



SPCP: Sistema Probabilístico y de ML para Seguimiento y Control de Proyectos

Autor:

Lic. Osvaldo Daniel Muñoz

Director:

MBA Ing. Luis Villanueva Canales (Capgemini North Latam)

Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos entre el 26 de agosto de 2025 y el 14 de octubre de 2025.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar | 5 |
| 1.1 Introducción | 5 |
| 1.2 Motivación | 5 |
| 1.3 El cliente | 6 |
| 1.4 Situación actual (<i>as-is</i>) | 7 |
| 1.5 Preguntas centrales | 9 |
| 1.6 Estado del arte | 9 |
| 1.7 Glosario de siglas | 11 |
| 2. Identificación y análisis de los interesados | 12 |
| 3. Propósito del proyecto. | 13 |
| 4. Alcance del proyecto | 13 |
| 5. Supuestos del proyecto | 14 |
| 6. Requerimientos | 14 |
| 6.1 Funcionales | 15 |
| 6.2 De documentación | 16 |
| 6.3 De testing | 16 |
| 6.4 De interfaz de usuario | 17 |
| 6.5 De datos | 17 |
| 6.6 De despliegue/DevOps | 18 |
| 6.7 De capacitación | 18 |
| 6.8 De regulaciones y Normas | 19 |
| 7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>). | 19 |
| 7.1 Backlog inicial | 19 |
| 8. Entregables principales del proyecto. | 20 |
| 9. Desglose del trabajo en tareas EDT/WBS | 20 |
| 10. Diagrama de Activity On Node | 23 |
| 11. Diagrama de Gantt | 25 |
| 12. Presupuesto detallado del proyecto. | 27 |
| 13. Gestión de riesgos | 27 |
| 14. Gestión de la calidad | 30 |
| 15. Procesos de cierre | 32 |
| 15.1 Revisión del cumplimiento del Plan de Proyecto | 32 |
| 15.2 Lecciones aprendidas, técnicas y problemas identificados | 33 |
| 15.3 Agradecimientos y reconocimiento al equipo | 33 |

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 | 10 de septiembre de 2025 |
| 2 | Se completa hasta el punto 7 inclusive | 25 de septiembre de 2025 |
| 3 | Se completa hasta el punto 15 inclusive | 4 de octubre de 2025 |
| 4 | Versión final para aprobación | 9 de octubre de 2025 |

Acta de constitución del proyecto

CDMX, 26 de agosto de 2025

Por medio de la presente se acuerda con el Lic. Osvaldo Daniel Muñoz que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Inteligencia Artificial se titulará “SPCP: Sistema Probabilístico y de ML para Seguimiento y Control de Proyectos” y consistirá en diseñar y validar un sistema de estimación probabilística para la gestión de proyectos que, a partir de evidencias observadas en el tiempo, entregue pronósticos calibrados y accionables, buscando mejorar con modelos de ML la calibración de las predicciones, indicadores y ratios. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar estimado de 640 horas y un costo estimado de US\$ 43,080.-, con fecha de inicio el 26 de agosto de 2025 y fecha de presentación pública en el mes de Julio de 2026.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Ing. Fernando Calatayud Cataño
ITSC Digital Value

MBA Ing. Luis Villanueva Canales
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

1.1. Introducción

La compañía ITSC Digital Value ofrece servicios de (PMO) *Project Management Office* para la planificación, gestión, control y entrega de proyectos de tecnologías de la información bajo los estándares y mejores prácticas dictadas por el PMI (*Project Management Institute*), desarrolladas en su guía PMBOK (*Project Management Body Of Knowledge*).

Los lineamientos del PMI establecen el ciclo de vida de un proyecto en 5 fases, que se representan en la figura 1, y donde delimitamos el alcance de este proyecto a las fases 3 de ejecución, y 4 de monitoreo y control:

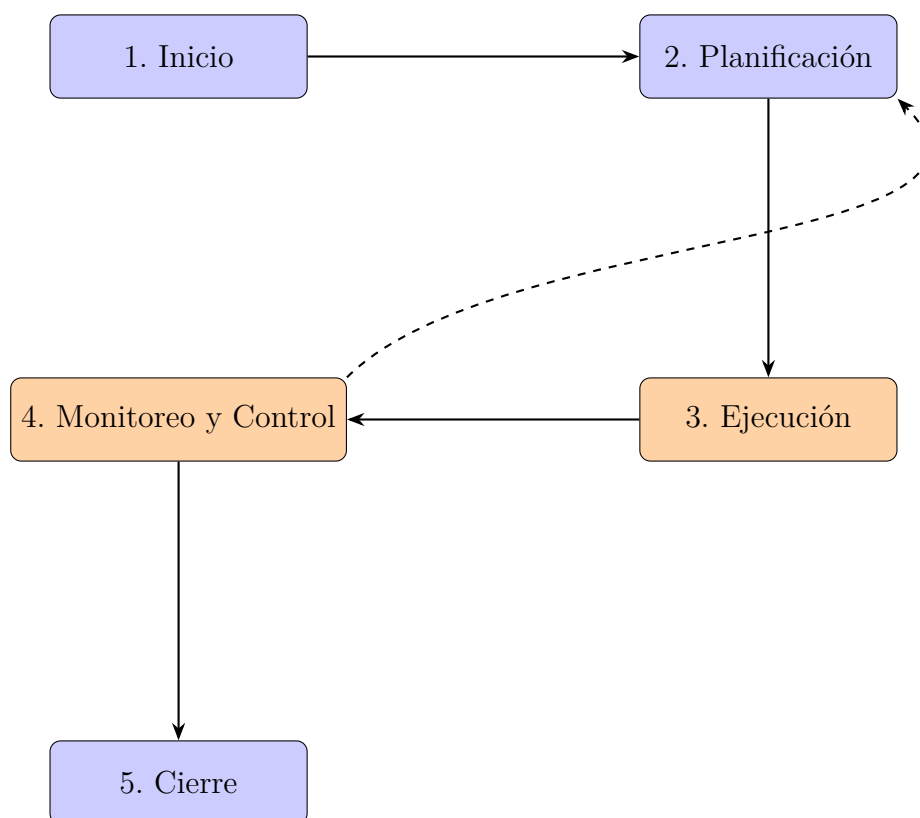


Figura 1. Ciclo de vida de un proyecto según PMI/PMBOK. Fases 3 (Ejecución) y 4 (Monitoreo y Control) como alcance del proyecto.

