



Predicción de DVH en Radioterapia de Próstata mediante CNN

Autor:

Ing. Natalia Mercedes Espector

Director:

Dr. Flavio Colavecchia (Fundación INTECNUS / CNEA)

Codirector:

Mgtr. Roy Lápera (Fundación INTECNUS)

Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos entre el 26 de agosto de 2025 y el 15 de octubre de 2025.

Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar.	5
2. Identificación y análisis de los interesados	7
3. Propósito del proyecto	8
4. Alcance del proyecto	8
5. Supuestos del proyecto.	8
6. Requerimientos	9
7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>).	10
8. Entregables principales del proyecto	10
9. Desglose del trabajo en tareas	10
10. Diagrama de Activity On Node.	11
11. Diagrama de Gantt	12
12. Presupuesto detallado del proyecto	15
13. Gestión de riesgos	15
14. Gestión de la calidad	16
15. Procesos de cierre	17

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	26 de agosto de 2025
1	Se completa hasta el punto 5 inclusive	9 de septiembre de 2025

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 26 de agosto de 2025

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Natalia Mercedes Espector que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Inteligencia Artificial se titulará “Predicción de DVH en Radioterapia de Próstata mediante CNN” y consistirá en la implementación de una red neuronal convolucional para la predicción de histogramas dosis-volumen en radioterapia de próstata, a partir de la tomografía computada de simulación y el contorno de estructuras. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 horas y un costo estimado de \$ 13400 dólares (a ajustar en función de puntos 9 y 12), con fecha de inicio el 26 de agosto de 2025 y fecha de presentación pública el 30 de junio de 2026.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Dra. Romina Ventimiglia
Fundación INTECNUS

Dr. Flavio Colavecchia
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

La radioterapia es una técnica que permite tratar el cáncer con radiación de manera precisa y segura. Una de las etapas dentro del proceso de tratamiento es la tarea de planificación, que consiste en diseñar el tratamiento que se dispensará al paciente.

En la actualidad, esto se realiza mediante el uso de un Sistema de Planificación de Tratamientos (TPS, del inglés *Treatment Planning System*), un software dedicado para tal fin que cuenta con el modelado del haz de radiación del equipo de tratamiento (Acelerador Lineal), el algoritmo de cálculo y los diversos parámetros geométricos del equipo.

Se puede observar un esquema del flujo de trabajo para la planificación de un tratamiento de radioterapia en la Figura 1. En una primera instancia, se adquiere una tomografía computada (CT, del inglés *Computed Tomography*) de simulación de la zona a tratar. En esta etapa se define la posición en la que se ubicará el paciente durante las sesiones terapéuticas.

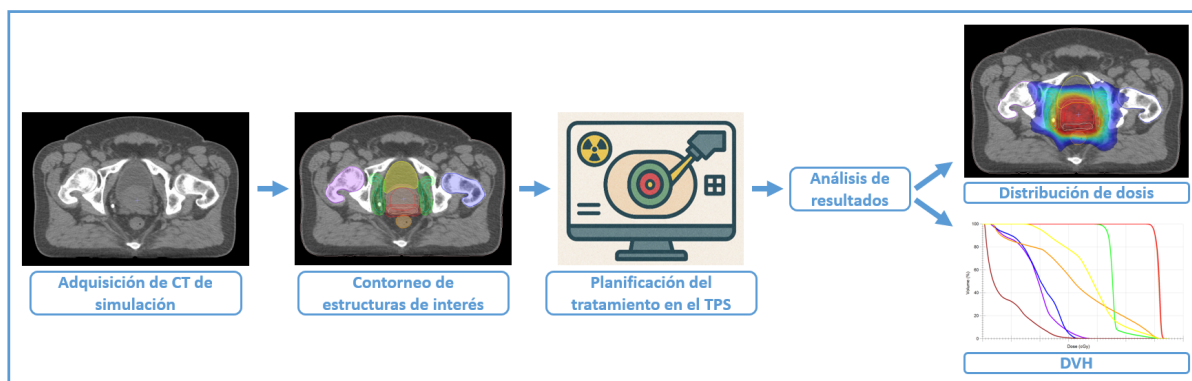


Figura 1. Flujo de trabajo de la planificación de un tratamiento de radioterapia.

