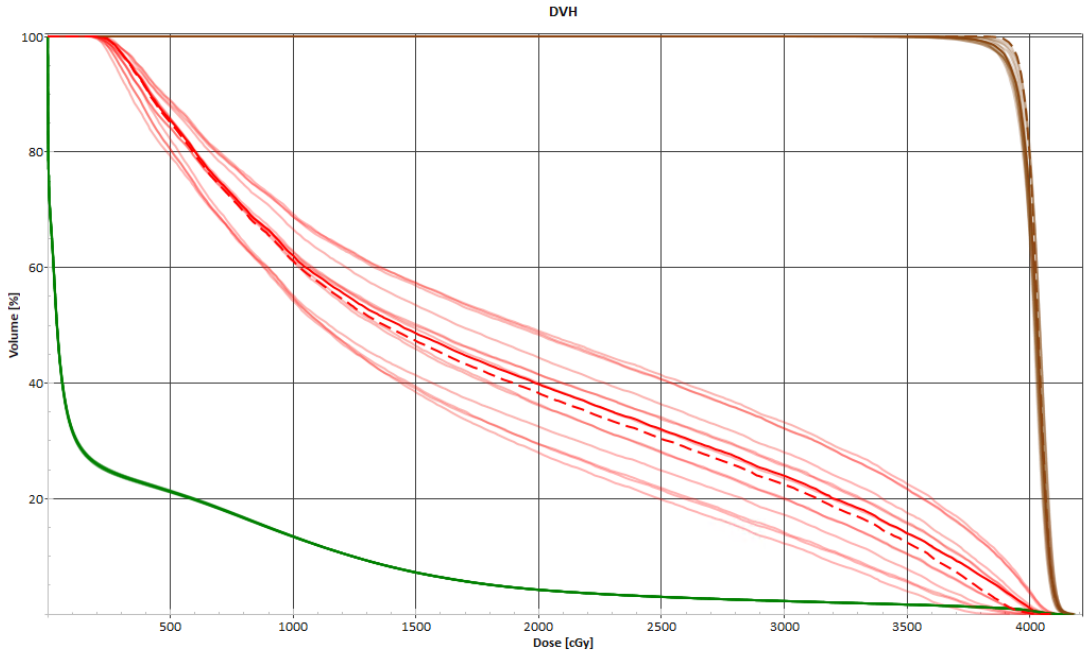
ose axis: Absolute cGy Volume axis: Relative max

Clinical goals

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result	Max % outside grid
Association: Beam set 'Complex_VMAT_PTV' (3)							
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy dose	75%	99.33 %	97.62 %	99.76 %	0 %
	OAR2	At most 4000 cGy dose at 0.03 cm³ volume	25%	4098 cGy	4113 cGy	3949 cGy	0 %
	OAR2	At most 1750 cGy average dose	25%	2232 cGy	2236 cGy	1927 cGy	0 %

