



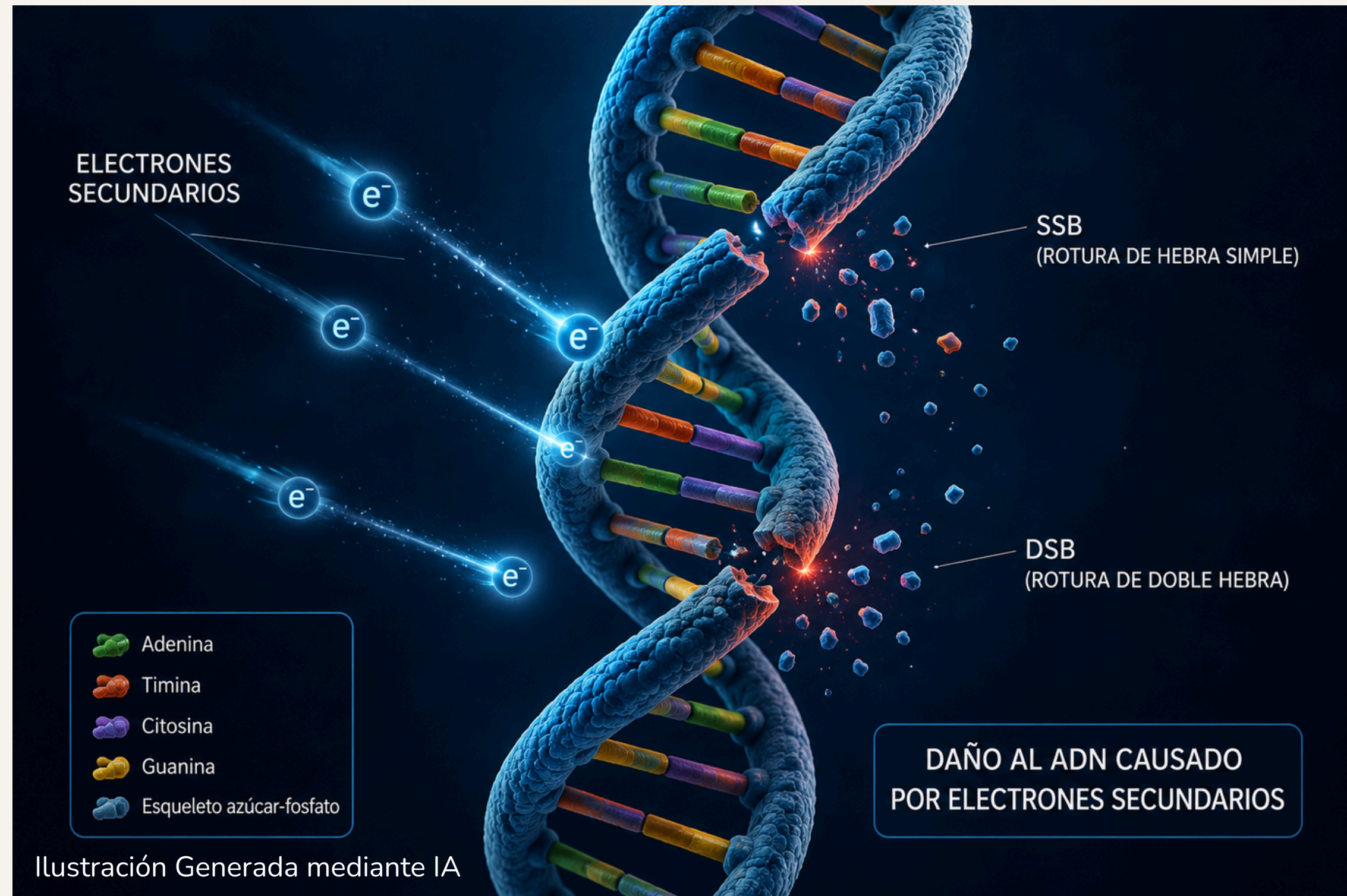
Taller: Aplicaciones Interdisciplinarias de Detectores de Partículas

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA ESTERILIZACIÓN POR RADIACIÓN GAMMA DE COBALTO-60 Y RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG MEDIANTE SIMULACIÓN MONTE CARLO GATE10 Y GEANT4-DNA

PhD. Luis Miguel Mendoza Navas (UMNG)

PhD. Carlos Avila (UNIANDES)

Brigite Alejandra Romero (UNIANDES)

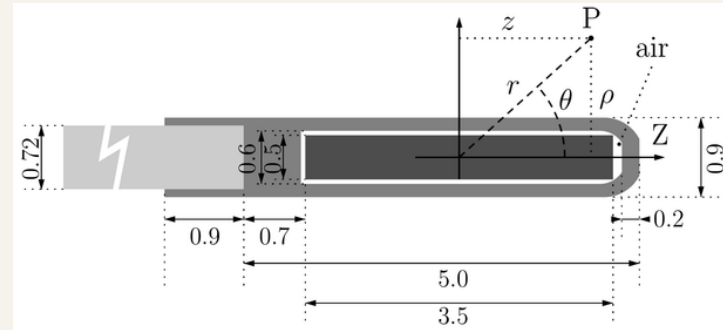
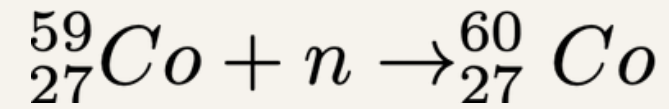


ESTERILIZACION DE DISPOSITIVOS MEDICOS

Más del 50% de los dispositivos médicos esterilizados utilizan radiación ionizante.

Métodos principales:

- Cobalto-60
- Haz de electrones
- Rayos X Bremsstrahlung

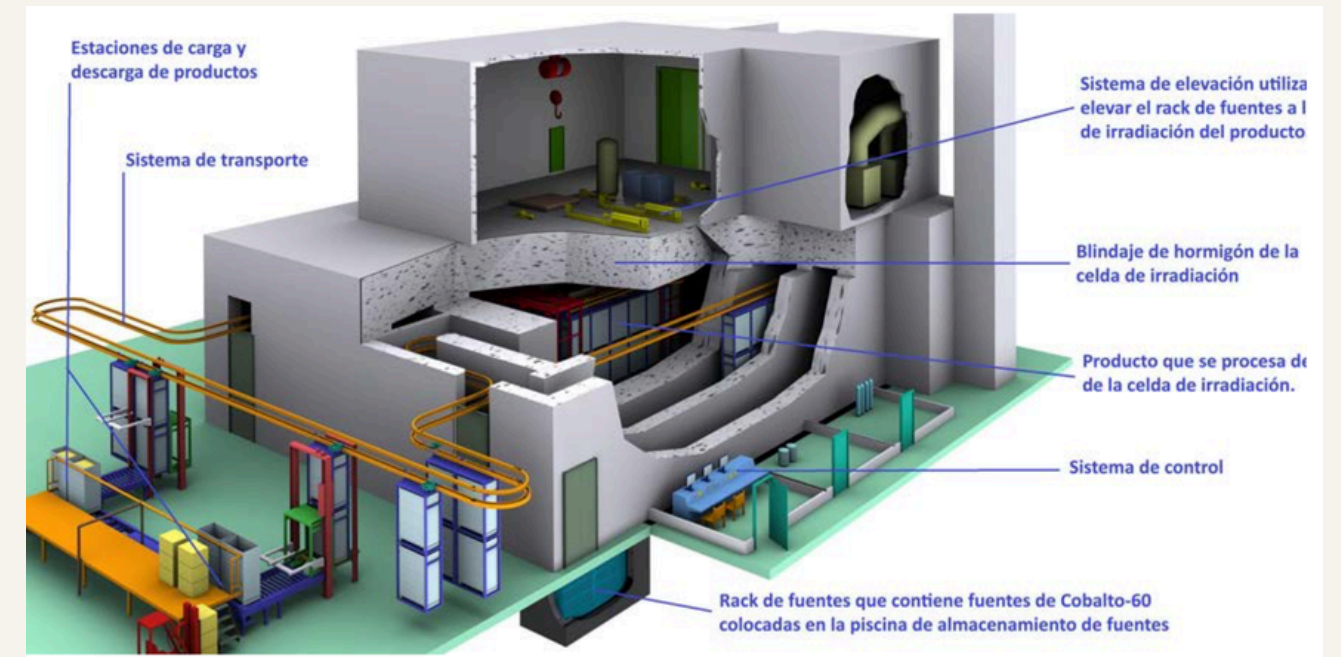


Problema:

- Dependencia mundial del Co-60.
- Costos regulatorios elevados.
- Riesgos de seguridad física.
- Gestión de residuos radiactivos.

Fuente:

https://bqseeds.sarh.es/flexisource_



Fuente: Radiative Sources: Applications and Alternative Solutions

Instalación de esterilización por rayos X

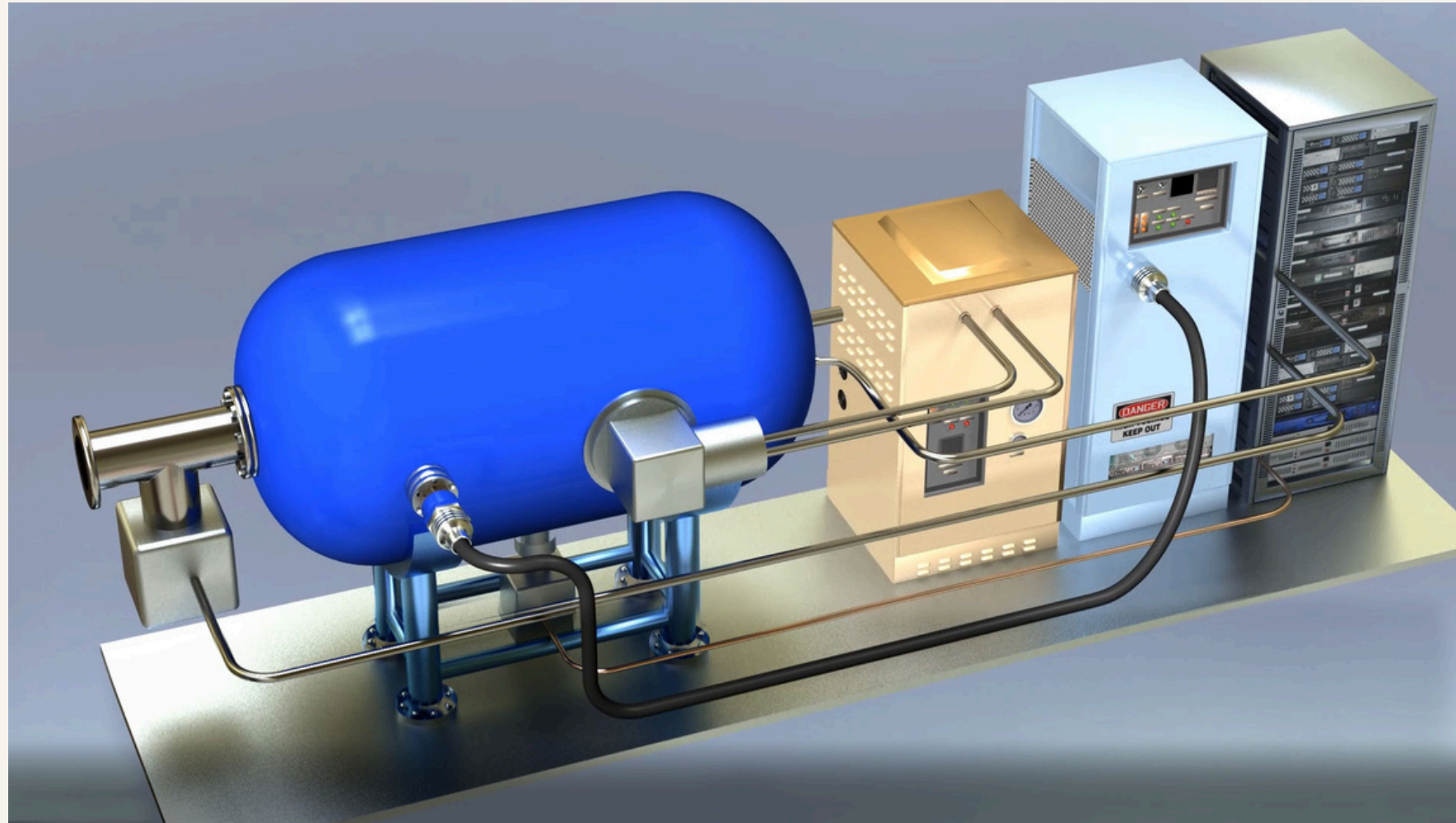


Fuente: Radiative Sources: Applications and Alternative Solutions

	Irradiación Gamma (Co60)	Irradiación Con Rayos X (Bremsstrahlung)
Desglose del Mercado	~50%	<1%
Ventajas	Tiempos de procesamiento rápidos; buena penetración de los productos acabados	Tiempos de procesamiento potencialmente rápidos; buena penetración de los productos acabados
Desventajas	Uso de cobalto-60, un material radiactivo. Debido al haz omnidireccional 30% del haz se usa en la esterilización	Disponibilidad actual; aceptación limitada; ineficiencias energéticas $\epsilon \sim 12.5\%$

Superconducting Radio Frequency (SRF)

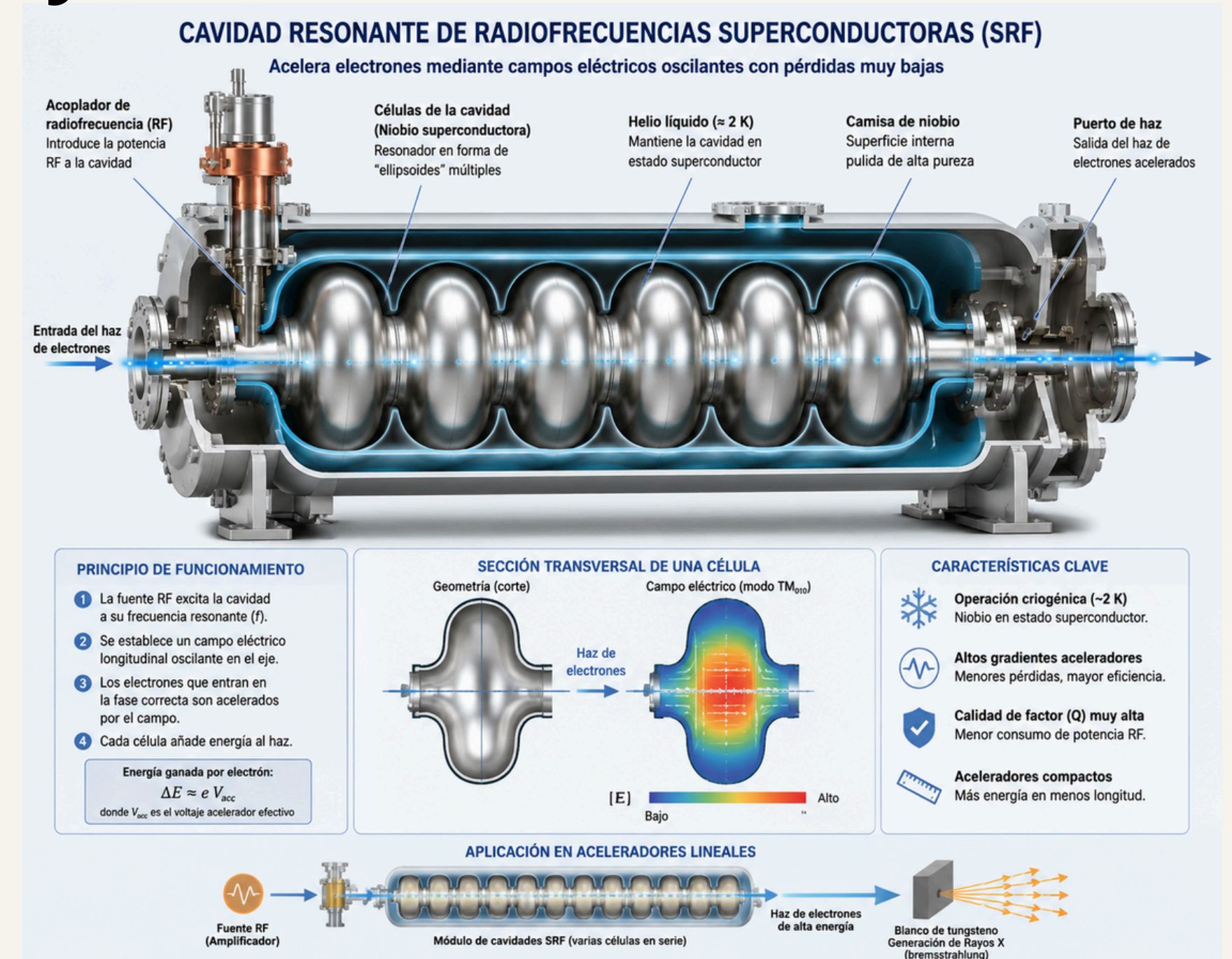
PROTOTIPO ACELERADOR DE ELECTRONES SRF



Fuente: Superconducting Accelerators for High-Power X-ray production
Thomas Kroc. Fermilab

Longitud total acelerador = 1.5-2 m
Diámetro exterior = 0.5 m

Salida del haz:
Energía = 7.5 MeV
Diámetro del haz = 2 mm
Distancia cavidad → blanco W = 10–20 cm



Producción bajo demanda

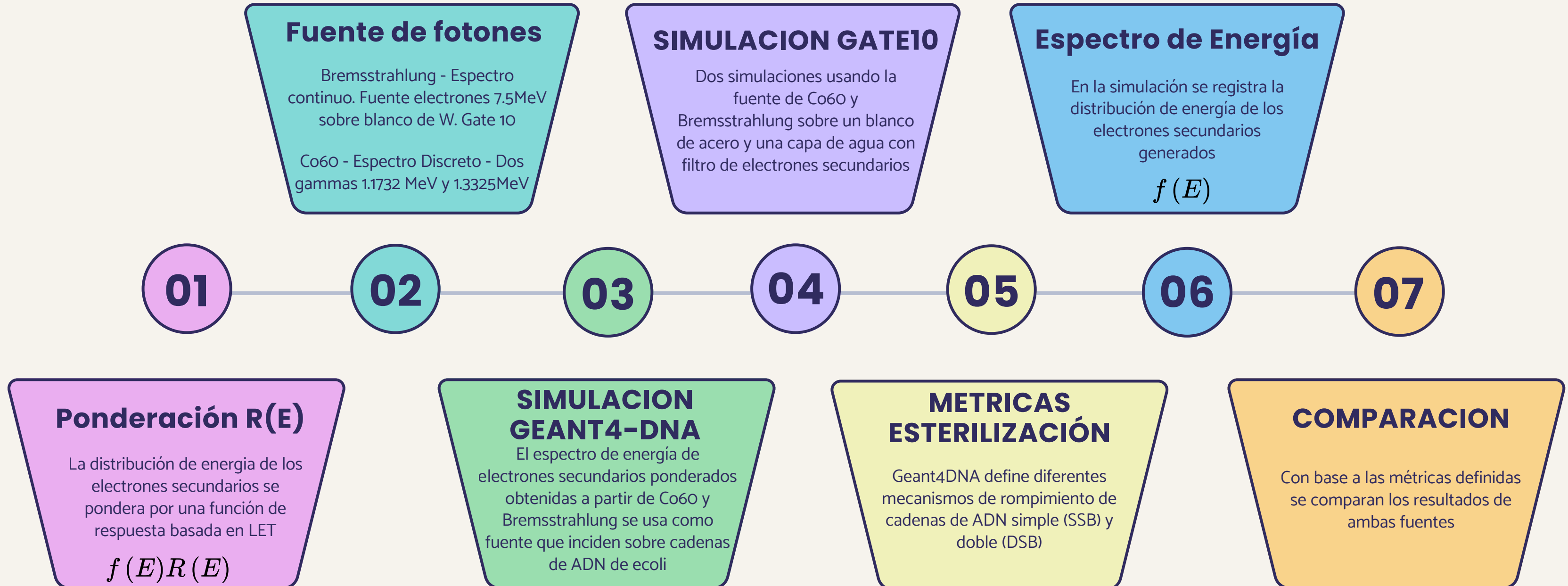
- No utiliza fuentes radiactivas (ne genera residuos)
- Se genera únicamente cuando el acelerador está encendido.
- Eficiencias energéticas $>80\%$
- Mayor seguridad
- Fácil Integración Industrial