Estas imágenes de tomografía se cargan en el TPS, donde el médico radioterapeuta dibuja las estructuras de interés: órganos de riesgo (OAR, del inglés *Organs At Risk*) y volúmenes blanco a tratar. Además, el médico prescribe la dosis terapéutica y las dosis límite de los OARs.

A partir de esta información, que es específica para cada paciente, el físico médico realiza la planificación del tratamiento. Ésta consiste en determinar los diversos parámetros del equipo, tales como energía, ángulos de incidencia, colimación, rotación del equipo e intensidad, con el objetivo de dispensar la dosis en el volumen blanco prescripta por el médico, minimizando la dosis en los tejidos sanos y cumpliendo con las restricciones indicadas para cada OAR.

Usualmente, los tratamientos de próstata de alto riesgo (próstata + vesículas seminales + ganglios linfáticos) se realizan con la técnica VMAT (Terapia en Arco Modulada Volumétrica), en la que el equipo gira en forma continua alrededor del paciente mientras dispensa el tratamiento. Para esta técnica se utiliza planificación inversa, que consiste en indicarle al planificador, mediante diversas funciones de costo, los objetivos dosimétricos en cuanto a cobertura del volumen blanco y restricciones de dosis de los OAR. A partir de éstas, el TPS ajusta los parámetros del equipo para lograr estos objetivos.

La planificación de un tratamiento VMAT de próstata de alto riesgo es un proceso iterativo, que demanda una gran cantidad de tiempo y de recursos. En cada iteración, se analizan los

resultados obtenidos y, en función de lo observado, se ajustan los diversos parámetros y las funciones de costo configuradas en el TPS.

El análisis del plan radica en la revisión de la distribución de dosis sobre el paciente (mediante curvas de isodosis) y en el análisis del DVH. Este último consiste en un histograma acumulado de la dosis en función del volumen para cada OAR (ej. recto y vejiga) y para los volúmenes a tratar (ej. próstata). Mediante su análisis, es posible verificar si las restricciones indicadas por el médico se cumplen (ej. dosis máxima, dosis media, un porcentaje de volumen con cierta dosis como máximo, etc).

Los resultados que se obtienen están asociados a los parámetros configurados para el tratamiento, pero dependerán en gran medida de la anatomía propia del paciente. Por ejemplo, para una configuración similar del tratamiento, si un paciente tiene la vejiga vacía recibirá más dosis que un paciente con la vejiga llena, ya que en el primer caso habrá más volumen de vejiga cercano a la zona a tratar.

El objetivo de este trabajo consiste en lograr predecir el DVH que se obtendrá a partir de la imagen de tomografía del paciente y el contorneo de estructuras de interés. La predicción del DVH previa a la planificación de un tratamiento permitirá conocer de antemano los resultados posibles de obtener para ese paciente en base a su anatomía específica. Con esta información previa, se busca disminuir la cantidad de iteraciones que requiere el proceso, de manera de optimizar el tiempo y recursos invertidos en cada planificación de tratamiento.

En la Figura 2 se observa el flujo de trabajo propuesto para cumplir con este objetivo. Se utilizarán redes neuronales convolucionales (CNN, del inglés *Convolutional Neural Network*) preentrenadas, que tomen como entrada las imágenes de CT junto con los contornos de pacientes históricos, y como salida el DVH asociado al plan de tratamiento de ese caso.

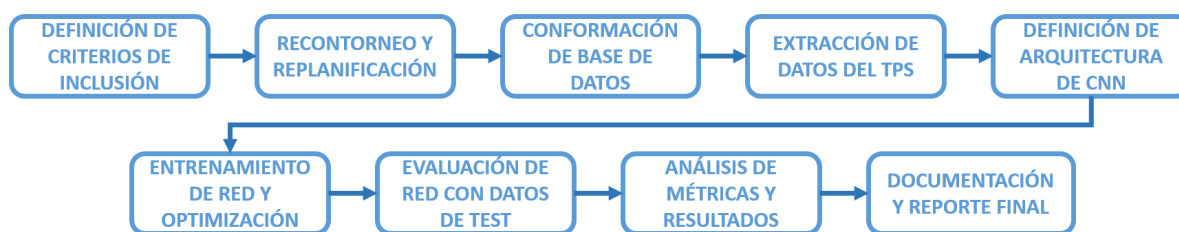


Figura 2. Flujo de trabajo propuesto para la predicción de DVH utilizando CNN.