Robusto a CTV



ose axis: Absolute cGy Volume axis: Relative max

Clinical goals

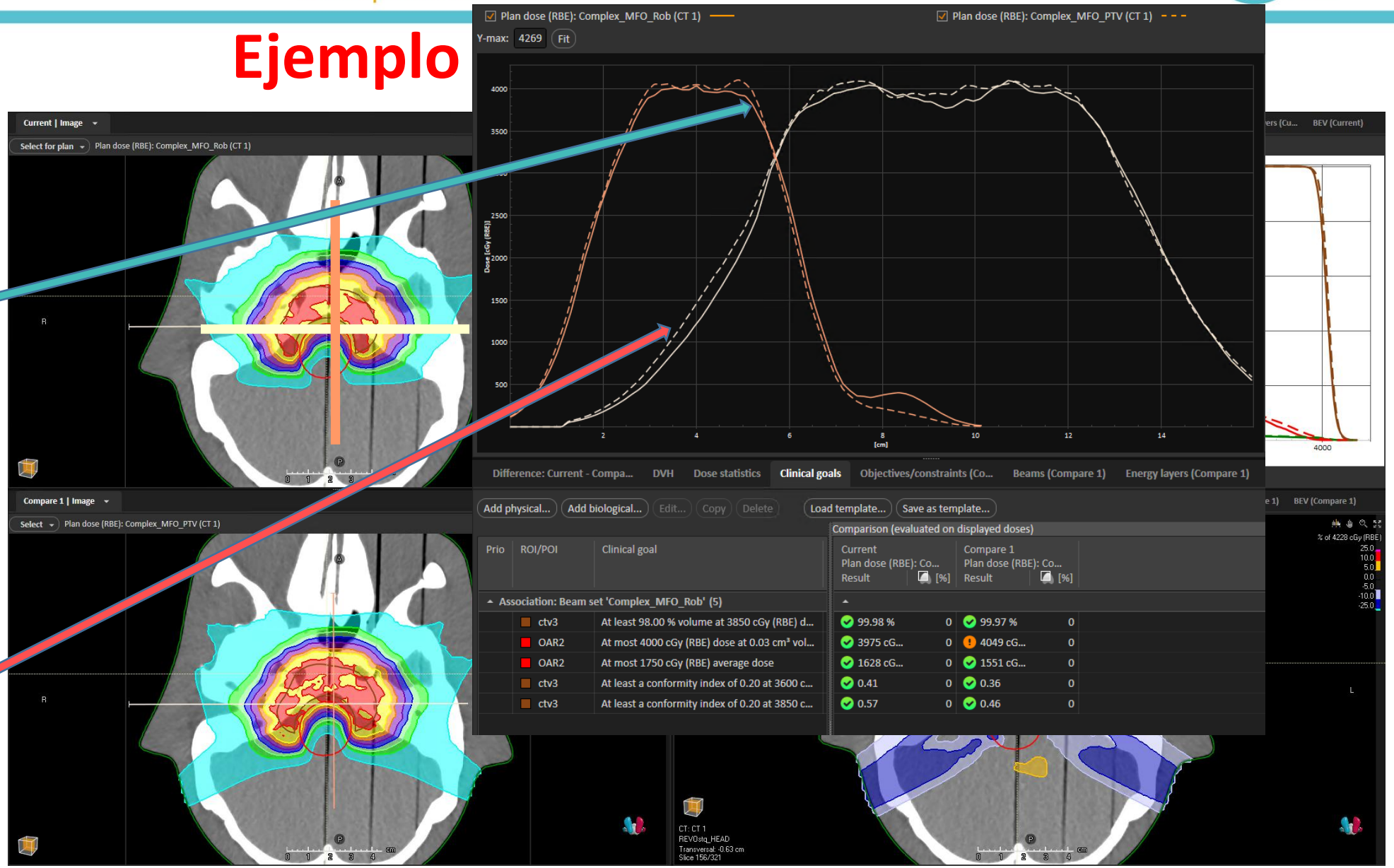
Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result	Max % outside grid
Association: Beam set 'Complex_VMAT_Rob' (3)							
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy dose	71%	98.58 %	97.66 %	99.94 %	0 %
	OAR2	At most 4000 cGy dose at 0.03 cm³ volume	29%	4054 cGy	4099 cGy	4004 cGy	0 %
	OAR2	At most 1750 cGy average dose	43%	1794 cGy	2082 cGy	1744 cGy	0 %