OBJETIVO Y METODOLOGIA

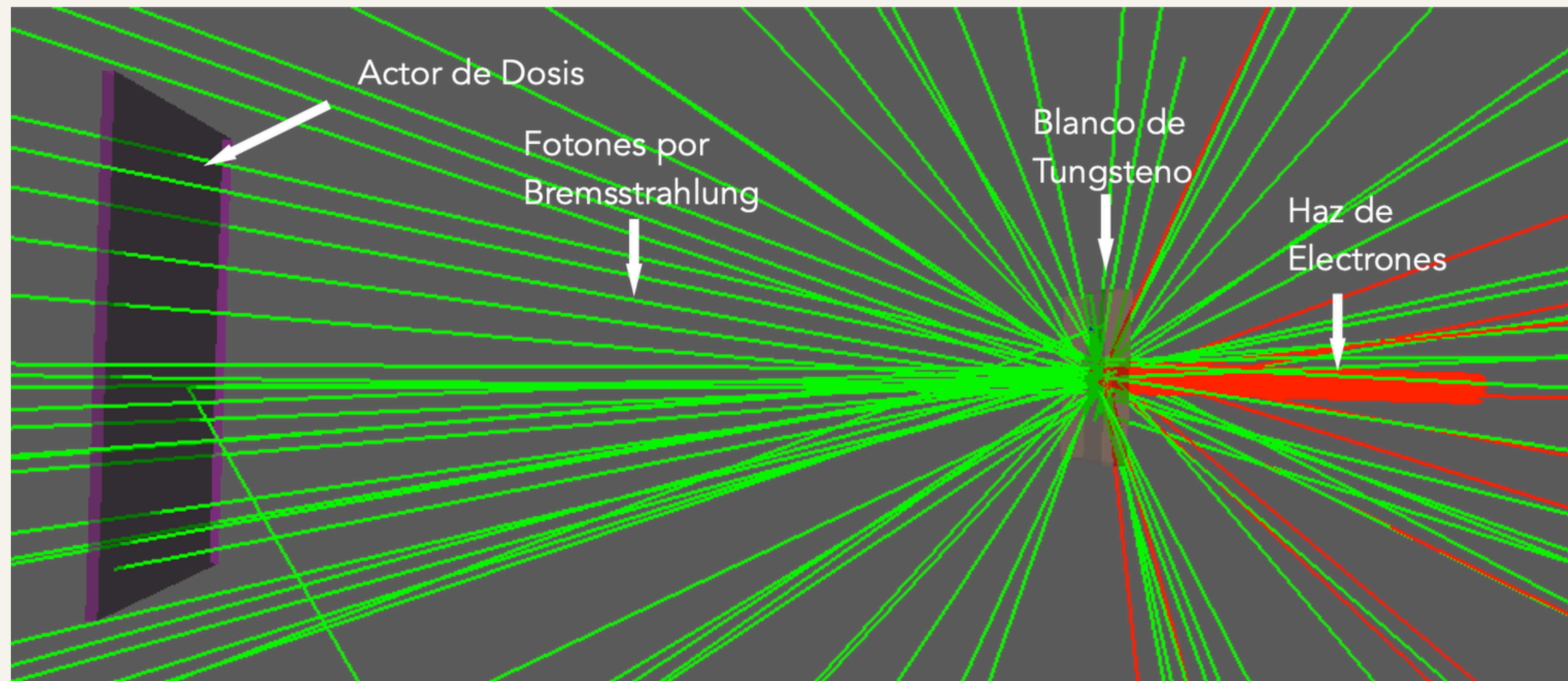
Objetivo General

Comparar los mecanismos físicos y biológicos de esterilización producidos por Co-60 y Bremsstrahlung

Metodología General



GENERACIÓN ESPECTRO DE BREMSSTRAHLUNG



Simulación en GATE10

Fuente:

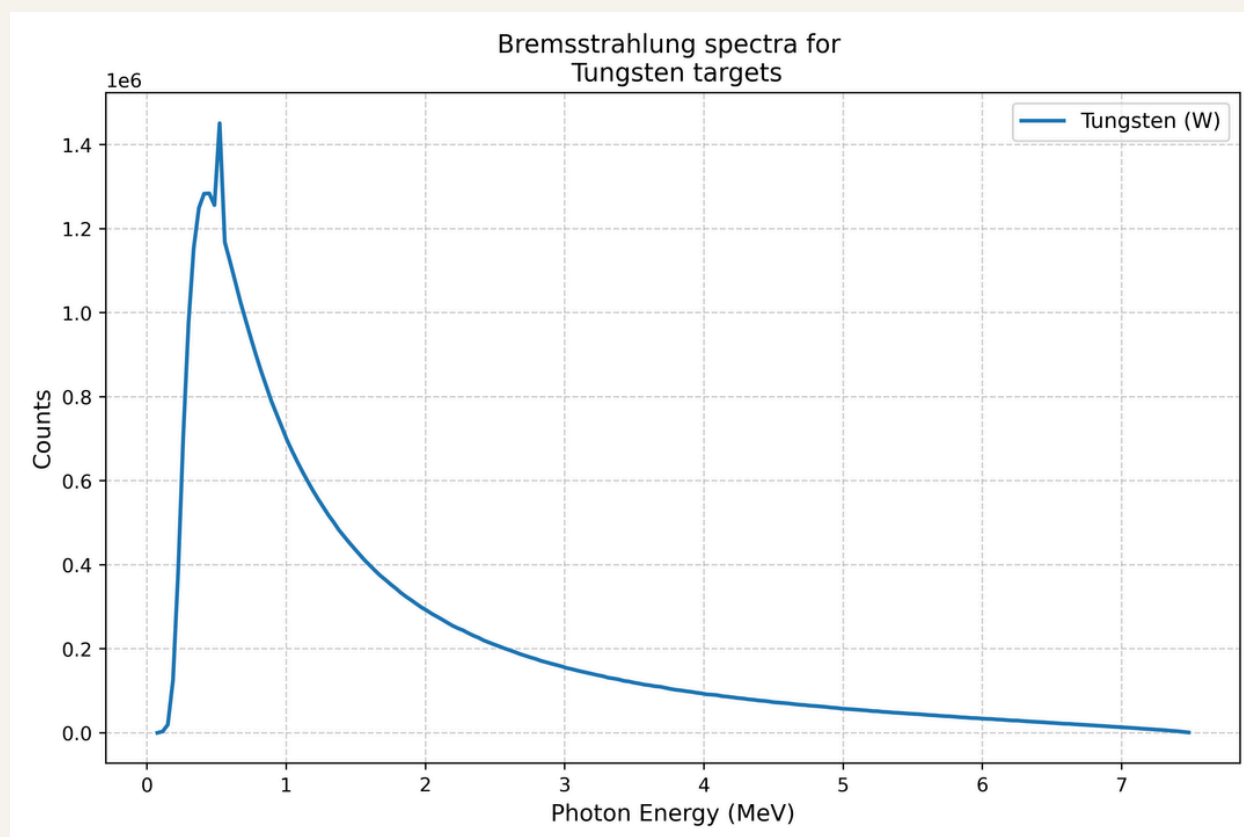
- Electrones monoenergéticos
- Energía = 7.5 MeV

Blanco:

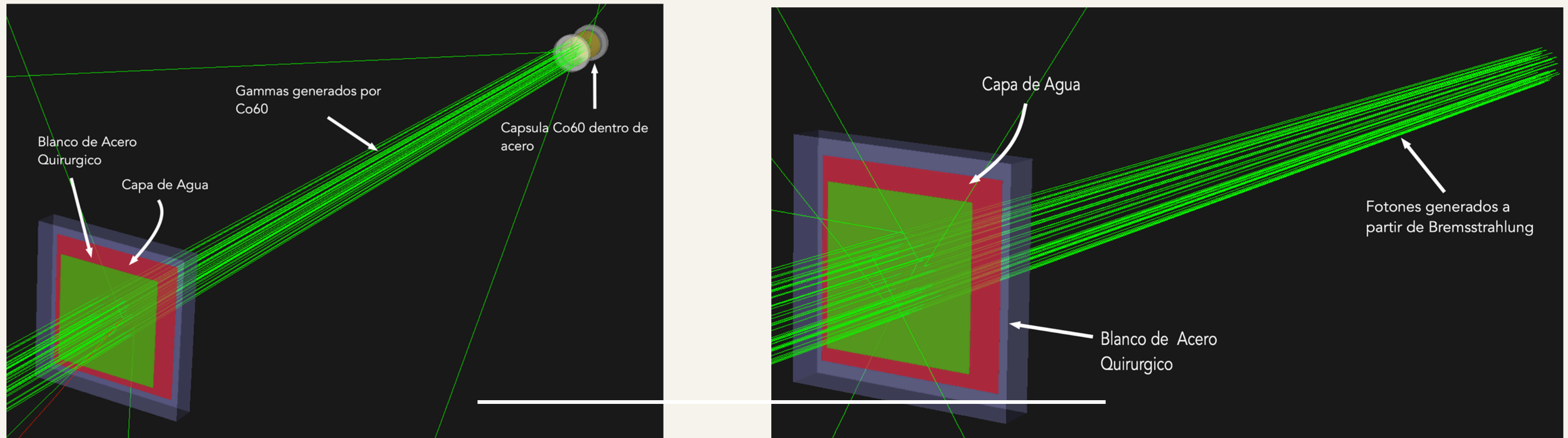
- Tungsteno
- Espesor optimizado

Proceso físico:

- Frenado electrónico
- Producción de rayos X

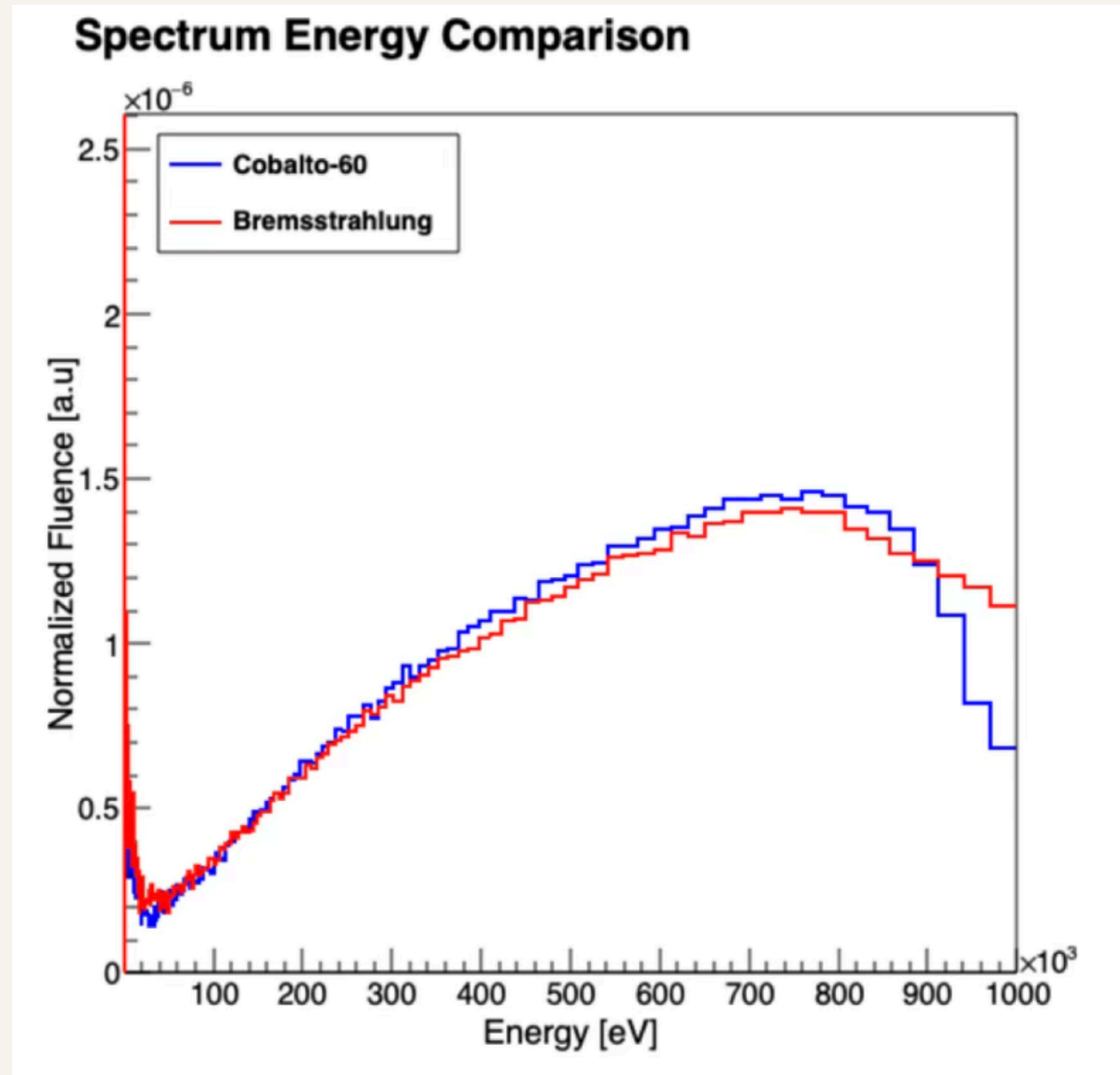


SIMULACION GATE10 GENERACION DE ELECTRONES SECUNDARIOS



- El número de Fotones generados de cada muestra es 1E8 eventos
- Co60 genera dos gammas con energías de 1.173MeV y 1.332MeV
- Para Bremsstrahlung se normalizó los fotones generados a partir de 1MeV hasta 7.5MeV

Espectro de Energía de Electrones Secundarios



Por qué usar bins logarítmicos?

- El espectro cubre un rango muy amplio de energías: 120 eV – 1.5 MeV.
- Los electrones de baja energía son escasos (0.067 % entre 100 eV y 1 keV).
- Los bins lineales producen muchos intervalos con pocos conteos y alta fluctuación estadística.
- Los bins logarítmicos aumentan la resolución relativa en bajas energías y mejoran la estadística por bin.
- La región de bajas energías es la más relevante para los procesos de daño radiobiológico modelados con Geant4-DNA.

Dado que cada bin tendrá un ancho diferente la normalización se realiza respecto al ancho de cada bin:

$$f(E_i) = \frac{N_i}{\Delta E_i}$$

Funciones de Respuesta R(E)

Problema:

- No todos los electrones producen el mismo daño.
- R(E) pondera la probabilidad de Interacción y Efectividad Biológica
- R(E) se basa en Linear Energy Transfer (LET). $LET = -\frac{dE}{dx}$

Funciones Ponderadas

$$f(E)R(E)$$

$$R(E) = \frac{1}{E^{0.8}}$$

$$R(E) = \frac{1}{E}$$

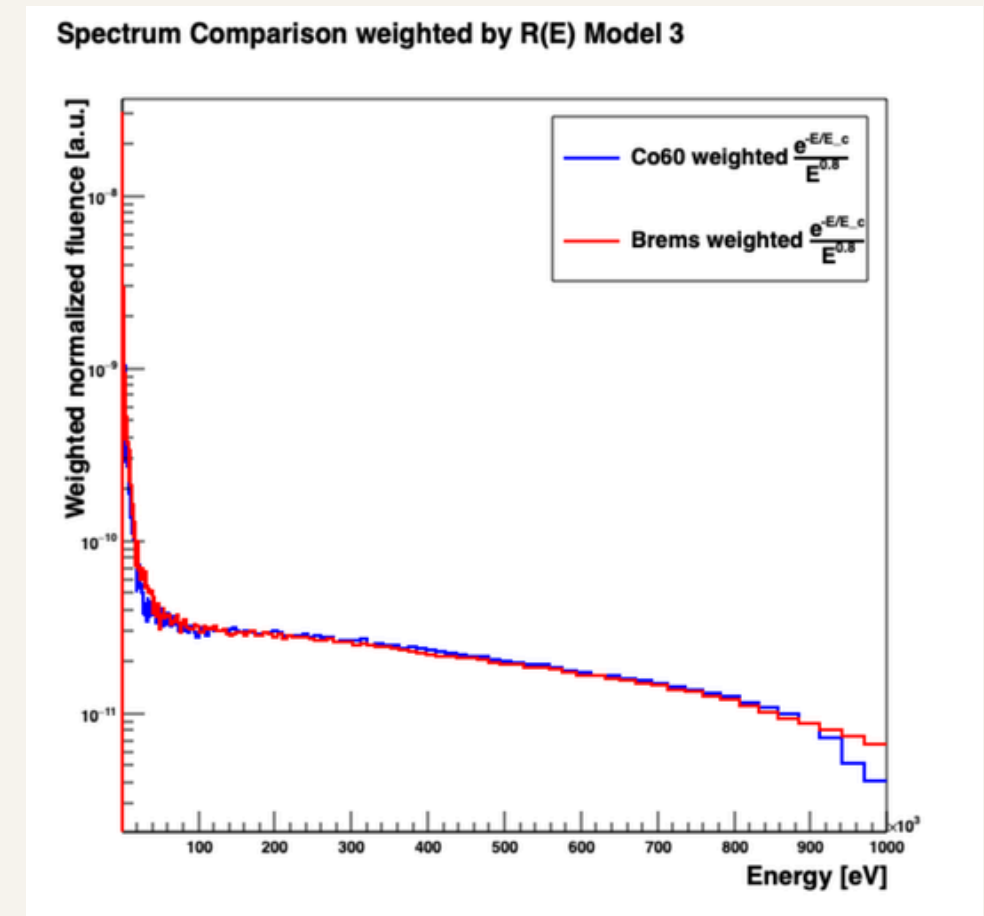
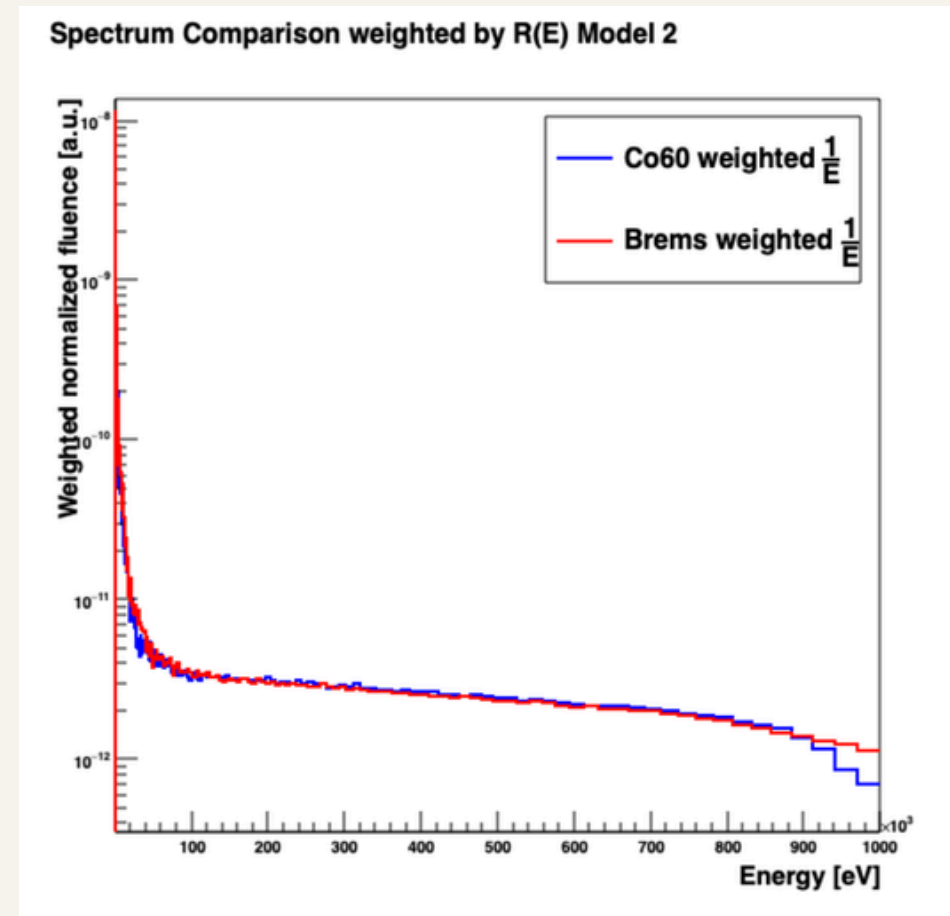
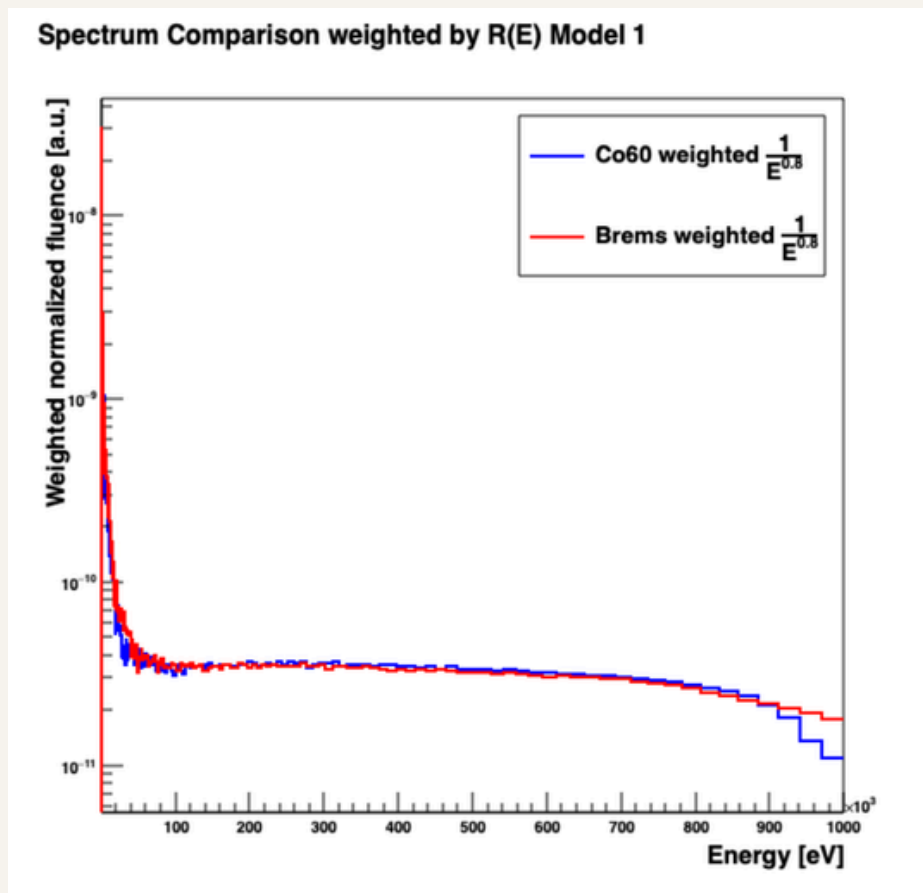
$$R(E) = \frac{e^{-\frac{E}{E_c}}}{E^{0.8}}$$