En una primera etapa, será necesario realizar un análisis exhaustivo de la base de datos actual. Dado que los protocolos de tratamiento se actualizan de manera continua, se deberán estudiar y definir los criterios de selección para determinar los pacientes a incluir en este trabajo. En caso de que el volumen de datos no sea suficiente, se considerará la inclusión de pacientes tratados bajo protocolos previos, recontorneándolos y replanificándolos con el protocolo actual, de modo de homogenizar la base de datos y garantizar su utilidad para el entrenamiento.

Una vez conformada la base de datos específica para este trabajo, se extraerán los datos del TPS y se procederá al entrenamiento del modelo basado en CNN. Se realizará un análisis bibliográfico para identificar la arquitectura más adecuada para la red, y se valorará el uso de técnicas de *transfer learning* que permitan aprovechar modelos preentrenados. El desempeño del modelo se validará frente a nuevos datos mediante métricas cuantitativas que permitan evaluar

objetivamente su capacidad predictiva. Finalmente, se documentará todo el trabajo realizado y se reportarán los resultados obtenidos.

2. Identificación y análisis de los interesados

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Dra. Romina Ventimiglia	Fundación INTECNUS	Responsable médica de Servicio de Radioterapia
Impulsor	Mgtr. Lara Negrin	Fundación INTECNUS	Responsable de Departamento de Investigación Traslacional
Responsable	Ing. Natalia Mercedes Espector	Fundación INTECNUS	Alumna
Colaboradores	-	Fundación INTECNUS	Equipo de médicas radioterapeutas, físicos médicos y técnicos dosimetristas del Servicio de Radioterapia
Orientador 1	Dr. Flavio Colavecchia	Fundación INTECNUS	Director del Trabajo Final
Orientador 2	Mgtr. Roy Lápera	Fundación INTECNUS	Codirector del Trabajo Final
Usuario final	Lic. Fernando Lisa	Fundación INTECNUS	Responsable físico de Servicio de Radioterapia

- Cliente: es la responsable médica del servicio. Valora la optimización del tiempo que transcurre entre la admisión del paciente y el inicio del tratamiento, sin afectar la calidad.
- Impulsor: responsable del Departamento de Investigación Traslacional. Valora la investigación, el desarrollo y las actividades académicas en la institución. Además, puede asistir en la presentación del trabajo al Comité de Docencia e Investigación (CDI) de la institución, y al Comité de Evaluación Ética de Proyectos de Investigación en Salud Humana (CEEPISH) de la provincia de Río Negro.
- Colaboradores: el equipo de médicas radioterapeutas, físicos médicos y técnicos dosimetristas del servicio de Radioterapia, que asistirán en el recontorneo y replanificación de los pacientes que se requieran para incluir en la base de datos.
- Orientador 1: forma parte del Departamento de Investigación Traslacional, y trabaja en la aplicación de tecnologías computacionales avanzadas en salud. Se especializa en el ámbito del procesamiento de imágenes médicas y física médica computacional, y tiene amplia experiencia en docencia y en dirección de trabajos finales de carrera.
- Orientador 2: tiene amplia experiencia como físico médico en el servicio de Radioterapia. Además, tiene formación en el ámbito de la ciencia de datos y la inteligencia artificial, por lo que puede aportar tanto en esas áreas como desde el conocimiento del dominio.
- Usuario final: es el responsable físico del servicio de Radioterapia. Es quien podrá determinar la utilidad y la aplicabilidad de este proyecto en el flujo clínico. Deben incluirse también como usuarios finales el resto del equipo de físicos médicos especialistas en radioterapia y técnicos dosimetristas.

3. Propósito del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo predecir el DVH de los OAR de una planificación de un tratamiento de radioterapia de próstata, a partir de las imágenes de la tomografía de simulación de un paciente y del contorno de estructuras de interés. Contar con esta predicción previa a comenzar la planificación permitirá optimizar el tiempo y recursos invertidos en esta etapa. Esto contribuirá a reducir el tiempo que transcurre entre la CT de planificación y el inicio del tratamiento, lo cual es especialmente crítico en el contexto clínico.

4. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto incluye:

- Ingeniería de datos: análisis exhaustivo de la base de datos actual, definición de criterios de inclusión y exclusión, recontorneo de estructuras y replanificación de tratamientos en casos específicos, anonimización de los datos, conformación de la base de datos específica del proyecto, extracción y procesamiento de datos del TPS.
- Revisión bibliográfica: estudio del estado del arte en predicción de DVH, arquitecturas de redes convolucionales y técnicas de transfer learning aplicadas al ámbito de la radioterapia.
- Implementación de modelos: propuesta de la arquitectura de la CNN, entrenamiento y optimización del modelo, ajuste de hiperparámetros, exploración del impacto de distintas configuraciones de entrada (CT, contornos, combinaciones).
- Evaluación del desempeño: validación del modelo con nuevo conjunto de casos, análisis de métricas cuantitativas de desempeño, comparación con resultados reportados en la bibliografía.
- Documentación y reporte: registro detallado del proceso, justificación de decisiones técnicas y presentación de resultados intermedios y finales.

A su vez, el alcance no incluye:

- Integración ni implementación del modelo en el flujo clínico actual.
- Validación prospectiva en pacientes en curso de tratamiento.

5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se asume:

- Disponibilidad de tiempo: se contará con el tiempo suficiente para llevar adelante las distintas etapas del proyecto dentro del ámbito laboral, considerando las limitaciones propias de la práctica clínica y la necesidad de compatibilizar las actividades asistenciales con las de investigación.

- Recursos humanos: se dispondrá del equipo interdisciplinario necesario (médicos radio-terapeutas, físicos médicos y técnicos dosimetristas) para realizar el recontorneo y/o la replanificación de los casos requeridos en la construcción de la base de datos.
- Recursos materiales y tecnológicos: se dispondrá de los recursos computacionales adecuados, incluyendo acceso a hardware especializado (por ejemplo, GPU de alto rendimiento) para el entrenamiento y la validación de los modelos de redes neuronales.
- Apoyo institucional: se contará con el respaldo de la institución en lo relativo al acceso a datos clínicos anonimizados, la utilización de infraestructura y la promoción del desarrollo de herramientas basadas en inteligencia artificial en el ámbito de la radioterapia.
- Disponibilidad y calidad de los datos: los datos extraídos del TPS y de los sistemas de registro se encontrarán completos, consistentes y con la calidad suficiente para permitir su utilización en el entrenamiento del modelo.
- Cumplimiento normativo y ético: el proyecto se desarrollará en conformidad con las normativas vigentes en materia de ética en investigación clínica y protección de datos personales, garantizando la anonimización y el resguardo de la información de los pacientes.

6. Requerimientos

Los requerimientos deben enumerarse y de ser posible estar agrupados por afinidad, por ejemplo:

1. Requerimientos funcionales:
 - 1.1. El sistema debe...
 - 1.2. Tal componente debe...
 - 1.3. El usuario debe poder...
2. Requerimientos de documentación:
 - 2.1. Requerimiento 1.
 - 2.2. Requerimiento 2 (prioridad menor)
3. Requerimiento de testing...
4. Requerimientos de la interfaz...
5. Requerimientos interoperabilidad...
6. etc...

Leyendo los requerimientos se debe poder interpretar cómo será el proyecto y su funcionalidad.

Indicar claramente cuál es la prioridad entre los distintos requerimientos y si hay requerimientos opcionales.

!!!No olvidarse de que los requerimientos incluyen a las regulaciones y normas vigentes!!!

Y al escribirlos seguir las siguientes reglas:

- Ser breve y conciso (nadie lee cosas largas).
- Ser específico: no dejar lugar a confusiones.
- Expresar los requerimientos en términos que sean cuantificables y medibles.

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

Descripción: en esta sección se deben incluir las historias de usuarios y su ponderación (*history points*). Recordar que las historias de usuarios son descripciones cortas y simples de una característica contada desde la perspectiva de la persona que desea la nueva capacidad, generalmente un usuario o cliente del sistema. La ponderación es un número entero que representa el tamaño de la historia comparada con otras historias de similar tipo.