Ejemplo

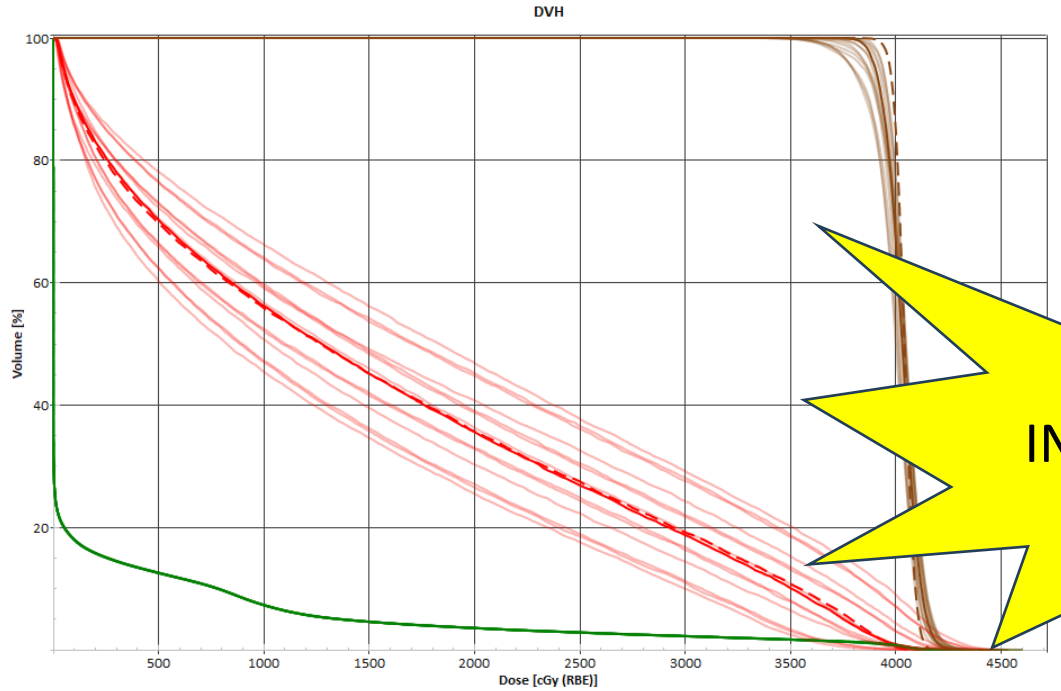
Robusto a CTV

PTV tradicional



Ejemplo protones

PTV tradicional



Dose axis: Absolute cGy (RBE) Volume axis: Relative max

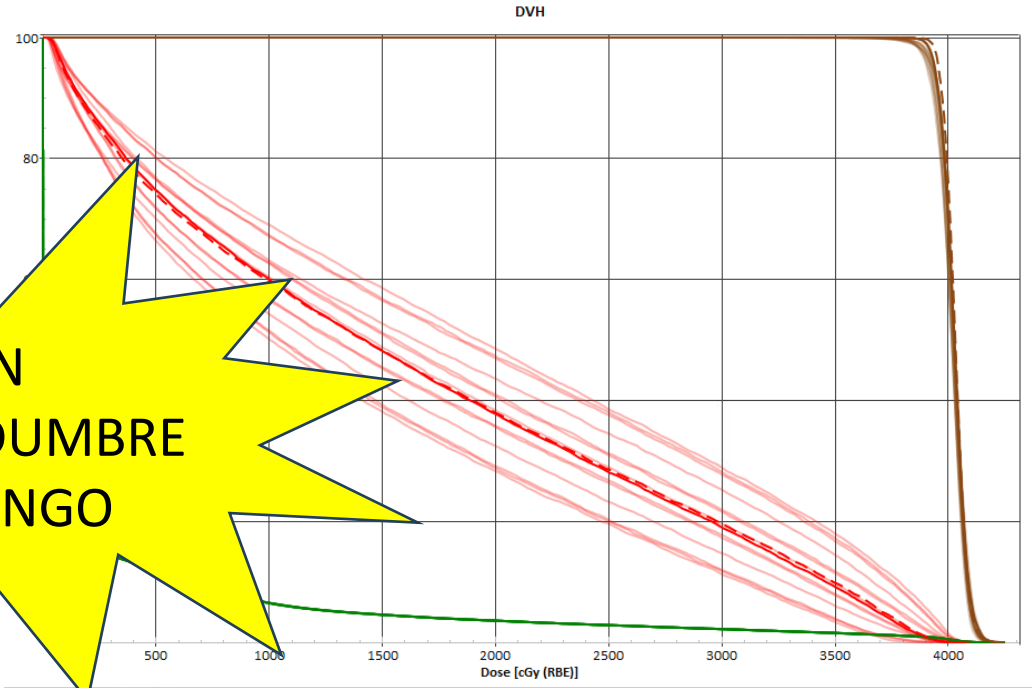
Clinical goals

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_PTV' (3)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	36%	98.89 %	90.64 %	99.97 %
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	79%	1547 cGy (RBE)	1949 cGy (RBE)	1551 cGy (RBE)
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	21%	4166 cGy (RBE)	4476 cGy (RBE)	4049 cGy (RBE)