Interpretación:

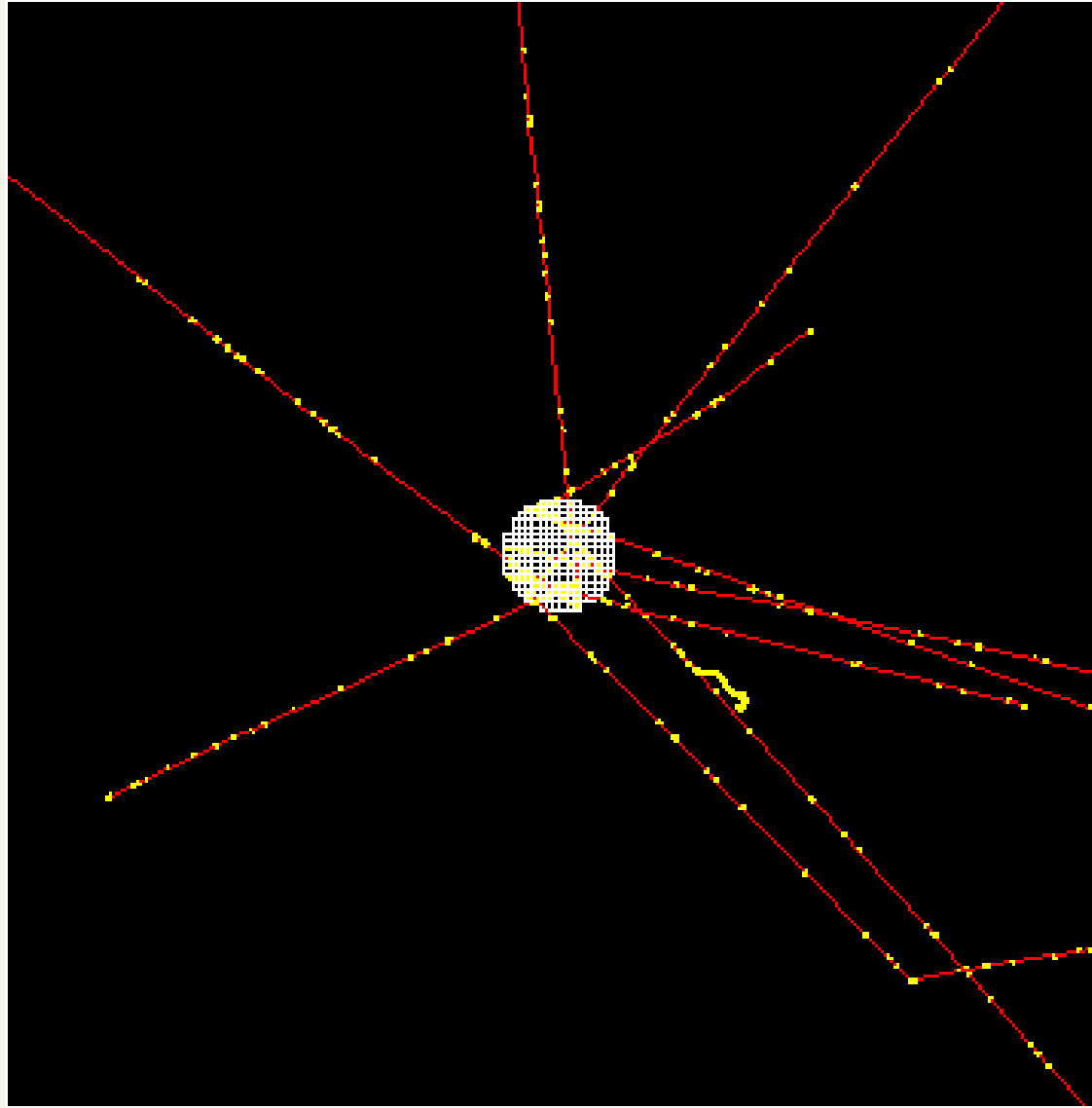
Mayor LET

Mayor deposición local de energía

Mayor probabilidad de daño biológico



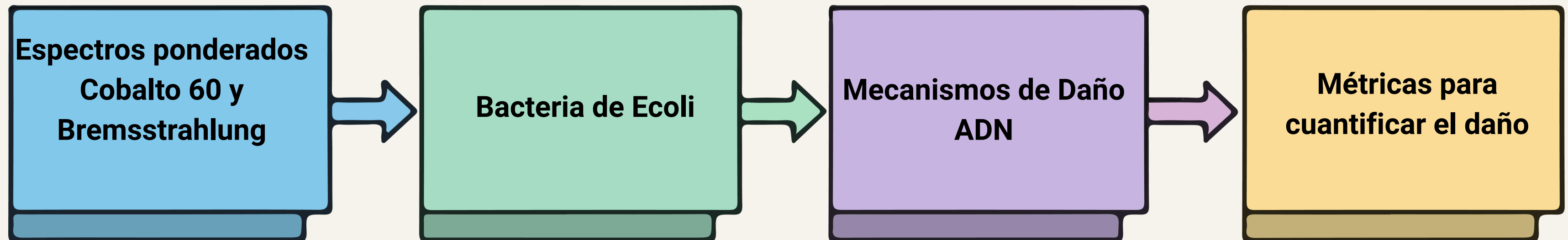
Modelado del Daño Biológico con Geant4-DNA



Geant4-DNA es una extensión del toolkit Geant4 diseñada para simular interacciones físicas, físico-químicas y químicas de la radiación ionizante en agua líquida a escala nanométrica.