Se debe indicar explícitamente el criterio para calcular los *story points* de cada historia.

El formato propuesto es:

1. “Como [rol] quiero [tal cosa] para [tal otra cosa].”
Story points: 8 (complejidad: 3, dificultad: 2, incertidumbre: 3)

8. Entregables principales del proyecto

Los entregables del proyecto son (ejemplo):

- Manual de usuario.
- Diagrama de circuitos esquemáticos.
- Código fuente del firmware.
- Diagrama de instalación.
- Memoria del trabajo final.
- etc...

9. Desglose del trabajo en tareas

El WBS debe tener relación directa o indirecta con los requerimientos. Son todas las actividades que se harán en el proyecto para dar cumplimiento a los requerimientos. Se recomienda mostrar el WBS mediante una lista indexada:

1. Grupo de tareas 1 (suma h)
 - 1.1. Tarea 1 (tantas h)

- 1.2. Tarea 2 (tantas h)
- 1.3. Tarea 3 (tantas h)
- 2. Grupo de tareas 2 (suma h)
 - 2.1. Tarea 1 (tantas h)
 - 2.2. Tarea 2 (tantas h)
 - 2.3. Tarea 3 (tantas h)
- 3. Grupo de tareas 3 (suma h)
 - 3.1. Tarea 1 (tantas h)
 - 3.2. Tarea 2 (tantas h)
 - 3.3. Tarea 3 (tantas h)
 - 3.4. Tarea 4 (tantas h)
 - 3.5. Tarea 5 (tantas h)

Cantidad total de horas: tantas.

¡Importante!: la unidad de horas es h y va separada por espacio del número. Es incorrecto escribir “23hs”.

Se recomienda que no haya ninguna tarea que lleve más de 40 h. De ser así se recomienda dividirla en tareas de menor duración.

10. Diagrama de Activity On Node

Armar el AoN a partir del WBS definido en la etapa anterior.

Una herramienta simple para desarrollar los diagramas es el Draw.io (<https://app.diagrams.net/>). Draw.io

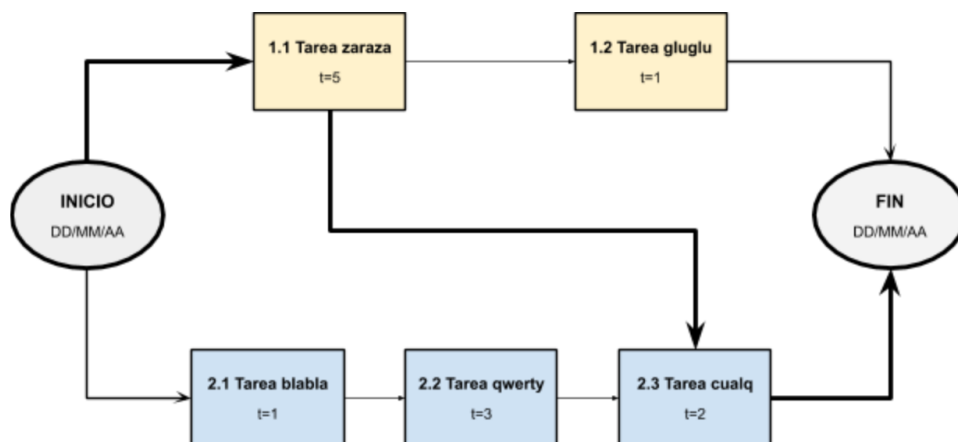


Figura 3. Diagrama de *Activity on Node*.

Indicar claramente en qué unidades están expresados los tiempos. De ser necesario indicar los caminos semi críticos y analizar sus tiempos mediante un cuadro. Es recomendable usar colores y un cuadro indicativo describiendo qué representa cada color.