SIN INCERTIDUMBRE DE RANGO

Robusto a CTV



Dose axis: Absolute cGy (RBE) Volume axis: Relative max

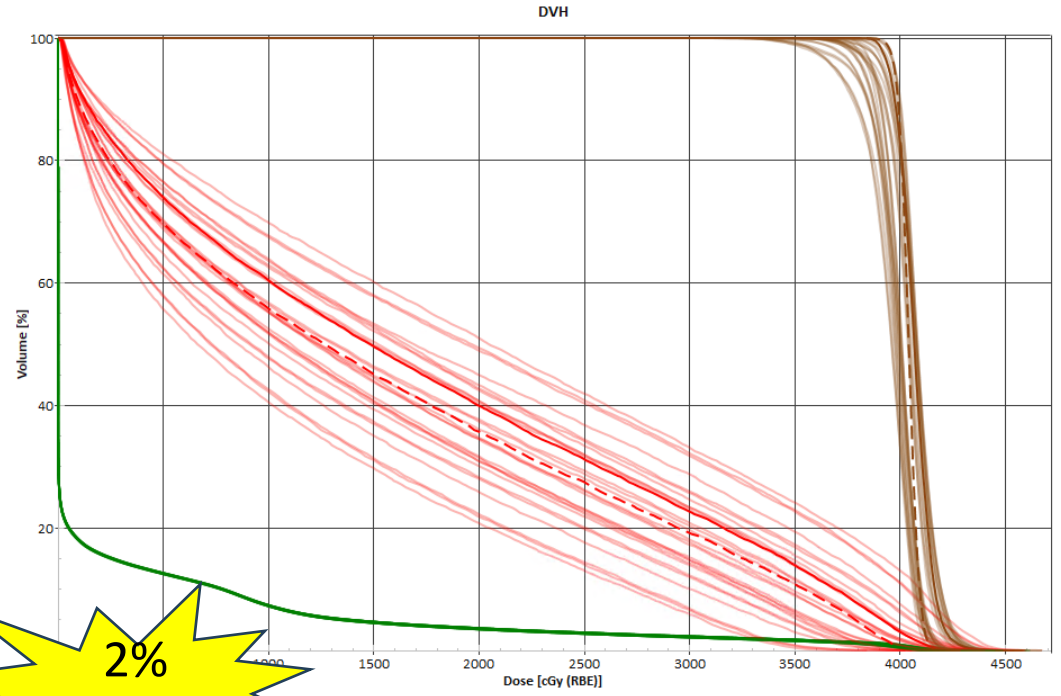
Clinical goals

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_Rob' (5)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	100%	99.89 %	98.80 %	99.98 %
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	43%	4005 cGy (RBE)	4082 cGy (RBE)	3975 cGy (RBE)
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	71%	1625 cGy (RBE)	1967 cGy (RBE)	1628 cGy (RBE)