1.2. Motivación

En su recorrido profesional, los *projects managers* han tenido que enfrentar retos y desafíos íntimamente relacionados con la gestión, seguimiento y control de proyectos, en los que la planificación se realiza principalmente con argumentos y bases de verosimilitud razonable, pero en el despliegue surgen desfases, incumplimientos y subestimaciones, entre otros factores, que derivan en impactos como:

- Objetivos estratégicos.
- Reprogramación de entregables y sus fechas.
- Sobrecostos.
- Incumplimiento parcial o total de la relación costo/beneficio establecida.
- Credibilidad y confianza en el equipo de trabajo.
- Otras iniciativas dependientes en la organización.

En este sentido, podemos identificar que los métodos clásicos de la gestión de proyectos tienen limitaciones por el enfoque determinístico, y no proporcionan suficiente información ni predicciones asertivas para tomar decisiones oportunas que mitiguen y/o eviten los impactos en los proyectos descriptos en el párrafo anterior.

1.3. El cliente

ITSC Digital Value es una empresa mexicana fundada en el año 2013 a la que los clientes le solicitan servicios de consultoría en *project management* (PM). Su *staff* de profesionales generalmente son ingenieros certificados en las metodologías del PMI/PMBOK, y en ocasiones también en tecnologías específicas que les permiten desarrollar su labor principal como PM, así como el complemento de conocimientos específicos como telecomunicaciones o ingeniería civil para proyectos de construcción.

La misión y visión de la empresa está expresada en estos términos en la figura 2:



NUESTRA HISTORIA

ITSC se constituyó en el mes de marzo de 2013, como una sociedad civil mexicana iniciando actividades en la Ciudad de México.

Nuestro compromiso es ofrecer a nuestros clientes servicios de consultoría estratégica de negocios bajo los estándares más altos de calidad.

MISIÓN Y VISIÓN

• MISIÓN

Proveer consultoría estratégica de negocios y soluciones empresariales a nuestros clientes, brindándoles un servicio de calidad, siendo rentable y financieramente estable en beneficio de nuestros socios y colaboradores.

• VISIÓN

Ser una empresa reconocida por sus clientes como líder en consultoría estratégica de negocios, y por la calidad de los servicios brindados.

Figura 2. Misión y visión de ITSC Digital Value.

1.4. Situación actual (*as-is*)

El macro proceso clásico compuesto de 5 fases para la gestión de proyectos, según los lineamientos del PMI/PMBOK, es el que adoptan y despliegan los profesionales asignados a los contratos con los clientes, como se ve en la figura 3:

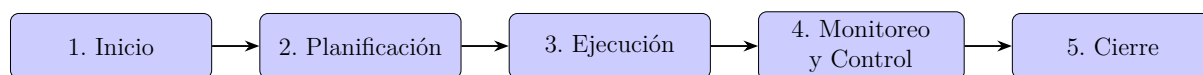


Figura 3. Macro-proceso del ciclo de vida de un proyecto (PMI/PMBOK).

Las entradas y salidas que requieren y generan cada una de las cinco fases se describen en las figuras 4 a 8 como sigue:

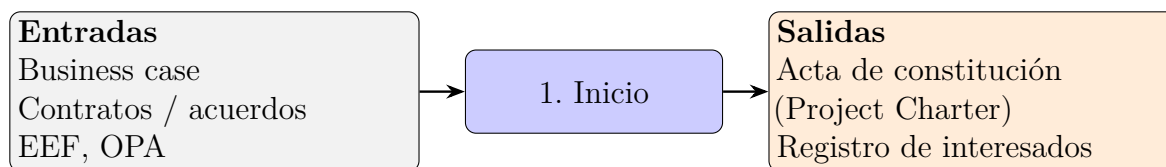


Figura 4. Fase 1: Inicio — Entradas y salidas principales.

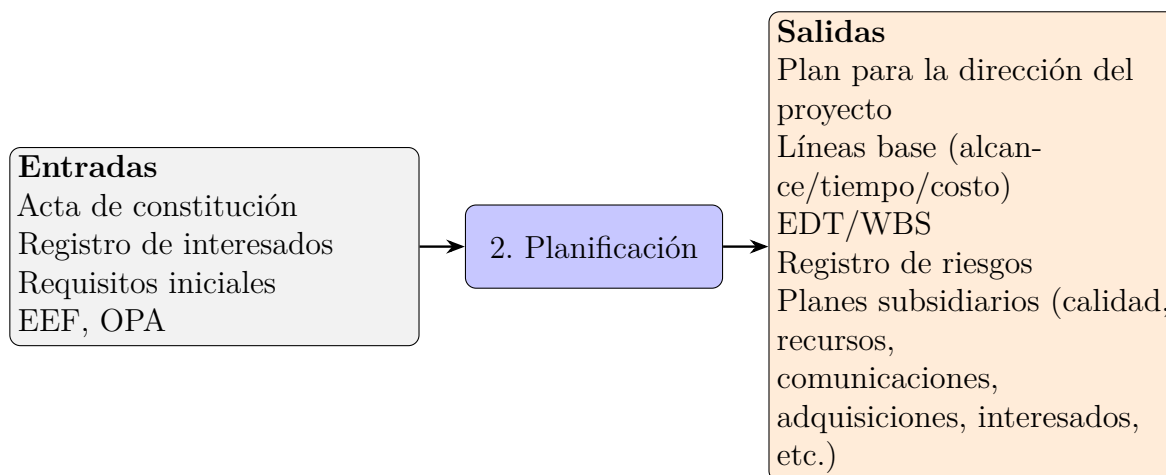


Figura 5. Fase 2: Planificación — Entradas y salidas principales.