11. Diagrama de Gantt

Existen muchos programas y recursos *online* para hacer diagramas de Gantt, entre los cuales destacamos:

- Planner
- GanttProject
- Trello + *plugins*. En el siguiente link hay un tutorial oficial:
<https://blog.trello.com/es/diagrama-de-gantt-de-un-proyecto>
- Creately, herramienta online colaborativa.
<https://creately.com/diagram/example/ieb3p3ml/LaTeX>
- Se puede hacer en latex con el paquete *pgfgantt*
<http://ctan.dcc.uchile.cl/graphics/pgf/contrib/pgfgantt/pgfgantt.pdf>

Pegar acá una captura de pantalla del diagrama de Gantt, cuidando que la letra sea suficientemente grande como para ser legible. Si el diagrama queda demasiado ancho, se puede pegar primero la “tabla” del Gantt y luego pegar la parte del diagrama de barras del diagrama de Gantt.

Configurar el software para que en la parte de la tabla muestre los códigos del EDT (WBS).
Configurar el software para que al lado de cada barra muestre el nombre de cada tarea.
Revisar que la fecha de finalización coincida con lo indicado en el Acta Constitutiva.

En la figura 4, se muestra un ejemplo de diagrama de gantt realizado con el paquete de *pgfgantt*. En la plantilla pueden ver el código que lo genera y usarlo de base para construir el propio.

Las fechas pueden ser calculadas utilizando alguna de las herramientas antes citadas. Sin embargo, el siguiente ejemplo fue elaborado utilizando [esta hoja de cálculo](#).

Es importante destacar que el ancho del diagrama estará dado por la longitud del texto utilizado para las tareas (Ejemplo: tarea 1, tarea 2, etcétera) y el valor x *unit*. Para mejorar la apariencia del diagrama, es necesario ajustar este valor y, quizás, acortar los nombres de las tareas.