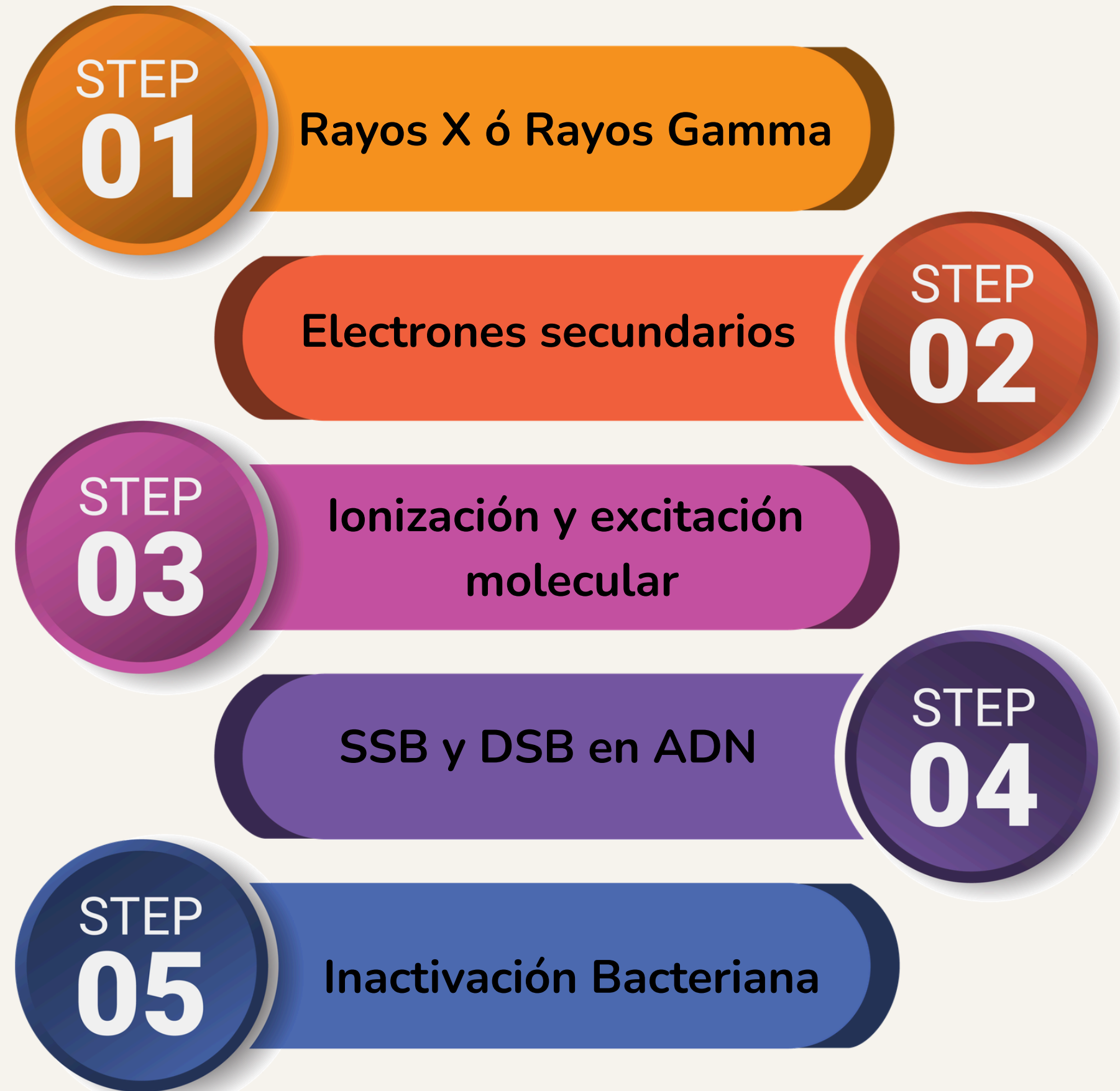
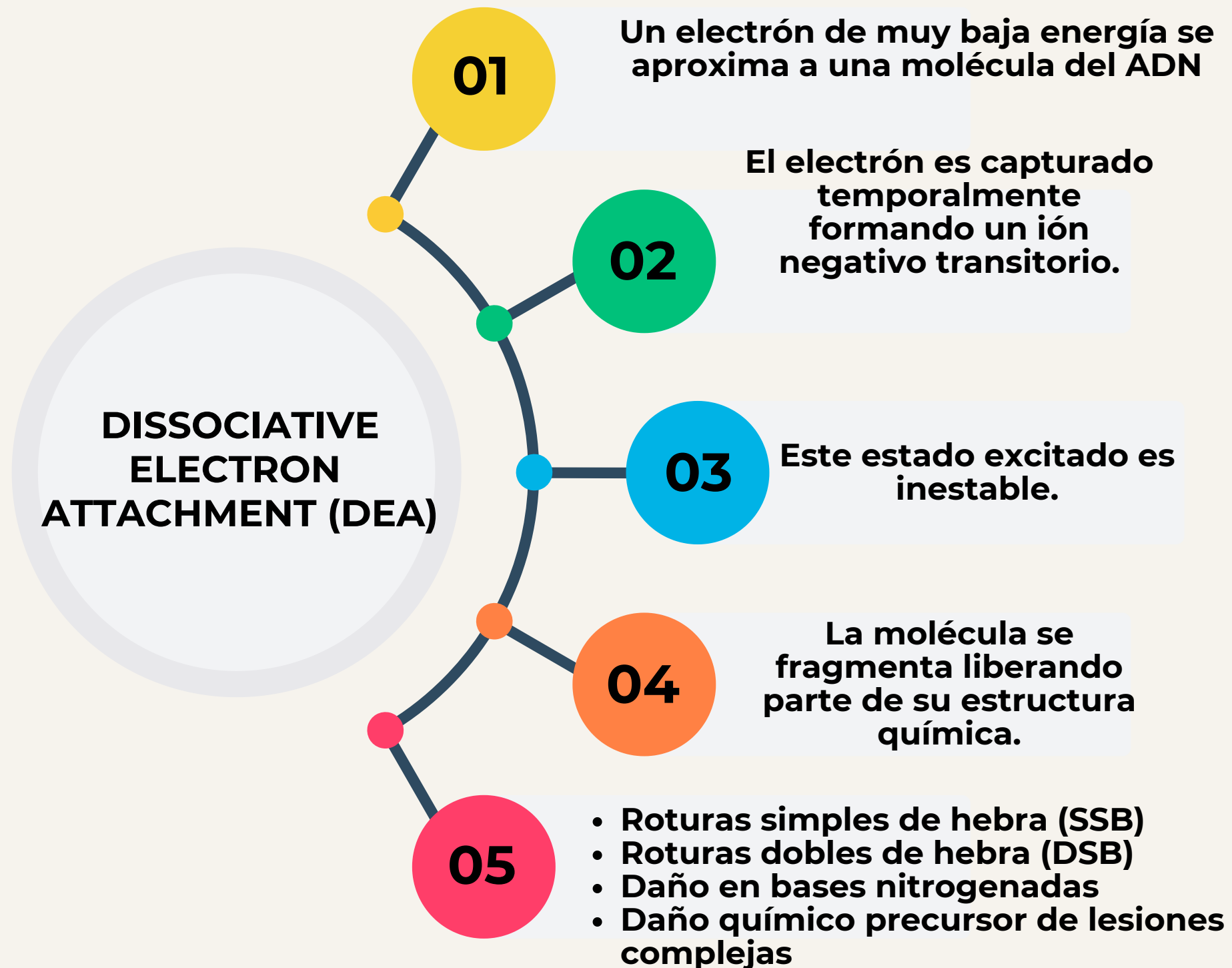
Permite modelar:

- Transporte individual de electrones.
- Ionizaciones y excitaciones.
- Producción de radicales libres.
- Interacción con moléculas biológicas.
- Daño directo e indirecto al ADN.



Papel de los Electrones Secundarios en el Daño al ADN

Los electrones de baja energía pueden inducir rupturas simples (SSB) y dobles (DSB) del ADN mediante el mecanismo de Dissociative Electron Attachment (DEA).



Mecanismos de Daño al ADN Modelados en Geant4-DNA

01

Daño Directo

- Ionización de la molécula.
- Excitación electrónica.
- Ruptura de enlaces químicos.

02

Electrones Acuosos

- Alta reactividad química.
- Capacidad de atacar moléculas biológicas cercanas.
- Participación en procesos de reducción molecular.

03

Formación de Radicales Libres

- $\cdot\text{OH}$ (Hidroxilo)
- H^{\cdot}
- HO_2^{\cdot}
- $\text{H}_2\text{O}_2^{\cdot}$

04

Daño Indirecto

Los radicales libres pueden difundirse hasta el ADN y producir:

- Rotura de enlaces químicos.
- Modificación de bases nitrogenadas.
- Lesiones múltiples cercanas.