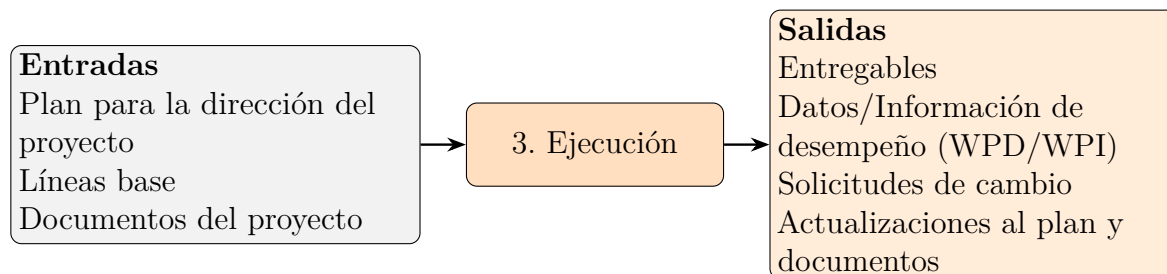


Figura 6. Fase 3: Ejecución — Entradas y salidas principales.

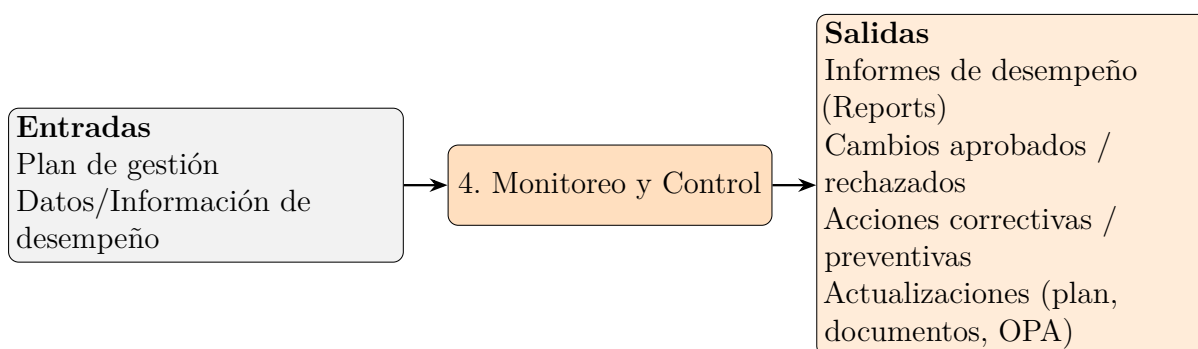


Figura 7. Fase 4: Monitoreo y Control — Entradas y salidas principales.

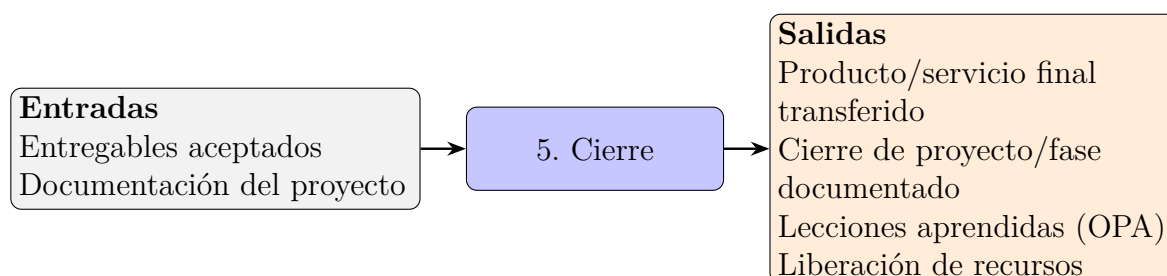


Figura 8. Fase 5: Cierre — Entradas y salidas principales.

De acuerdo a la experiencia del cliente, los proyectos se gestionan en las fases 3 (ejecución) y 4 (monitoreo y control), con un grado de incertidumbre variable, dependiendo de:

- La complejidad.
- Experiencia de los recursos asignados.
- Claridad y fluidez en la comunicación.
- Grado de compromiso hacia la producción de los entregables.
- Disponibilidad oportuna de los recursos financieros y materiales presupuestados.
- Eficiencia del modelo de gobierno.
- Habilidades y conocimientos de la oficina de gerencia del proyecto (PMO).

Debido a los grados de incertidumbre que existen en las fases 3 y 4 de la gestión de proyectos, el cliente requiere contar con un modelo que le proporcione, a partir de los datos que genera el modelo clásico, información complementaria y confiable mediante indicadores y ratios para tomar decisiones oportunas. Y de esta manera poder anticipar, mitigar y, en lo posible, evitar los desvíos e impactos en los resultados esperados del proyecto en cuanto a alcance, tiempo, costo y calidad propuestos al inicio en el *statement of work* (SOW).