Ejemplo protones

PTV tradicional



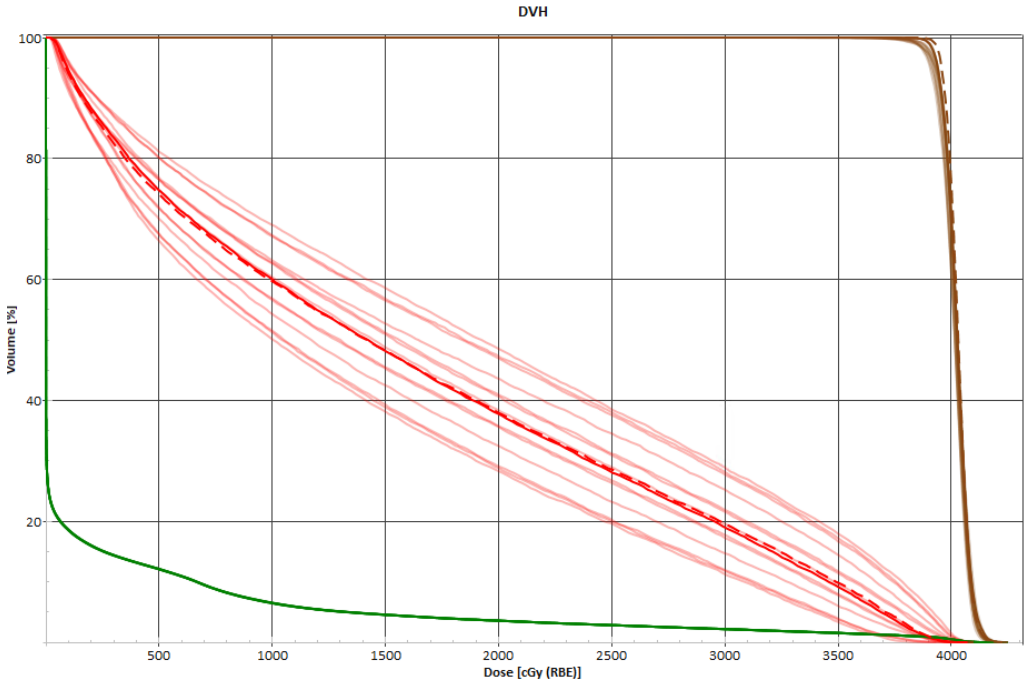
2%
Rango

Volume axis: Relative max

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_PTV' (3)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	36%	99.92 %	82.31 %	99.97 %
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	75%	1706 cGy (RBE)	2107 cGy (RBE)	1551 cGy (RBE)
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	21%	4261 cGy (RBE)	4558 cGy (RBE)	4049 cGy (RBE)

Robusto a CTV



Volume axis: Relative max

Clinical goals

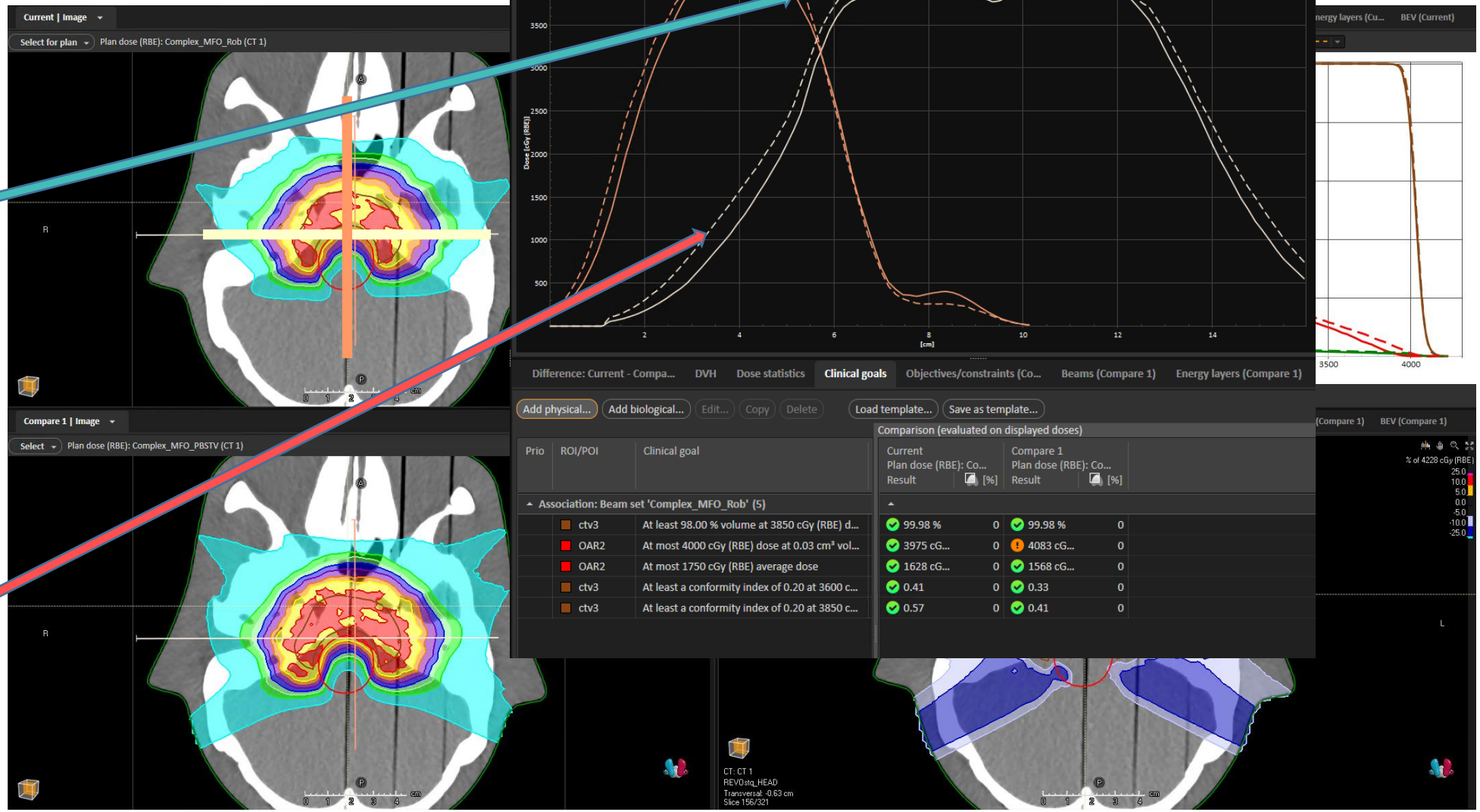
Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_Rob' (5)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	100%	99.89 %	98.80 %	99.98 %
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	43%	4005 cGy (RBE)	4082 cGy (RBE)	3975 cGy (RBE)
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	71%	1625 cGy (RBE)	1967 cGy (RBE)	1628 cGy (RBE)