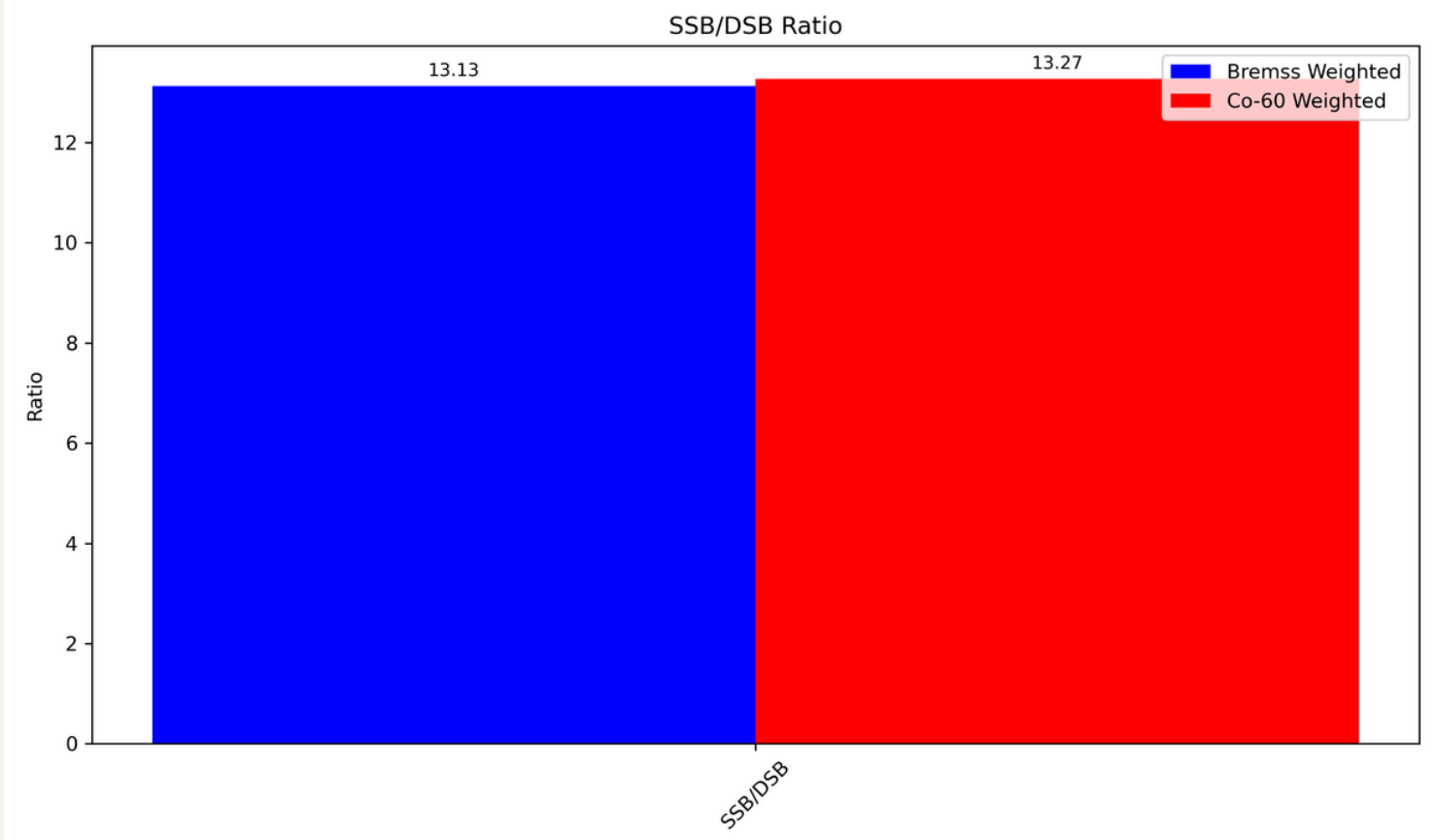
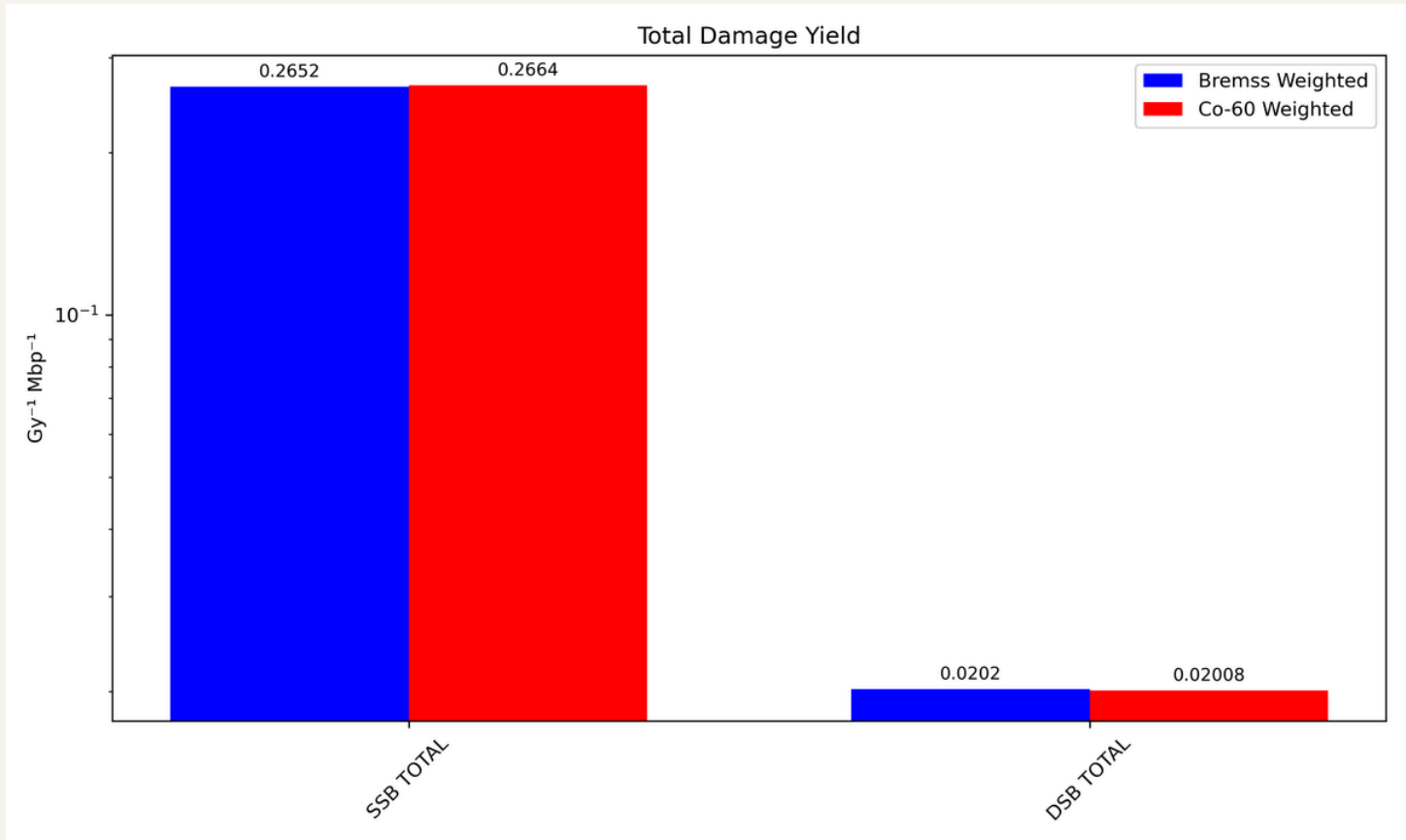
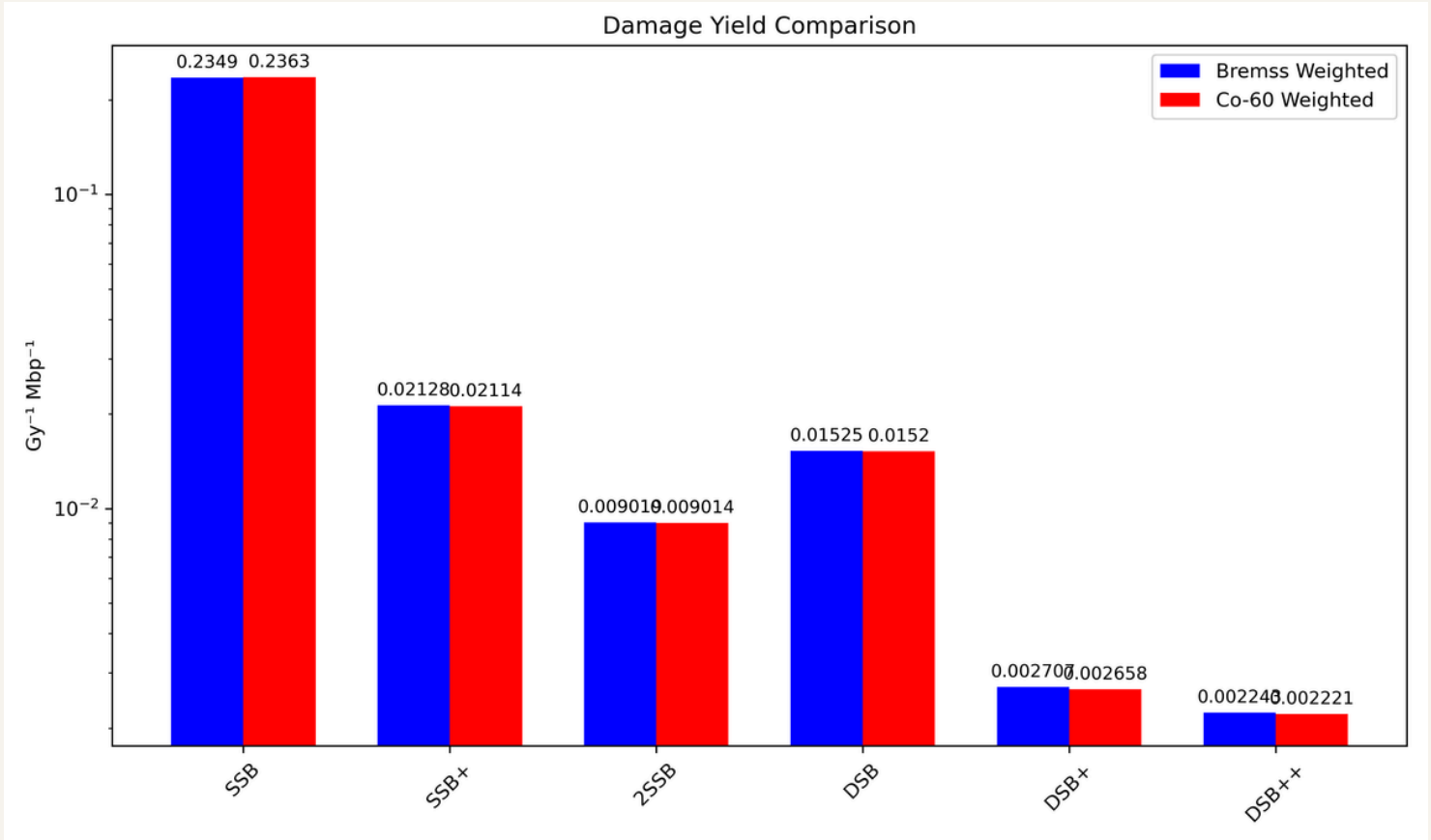
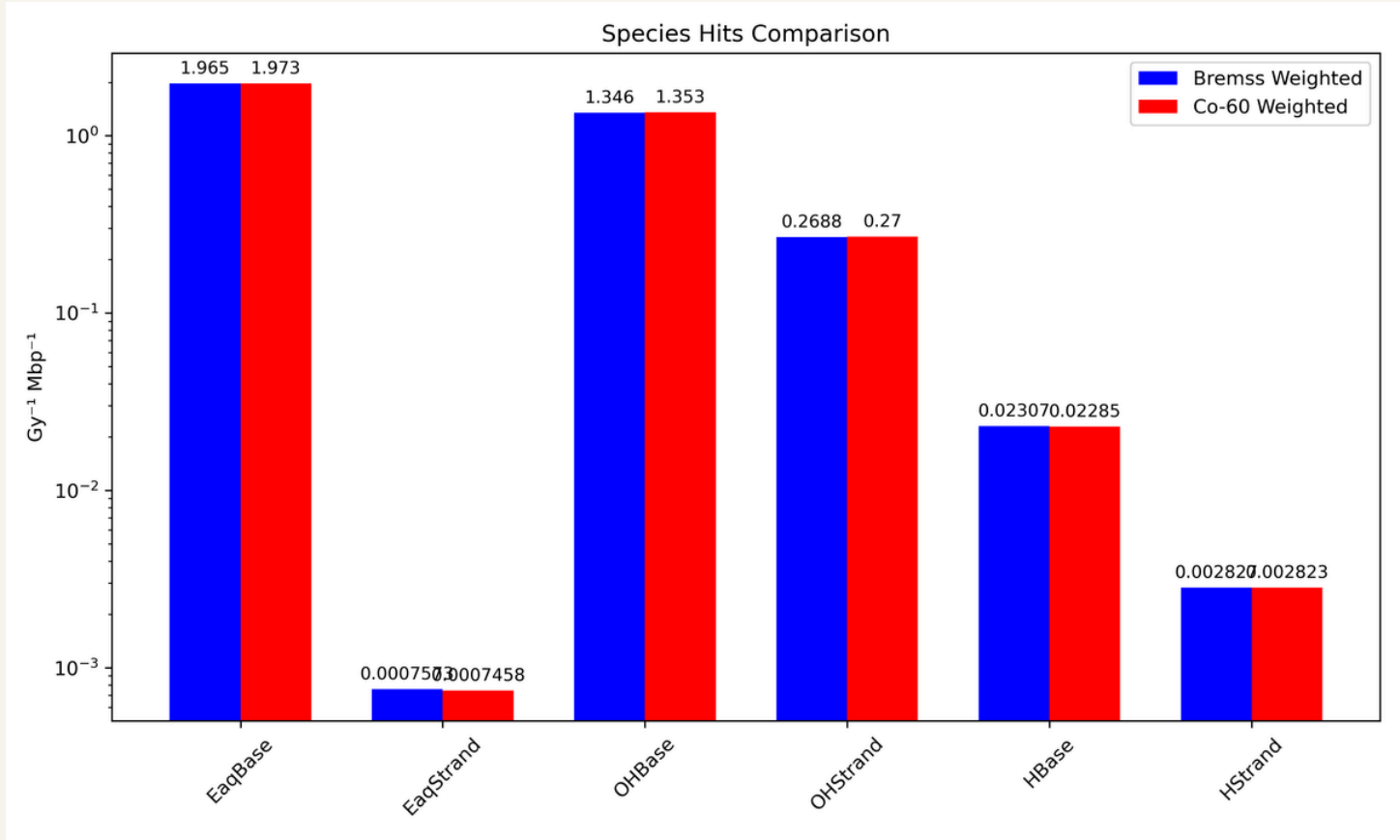
05

Daño en bases Nitrogenadas

- Mutaciones.
- Alteración de la replicación celular.
- Incremento de la probabilidad de muerte bacteriana.