1.5. Preguntas centrales

Dado el historial de un proyecto y sus artefactos:

- ¿Cuál es la probabilidad de exceder el baseline vigente en cada dimensión (tiempo, alcance, costo)?
- ¿Cómo evolucionan los indicadores de riesgos e incidentes para anticipar desvíos?
- Con modelos de *machine learning* (ML) (*boosting* cuántico; TCN/LSTM), ¿mejoran el error y la calibración de los pronósticos de $\frac{\Delta_d}{EAC}$ y $P(\text{atraso/sobrecosto})$ frente a EVM/PERT/ARIMA?

1.6. Estado del arte

Aunque los métodos estadísticos clásicos constituyen una base sólida, resultan limitados para capturar no linealidades y efectos de interacción entre variables (p. ej., SPI/CPI, cambios de alcance, riesgos, incidentes). En este contexto, los enfoques de ML tabular y secuencial permiten explotar dichas interacciones y patrones temporales, ofreciendo bandas de predicción y probabilidades mejor calibradas. Asimismo, se priorizará la interpretabilidad (SHAP, PDP) y se establecerán comparaciones rigurosas frente a los baselines estadísticos, en línea con el enfoque requerido.

La figura 9 es un esquema de bloques de la solución propuesta:

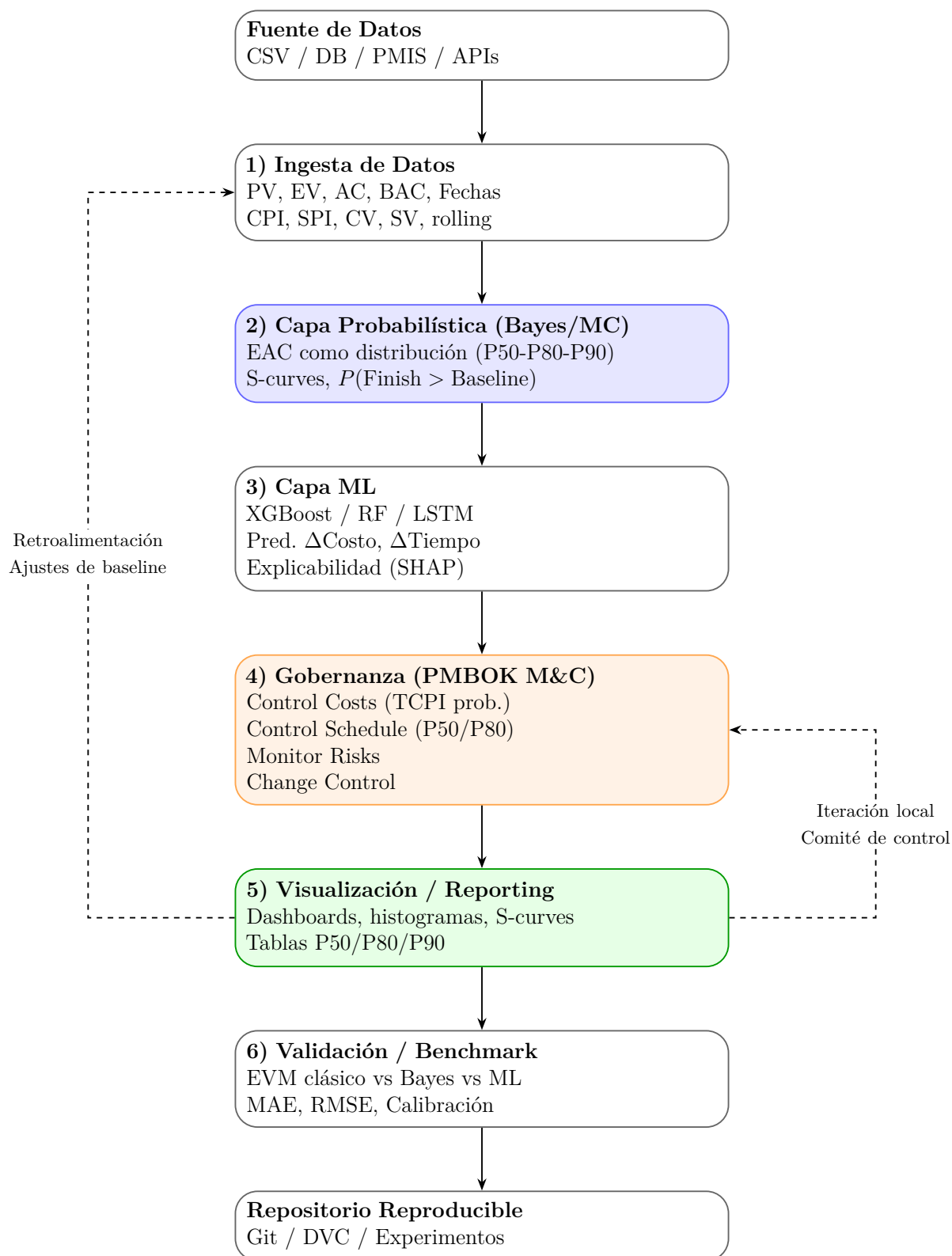


Figura 9. *To-be* - esquema vertical en bloques de la solución propuesta.