Ejemplo

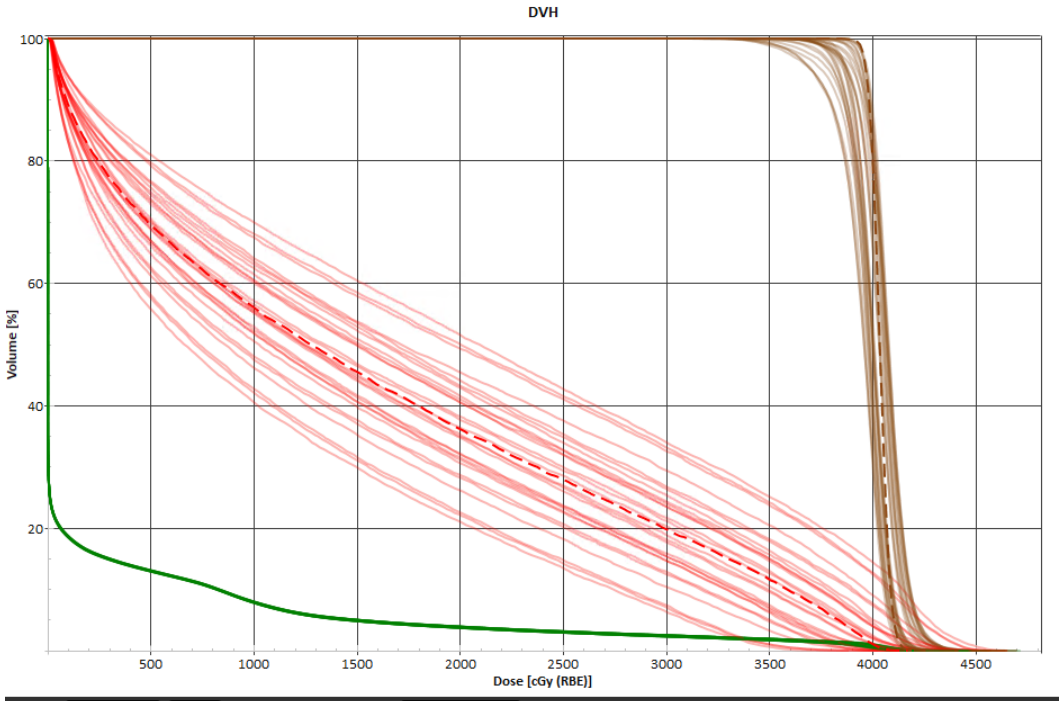
Robusto a CTV

PTV tradicional + BSTV



Ejemplo protones

PTV tradicional + BSTV



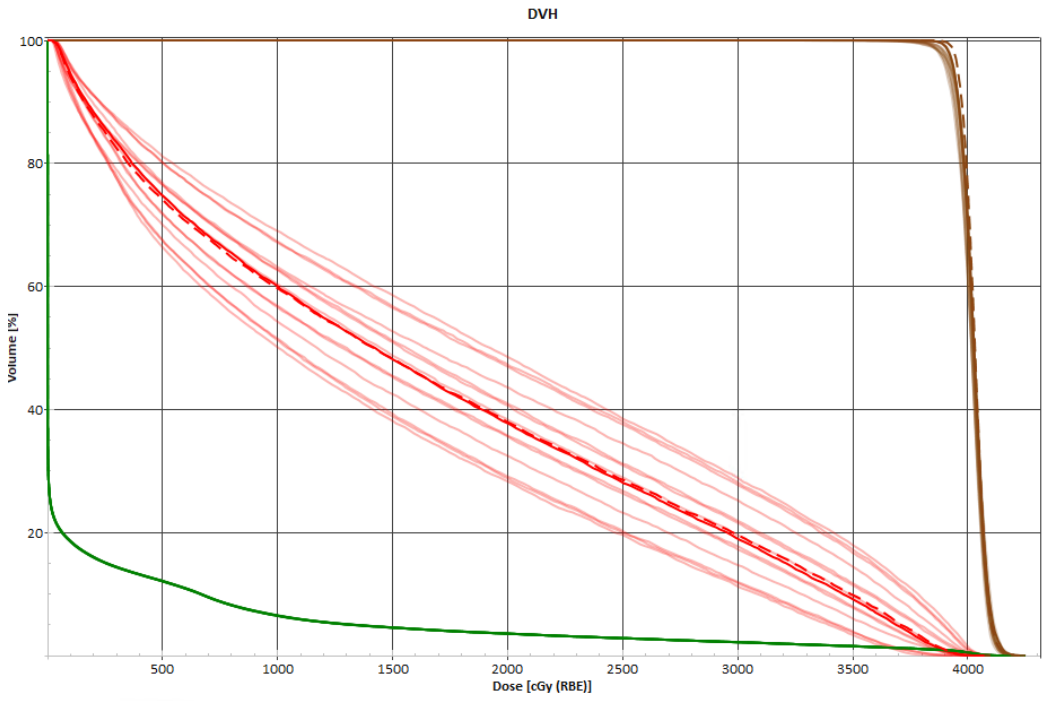
ose axis: Absolute cGy (RBE) Volume axis: Relative max

Clinical goals

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Voxelwise worst	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_PB_1' (3)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	36%	61.35 %	82.57 %	99.98 %
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	71%	2236 cGy (RBE)	2136 cGy (RBE)	1568 cGy (RBE)
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	18%	4607 cGy (RBE)	4589 cGy (RBE)	4083 cGy (RBE)

Robusto a CTV



ose axis: Absolute cGy (RBE) Volume axis: Relative max

Clinical goals

Add physical... Edit... Copy Delete Load template... Save as template...

Priority	ROI/POI	Clinical goal	Passed	Current scenario	Worst scenario	Nominal result
Association: Beam set 'Complex_MFO_Rob' (5)						
	ctv3	At least 98.00 % volume at 3850 cGy (RBE) dose	100%	99.89 %	98.80 %	99.98 %