Interacciones nanométricas inducidas por electrones secundarios

Métricas de Daño al ADN



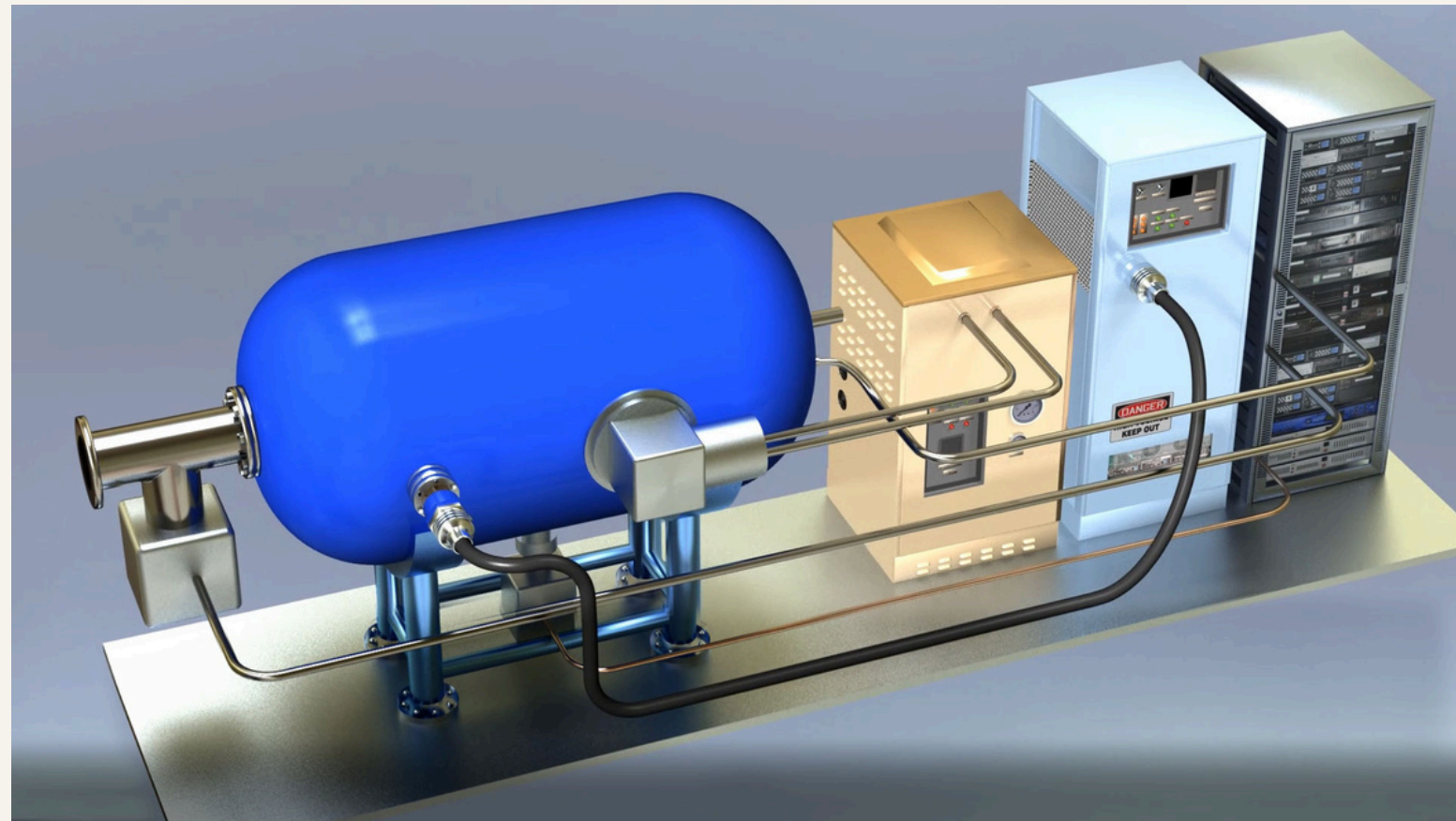
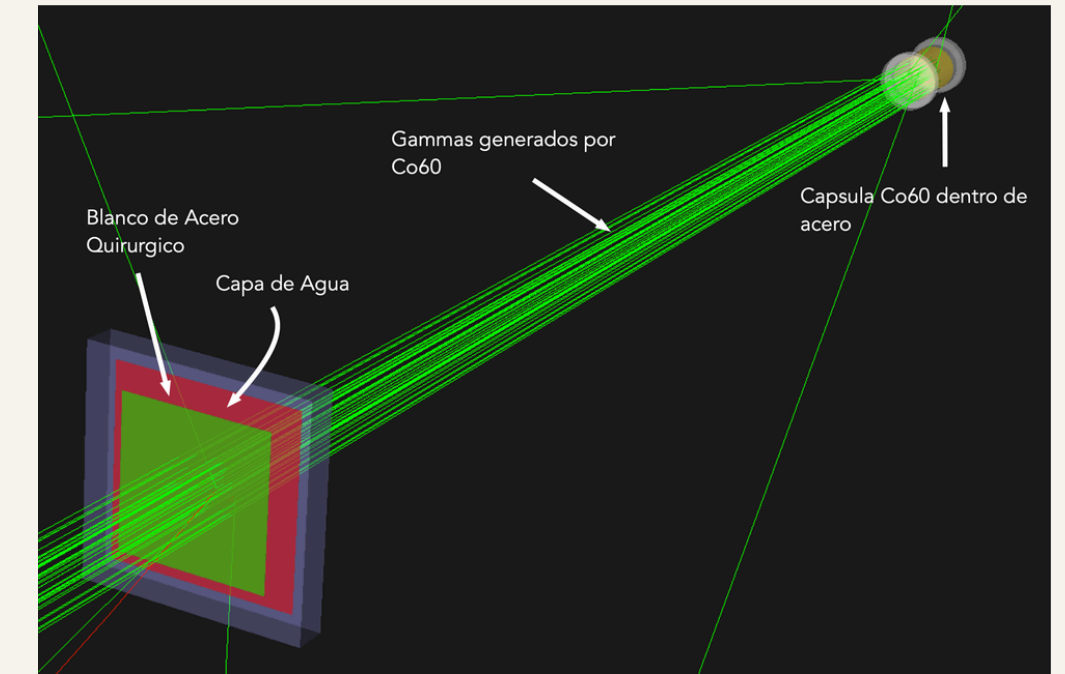
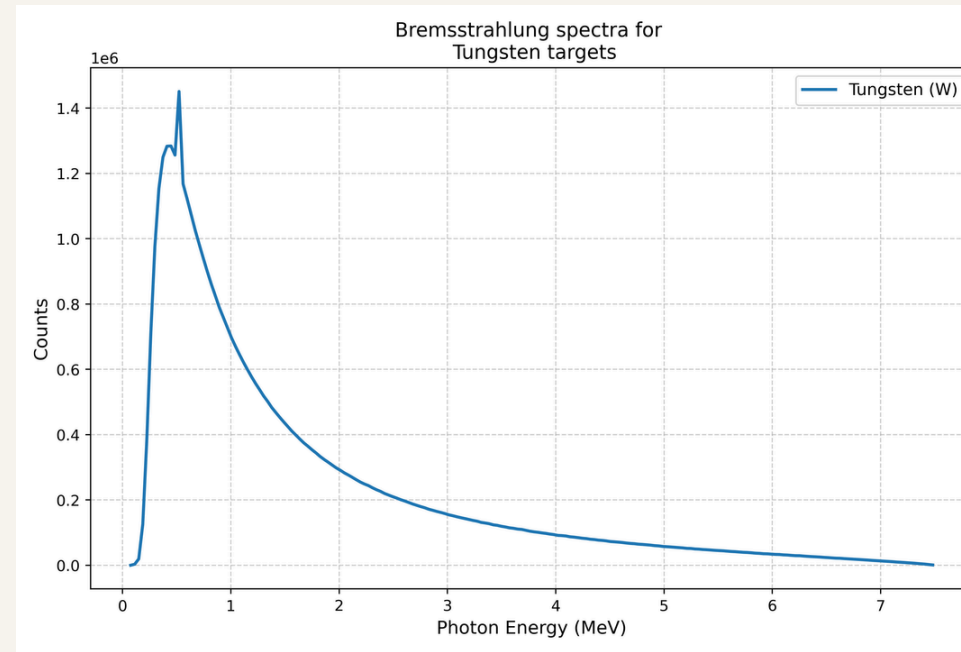
Conclusiones

- Bremsstrahlung es una alternativa viable al Co-60
- Los electrones secundarios dominan el daño biológico.
- Los electrones de baja energía tienen un papel fundamental.
- Geant4-DNA permite relacionar física de radiaciones con daño molecular
- Con las nuevas tecnología de aceleradores SRF el uso de radiación de Bremsstrahlung para procesos de esterilización se convierte en una alternativa viable dando su mejor rendimiento y “limpia” (no produce desechos radiactivos)

Por desarrollar ...

- Optimización de funciones $R(E)$.
- Modelado de biofilms más realistas.
- Evaluación de dosis industriales de 25 kGy.
- Validación experimental.
- Extensión a otros microorganismos.

GRACIAS ... Preguntas



Fuente: Superconducting Accelerators for High-Power X-ray production
Thomas Kroc. Fermilab