1.7. Glosario de siglas

En el contexto del proyecto se utilizan siglas y abreviaturas de uso común en la gestión de proyectos y en el ámbito de la inteligencia artificial. A continuación, se presenta una tabla con las siglas más relevantes y su significado:

Cuadro 1. Siglas utilizadas en este documento y su significado

| Sigla | Concepto / significado |
|-------------|---|
| PMI | <i>Project Management Institute.</i> |
| PMBOK | <i>Project Management Body of Knowledge.</i> |
| WBS/EDT | <i>Work Breakdown Structure</i> / Estructura de Desglose del Trabajo. |
| AoN | <i>Activity on Node</i> (Diagrama de actividades con nodos). |
| PV | <i>Planned Value</i> (Valor planificado) — valor del trabajo planificado a la fecha [\$]. |
| EV | <i>Earned Value</i> (Valor ganado) — valor del trabajo realmente completado [\$]. |
| AC | <i>Actual Cost</i> (Costo real) — costo incurrido a la fecha [\$]. |
| BAC | <i>Budget at Completion</i> (Presupuesto al completar) [\$]. |
| CPI | <i>Cost Performance Index</i> — $CPI = EV/AC$ (> 1 = eficiente). |
| SPI | <i>Schedule Performance Index</i> — $SPI = EV/PV$ (> 1 = adelantado). |
| CV | <i>Cost Variance</i> — $CV = EV - AC$ [\$]. |
| SV | <i>Schedule Variance</i> — $SV = EV - PV$ [\$]. |
| EAC | <i>Estimate at Completion</i> (Estimación al completar). |
| ETC | <i>Estimate to Complete</i> — $ETC = EAC - AC$ [\$]. |
| VAC | <i>Variance at Completion</i> — $VAC = BAC - EAC$ [\$]. |
| TCPI | <i>To-Complete Performance Index</i> (Índice de desempeño requerido). |
| PERT | Duraciones a, m, b (optimista, más probable, pesimista) para Beta-PERT. |
| P50/P80/P90 | Percentiles de costo/fecha (medidas probabilísticas). |
| RPN | <i>Risk Priority Number</i> — $RPN = S \times O$ (Severidad \times Ocurrencia). |
| ML | <i>Machine Learning.</i> |

Fórmulas e interpretación

Indicadores EVM *Earn Value Management*

$$CPI = \frac{EV}{AC} \quad (> 1 \text{ favorable, eficiencia de costo})$$

$$SPI = \frac{EV}{PV} \quad (> 1 \text{ adelantado en cronograma})$$

$$CV = EV - AC \quad (\$ \text{ positivo} = \text{ahorro, negativo} = \text{sobrecosto})$$

$$SV = EV - PV \quad (\$ \text{ positivo} = \text{adelantado, negativo} = \text{atraso})$$

Pronósticos de costo

| | |
|---|--|
| $EAC_1 = \frac{BAC}{CPI}$ | Asume que el desempeño actual de costos continúa |
| $EAC_2 = AC + (BAC - EV)$ | Asume ejecución futura al costo presupuestado |
| $EAC_{CPI.SPI} = AC + \frac{BAC - EV}{CPI \cdot SPI}$ | Si el atraso de cronograma impacta costos |
| $ETC = EAC - AC; VAC = BAC - EAC$ | Definiciones derivadas |

Índice de desempeño requerido (TCPI)

$$TCPI_{BAC} = \frac{BAC - EV}{BAC - AC} \quad (\text{para cumplir con el BAC original})$$

$$TCPI_{EAC} = \frac{EAC - EV}{EAC - AC} \quad (\text{para cumplir con un nuevo objetivo EAC})$$

Lectura: $TCPI > 1$ implica presión de costo, será necesario mejorar la eficiencia para alcanzar la meta (BAC/EAC); $TCPI < 1$ implica margen de costo, es posible cumplir, aun con una eficiencia menor a la actual.

PERT (duraciones) y Monte Carlo Para una actividad con estimaciones (a, m, b) :

$$\mu = \frac{a + 4m + b}{6}, \quad \sigma^2 = \frac{(b - a)^2}{36}.$$

Sumando actividades (suposición simple de independencia): $\mu_{\text{proy}} = \sum \mu_i$, $\sigma_{\text{proy}} = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$. En la práctica, usar *Monte Carlo* para capturar dependencias y así obtener percentiles de fecha/costo ($P50$, $P80$, $P90$).

Percentiles y S-curves Reportando costo/fecha como distribución: por ejemplo, “Costo $P50 = \$X$, $P80 = \$Y$; $P(EAC > BAC) = z\%$ ”. Esto reemplaza el número único por rangos accionables.

2. Identificación y análisis de los interesados

| Rol | Nombre y Apellido | Organización | Puesto |
|---------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Cliente | Ing. Fernando Calatayud Cataño | ITSC Digital Value | Director de Operaciones |
| Responsable | Lic. Osvaldo Daniel Muñoz | FIUBA | Alumno |
| Orientador | MBA Ing. Luis Villanueva Canales | Capgemini North Latam | Director del Trabajo Final |
| Equipo | TBD 1 TBD 2 | — | — |
| Opositores | <i>Team leaders</i> | Cliente y <i>contractors</i> | — |
| Usuario final | <i>Project Managers</i> | ITSC Digital Value | — |

- Orientador: el MBA Ing. Luis Villanueva Canales es un reconocido profesional en ciencias de la computación y electrónica y colaborará en refinar los requerimientos, así como dar las guías desde su experiencia para lograr los propósitos del proyecto.
- Cliente: el Ing. Fernando Calatayud Cataneo es exigente y detallista con vasta experiencia en entrega de servicios de consultoría. Conoce en profundidad los retos y desafíos de las disciplinas, con lo cual será riguroso en la definición de los requerimientos y en la calidad del producto final.
- Equipo: el equipo de trabajo se definirá a partir del dimensionamiento de las áreas de conocimiento que requiera el proyecto para su construcción. Es muy importante tener las definiciones para poder seleccionarlo.

3. Propósito del proyecto

Diseñar y validar un sistema de estimación probabilística que, a partir de evidencias observadas en el tiempo, entregue pronósticos calibrados y accionables, buscando mejorar con modelos de ML la calibración de las predicciones, indicadores y ratios.