	OAR2	At most 4000 cGy (RBE) dose at 0.03 cm³ volume	43%	4005 cGy (RBE)	4082 cGy (RBE)	3975 cGy (RBE)
	OAR2	At most 1750 cGy (RBE) average dose	71%	1625 cGy (RBE)	1967 cGy (RBE)	1628 cGy (RBE)

Conclusiones

- La optimización **robusta** con **fotones es equivalente** al uso de **PTV** a efectos de cobertura de los targets
- El uso de **PTV** en fotones tiende a irradiar **más tejido sano**
- En partículas la **optimización robusta** garantiza **cobertura** y permite irradiar **menos tejido sano**
- Optimización **robusta**: mayor **flexibilidad** para contemplar situaciones más complejas
- **Eliminación de PTV**: **consistencia** y homogeneización entre flujos de trabajo **fotones-protones**
- **Robustez = recursos** extras de **cálculo** (optimización y evaluación)
- **Cuidado** con la combinación **ORT+RE+Distribución de probabilidad**

Parador de Antequera

JORNADAS SARH

Nuevas Técnicas y Retos de los Sistemas de Planificación de Tratamientos de Radioterapia

Antequera, 23 de octubre 2026



SOCIEDAD ANDALUZA DE RADIOFÍSICA HOSPITALARIA

www.sarh.es