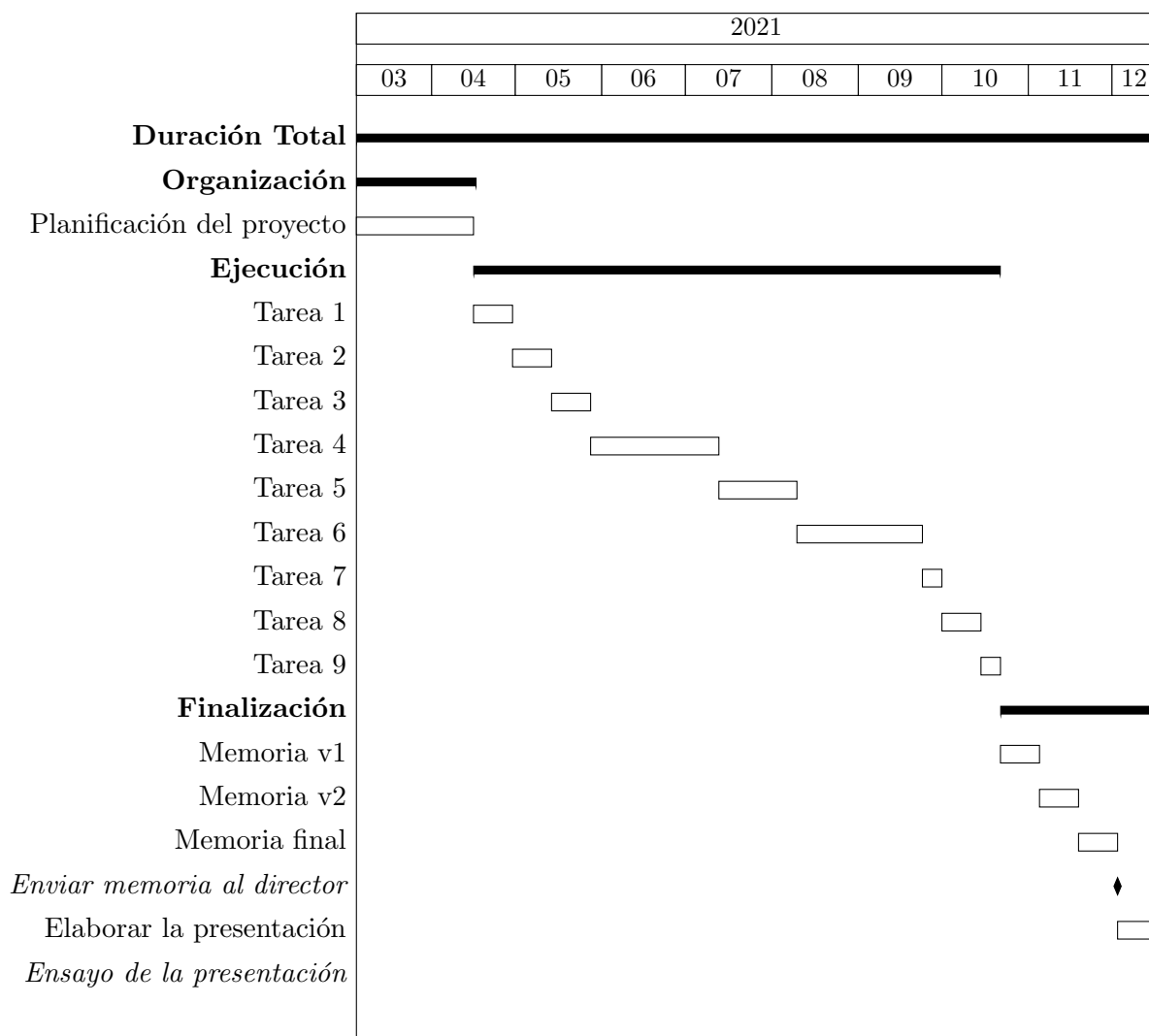


Figura 4. Diagrama de gantt de ejemplo

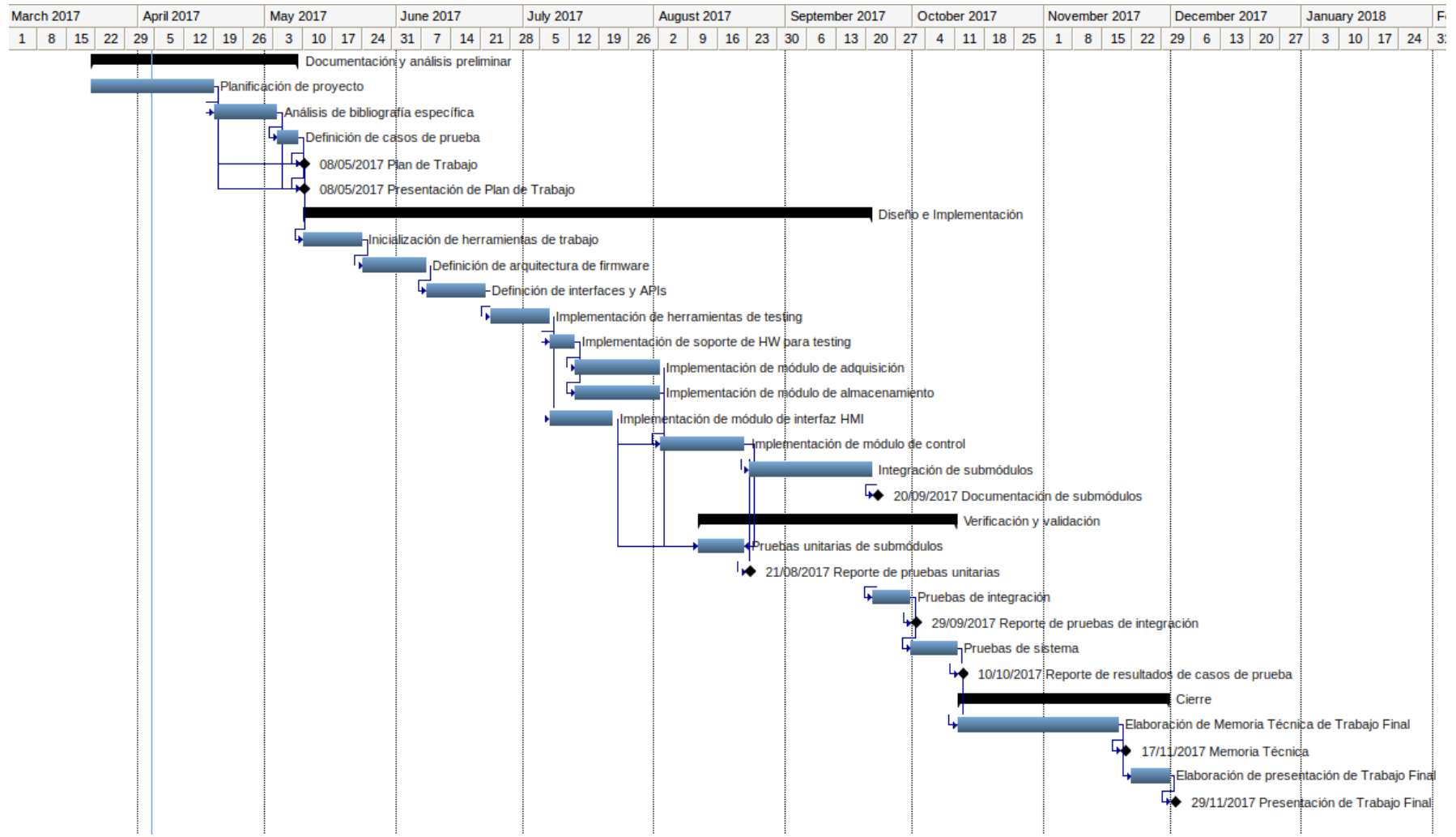


Figura 5. Ejemplo de diagrama de Gantt (apaisado).

12. Presupuesto detallado del proyecto

Si el proyecto es complejo entonces separarlo en partes:

- Un total global, indicando el subtotal acumulado por cada una de las áreas.
- El desglose detallado del subtotal de cada una de las áreas.

IMPORTANTE: No olvidarse de considerar los **COSTOS INDIRECTOS**.

Incluir la aclaración de si se emplea como moneda el peso argentino (ARS) o si se usa moneda extranjera (USD, EUR, etc). Si es en moneda extranjera se debe indicar la tasa de conversión respecto a la moneda local en una fecha dada.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
TOTAL			

13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos (al menos cinco) y estimación de sus consecuencias:

Riesgo 1: detallar el riesgo (riesgo es algo que si ocurre altera los planes previstos de forma negativa)

- Severidad (S): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S).
- Probabilidad de ocurrencia (O): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2:

- Severidad (S): X.
Justificación...

- Ocurriencia (O): Y.
Justificación...

Riesgo 3:

- Severidad (S): X.
Justificación...
- Ocurriencia (O): Y.
Justificación...

b) Tabla de gestión de riesgos: (El RPN se calcula como $RPN=S \times O$)

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*

Criterio adoptado:

Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a...

Nota: los valores marcados con (*) en la tabla corresponden luego de haber aplicado la mitigación.

c) Plan de mitigación de los riesgos que originalmente excedían el RPN máximo establecido:

Riesgo 1: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).
Nueva asignación de S y O, con su respectiva justificación:

- Severidad (S*): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S).
- Probabilidad de ocurrencia (O*): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

Riesgo 3: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

14. Gestión de la calidad

Elija al menos diez requerimientos que a su criterio sean los más importantes/críticos/que aportan más valor y para cada uno de ellos indique las acciones de verificación y validación que permitan asegurar su cumplimiento.

- Req #1: copiar acá el requerimiento con su correspondiente número.

- Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente. Detallar.
- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido. Detallar.

Tener en cuenta que en este contexto se pueden mencionar simulaciones, cálculos, revisión de hojas de datos, consulta con expertos, mediciones, etc.

Las acciones de verificación suelen considerar al entregable como “caja blanca”, es decir se conoce en profundidad su funcionamiento interno.

En cambio, las acciones de validación suelen considerar al entregable como “caja negra”, es decir, que no se conocen los detalles de su funcionamiento interno.

15. Procesos de cierre

Establecer las pautas de trabajo para realizar una reunión final de evaluación del proyecto, tal que contemple las siguientes actividades:

- Pautas de trabajo que se seguirán para analizar si se respetó el Plan de Proyecto original:
 - Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento a aplicar.
- Identificación de las técnicas y procedimientos útiles e inútiles que se emplearon, los problemas que surgieron y cómo se solucionaron:
 - Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento para dejar registro.
- Indicar quién organizará el acto de agradecimiento a todos los interesados, y en especial al equipo de trabajo y colaboradores:
 - Indicar esto y quién financiará los gastos correspondientes.