4. Alcance del proyecto

El proyecto incluye:

- Formalizar las variables y artefactos (*work breakdown structure* (WBS), cronograma, costo, registros de riesgo/incidentes, cambios).
- Definir un modelo de probabilidad de desvío por dimensión (tiempo/alcance/costo) y su relación con riesgos/incidentes.
- Entrenar y validar modelos (Bayes/Monte Carlo/series de tiempo) con *backtesting*.

- Evaluar calibración y utilidad (curvas S con bandas, alertas tempranas, what-if).
- Entregar un tablero/notebooks reproducibles y una guía de uso para PMs.

El proyecto no incluye:

- Proyectos sin línea base (*baseline*) establecida, datos no estructurados, o imposible de ser normalizados.
- Integración en línea con sistemas externos.
- Estimación de recursos humanos a nivel individual (si hubiera faltante de datos).

5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se establecen las siguientes hipótesis:

- La inclusión de variables de riesgo e incidentes mejora la predicción de desvíos en plazo y costo.
- Un modelo jerárquico bayesiano por paquete de trabajo (WBS) produce estimaciones mejor calibradas que una línea de base determinista + tendencia.
- Dado que el *boosting* cuantílico aprende relaciones no lineales e interacciones (SPI, CPI, Δ_{scope} , riesgos, incidentes) y genera bandas de predicción directamente, luego entonces, mejora la cobertura ($q_{10}/q_{50}/q_{90}$) y CRPS (*Continuous Ranked Probability Score*).
- TCN/LSTM (*Temporal Convolutional Network/Long Short-Term Memory*) reduce el *Mean Absolute Error* (MAE) cuando existen dependencias temporales fuertes.

6. Requerimientos

Los requerimientos del proyecto SPCP se organizan en ocho categorías que en conjunto cubren el ciclo de vida completo del sistema, desde la ingesta y procesamiento de datos hasta su despliegue y operación continua. Cada categoría refleja un conjunto de expectativas verificables:

- Funcionales (FR): describen las capacidades esenciales del sistema (ingesta, validación, modelos probabilísticos y de ML, visualización ejecutiva y escenarios).
- Documentación (DOC): aseguran la existencia de artefactos técnicos y guías de uso que garanticen reproducibilidad, transferencia de conocimiento y trazabilidad.

- Testing (TEST): definen las validaciones necesarias para verificar exactitud, desempeño, seguridad y aceptación de usuario.
- Interfaz de usuario (UI): establecen los criterios de diseño y usabilidad para paneles, indicadores y explicabilidad de resultados.
- Datos (DATA): precisan las normas de calidad, formato, temporalidad y consistencia requeridas en los datasets.
- Despliegue/DevOps (DEV): especifican prácticas de empaquetado, orquestación, respaldos y MLOps que habilitan la operación estable del sistema.
- Capacitación (TRAIN): establecen las expectativas que se debe cumplir para considerar el entrenamiento de usuarios finales y soporte técnico para la correcta operación del sistema.
- Regulaciones y Normas (REG): establecen lineamientos de cumplimiento con estándares de calidad, seguridad, privacidad de datos y mejores prácticas internacionales.

De esta manera, los requerimientos no solo contemplan la funcionalidad analítica del SPCP, sino también la documentación, validación, interfaz, gestión de datos, operación continua y el marco regulatorio necesario, asegurando una visión integral alineada con estándares de gestión de proyectos, ingeniería de software y normativas aplicables.

6.1. Funcionales

- FR-01 Ingesta al modelo unificado (DER vigente): El sistema debe aceptar datos por CSV/APIs y normalizarlos al modelo unificado del SPCP, conforme al DER vigente (todas las entidades definidas), aplicando reglas de tipos, obligatorios y PK/FK del diccionario.
- FR-02 Validación de dataset: El sistema debe validar columnas, tipos, PK/FK e impedir acumulados decrecientes (PV/EV/AC).
- FR-03 Cálculo EVM: El sistema debe calcular CPI, SPI, CV, SV, EAC (variantes) y TCPI.
- FR-04 Monte Carlo (cronograma): El sistema debe simular con PERT (a,m,b) $\geq 10,000$ corridas; entregar finish P50/P80/P90 y $P(\text{Finish} > \text{Baseline})$.
- FR-05 Bayes (desempeño): El sistema debe actualizar una red bayesiana por corte con observables (CPI, SPI, exposición de riesgo, cambios 7d, retrabajo, demoras proveedor) y estimar $P(\text{EAC} > \text{BAC})$ y *drivers*.
- FR-06 ML baseline: El sistema debe entrenar un modelo ML (p.ej., XGBoost) para EAC a t+4 semanas y probabilidad de sobre costo $> 10\%$, con importancia/SHAP.
- FR-07 Fusión de señales y fiabilidad: El sistema debe combinar EVM + Bayes + ML mediante *ensemble* (promedio ponderado o stacking) para producir: (i) EAC final y (ii) probabilidad de sobre costo.

- FR-08 Visualización ejecutiva: El sistema debe presentar un panel de indicadores ejecutivos (KPIs de cabecera: P50/P80/P90 de EAC, $P(EAC > BAC)$, TCPI), además de curvas S, histograma de simulaciones y una tabla ejecutiva con descarga CSV/PDF.
- FR-09 Escenarios: El sistema debe permitir al usuario “*what-if*” (cambios/riesgos) y recalcular percentiles y $P(EAC > BAC)$.
- FR-10 Cortes y trazabilidad: El sistema debe emitir cortes semanales del dataset con manifiesto y huella (hash), y guardar la trazabilidad de cálculos por corte para asegurar reproducibilidad.
- FR-11 Descarga y API: El sistema debe permitir la descarga de resultados (CSV/PDF/PNG) y su consulta por API HTTP sencilla.

6.2. De documentación

- DOC-01 DER y diccionario: El ingeniero de datos debe entregar un diagrama de entidad-relación (DER) y diccionario de datos (definiciones, dominios, *Primary Key* / *Foreign Key* (PK/FK)).
- DOC-02 Mapeo de fuentes: El ingeniero de datos debe documentar una matriz Origen→modelo unificado por campo (PMIS/ERP/Jira/HR).
- DOC-03 Manual de usuario: El PM debe integrar en un documento el flujo de carga, validación, ejecución, dashboards y exportaciones con capturas.
- DOC-04 Manual de operación: El PM debe integrar en un documento los Jobs, *seeds*, variables, backups, rotación de contraseñas, monitoreo.
- DOC-05 Ficha del modelo y de la red bayesiana: El PM debe integrar en un documento los datos, métricas, deriva de datos, límites de uso y política de reentrenamiento; incluir en la ficha de la BN los nodos, observables y supuestos.
- DOC-06 Plan de pruebas: El PM debe integrar en un documento los casos de prueba para todos los requerimientos aplicables (funcionales, interfaz de usuario, integración, no funcionales, etc.), con criterios de aceptación y trazabilidad.

6.3. De testing

- TEST-01 Pruebas unitarias de ETL: El ingeniero de datos debe asegurar la cobertura $\geq 80\%$ en los módulos de lectura y normalización de datos (parsers/normalizadores).
- TEST-02 Contrato de datos: El usuario debe validar el esquema durante la integración continua (CI); el proceso de build debe fallar ante cambios incompatibles.
- TEST-03 Validación de la red bayesiana (BN): El usuario debe asegurar pruebas de posterior predictivo y análisis de sensibilidad de nodos para verificar la robustez de la BN.

- TEST-04 Modelo Monte Carlo: El usuario debe asegurar ejecuciones reproducibles (uso de semilla y validación de tolerancias en percentiles).
- TEST-05 Validación de modelos de ML: El usuario debe asegurar la validación cruzada *k-fold* con reporte de MAE/RMSE y verificación de curva de calibración aceptable.
- TEST-06 Backtesting: El usuario debe asegurar la validación *rolling-origin* vs. cortes históricos para EAC/fechas (MAE/RMSE y calibración).
- TEST-07 Integración con APIs: En caso que aplique, el usuario debe asegurar las pruebas con simulación controlada para Jira/PMIS/ERP, incluyendo casos de borde (valores nulos y duplicados).
- TEST-08 Desempeño del panel: El usuario debe probar y validar que el dashboard inicial debe cargar en ≤ 5 segundos (p95) como meta ideal, y ≤ 10 segundos (p95) como meta mínima aceptable, para 12 meses de datos y 5,000 actividades.
- TEST-09 Seguridad: El soporte técnico del sistema debe comprobar el escaneo de dependencias y contraseñas, con verificación de controles básicos de acceso (RBAC)
- TEST-10 Pruebas de aceptación de usuario (UAT): El usuario debe ejecutar al menos 10 escenarios de negocio validados y firmados por el cliente.

6.4. De interfaz de usuario

- UI-01 Diseño web adaptable: El usuario debe validar la visualización correcta en pantallas desde 1366×768 en adelante; versión móvil de solo lectura.
- UI-02 Indicadores claros (KPI): El usuario debe validar que las tarjetas con EAC P50/P80/P90, $P(\text{EAC} > \text{BAC})$, TCPI con leyenda.
- UI-03 Gráficos principales: El usuario debe validar las S-curves, el histograma de simulaciones, las tendencias CPI/SPI y la *waterfall* de EAC.
- UI-04 Navegación y trazabilidad: El usuario debe validar el flujo de exploración: Entregable → Actividades → Riesgos/Cambios vinculados.
- UI-05 Explicabilidad combinada: El usuario debe validar que el panel de SHAP/feature importance (ML) y sensibilidad bayesiana (efecto de observables en posteriors), estén acompañados de texto breve.
- UI-06 Exportación: El usuario debe validar que la exportación de vistas clave en CSV, PDF y PNG sea con un solo clic.

6.5. De datos

- DATA-01 Modelo unificado (DER vigente): El ingeniero de datos debe asegurar que se usen únicamente las columnas definidas en el esquema oficial; no se permiten campos extra *ad-hoc*.

DATA-02 Formato de fechas: El ingeniero de datos debe asegurar que todas las fechas estén en formato YYYY-MM-DD y que el *status_date semanal* sea consistente.

DATA-03 Identificadores (IDs): El ingeniero de datos debe asegurar que sean únicos, estables, sin espacios; y sin reciclar IDs.

DATA-04 Calidad de datos: El ingeniero de datos debe asegurar que los valores faltantes deben estar explícitos (no NaN); los acumulados no pueden decrecer; y que la moneda sea consistente dentro de cada proyecto.

DATA-05 Temporalidad: El ingeniero de datos debe asegurar que se separen *train/val/test* por tiempo (sin datos futuros); y que se utilizan solo datos hasta cada fecha de corte.

6.6. De despliegue/DevOps

DEV-01 Empaquetado: El desarrollador debe asegurar la implementación en Docker, usando variables de entorno para rutas y credenciales.

DEV-02 Datos de ejemplo (seeds): El ingeniero de datos debe asegurar que haya un *Dataset* demo reproducible para pruebas y aceptación de usuario (UAT).

DEV-03 Jobs automáticos: El desarrollador debe asegurar la orquestación del corte semanal y generación de reportes/exportables.

DEV-04 Copias de respaldo (backups): El técnico de soporte debe asegurar la retención de snapshots y outputs durante al menos 6 meses, con verificación periódica de restauración.

DEV-05 Operaciones de ML (MLOps): el usuario debe validar el registro de modelos, versionado de artefactos (modelo, features, semillas) y política de reentrenamiento.

6.7. De capacitación

TRAIN-01 Capacitación de usuarios finales: El PM debe planificar y monitorear el entrenamiento práctico para usuarios del panel ejecutivo, incluyendo navegación, interpretación de KPIs, simulaciones *what-if* y exportaciones.

TRAIN-02 Capacitación de equipo de soporte y operación: El PM debe planificar y monitorear que se entrene al equipo técnico en operación de contenedores, orquestación, backups, seguridad y monitoreo.

TRAIN-03 Capacitación operativa basada en manuales: El PM debe planificar y monitorear las sesiones prácticas utilizando el Manual de Operación (DOC-03) y el Manual de Usuario (DOC-04) como insumos.

TRAIN-04 Material de autoformación y soporte continuo: El PM debe validar que se generen los recursos de autoestudio (videos cortos, FAQs, *cheatsheets*) accesibles desde el sistema.

6.8. De regulaciones y Normas

REG-01 Cumplimiento de privacidad de datos: El responsable de *compliance* debe garantizar que los *datasets* utilizados no contengan información personal identificable (PII), en línea con GDPR y normativas locales de protección de datos.

REG-02 Estándares de seguridad: El responsable de *compliance* debe garantizar que se apliquen buenas prácticas recomendadas por OWASP y NIST para asegurar integridad y confidencialidad de la información procesada.

REG-03 Normas de gestión de proyectos: El responsable de *compliance* debe asegurar la trazabilidad y documentación conforme a estándares PMI/PMBOK para auditorías o revisiones externas.

REG-04 Reproducibilidad y calidad: El responsable de *compliance* debe asegurar que se mantiene el versionado y la trazabilidad de *datasets*, modelos y reportes, en línea con principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*).

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

La estimación de cada historia se basa en complejidad, dificultad e incertidumbre. Si la suma excede el máximo usual (20), se revisan las ponderaciones, especialmente la incertidumbre, ajustándolas a la realidad del SPCP donde los datos y modelos ya están definidos. De esta forma se evita incrementar artificialmente las estimaciones y se mantiene la coherencia con la escala de Fibonacci modificada.

7.1. Backlog inicial

1. Como jefe de PMs (cliente interno) quiero comparar el desempeño de todos mis proyectos en un panel consolidado para identificar rápidamente cuáles necesitan intervención.
Story points: 20 (complejidad 6, dificultad 6, incertidumbre 5)
2. Como analista de riesgos quiero ejecutar escenarios *what-if* modificando riesgos o duraciones críticas para ver cómo cambia la probabilidad de sobrecosto.
Story points: 13 (complejidad 5, dificultad 4, incertidumbre 4)
3. Como usuario ejecutivo quiero descargar en un clic un reporte en PDF con la tabla de indicadores clave para llevarlo al comité de control.
Story points: 8 (complejidad 3, dificultad 2, incertidumbre 3)
4. Como administrador del sistema quiero tener cortes semanales versionados con **manifest + hash** para asegurar trazabilidad y reproducibilidad de resultados.
Story points: 8 (complejidad 3, dificultad 3, incertidumbre 2)

5. Como PM quiero ver un panel con P50/P80/P90 de EAC y $P(EAC > BAC)$ para monitorear rápidamente la proyección de costos de mi proyecto.

Story points: 5 (complejidad 2, dificultad 2, incertidumbre 1)

6. Como usuario externo al sistema quiero consultar un servicio sencillo que me entregue percentiles y alertas para integrar los resultados del SPCP en otras aplicaciones.

Story points: 5 (complejidad 2, dificultad 2, incertidumbre 1)

8. Entregables principales del proyecto

Los entregables constituyen los productos concretos generados por el proyecto SPCP, necesarios para su implementación, uso y validación académica. Incluyen tanto artefactos técnicos (código, modelos, datasets) como documentación de soporte para asegurar la reproducibilidad y transferencia del conocimiento.

- Diagrama del proceso (*pipeline*): representación gráfica de las etapas del SPCP, desde la ingesta de datos hasta la generación de reportes y alertas.
- Diseño funcional: documentación del flujo de procesos y modelos, definición de la estructura de datos (DER) y especificación de la lógica de cálculo de cada modelo probabilístico y de *machine learning*.
- Código fuente: repositorio con scripts y notebooks en Python, que implementan los modelos probabilísticos (Monte Carlo, Bayesian Networks) y de *machine learning*.
- Datasets de prueba: conjunto de datos anonimizados utilizados para validar el sistema y demostrar su aplicabilidad en diferentes escenarios de proyecto.
- Manual de usuario: guía práctica para jefes de proyecto y analistas de riesgo sobre el uso del sistema, paneles y visualizaciones.
- Manual técnico: documentación para desarrolladores que describe la arquitectura, dependencias, configuración del entorno y procedimientos de despliegue.
- Reportes ejecutivos: ejemplos de salidas en formato CSV, PDF y PNG (S-curves, histogramas de simulación, tablas ejecutivas).
- Memoria del trabajo final: documento académico completo que detalla el desarrollo, fundamentos teóricos, resultados y conclusiones del proyecto.

9. Desglose del trabajo en tareas EDT/WBS

El trabajo del proyecto se organiza en cinco fases principales que reflejan el ciclo de vida de desarrollo y puesta en marcha del SPCP. Cada fase agrupa paquetes de trabajo derivadas de los requerimientos definidos en la sección 6, así como los entregables asociados a cada paquete de trabajo.

1. Preparación inicial (54 h)

- 1.1. Planificación detallada de la fase y asignación de recursos (4 h). Entregable: plan detallado de la fase.
- 1.2. Revisión de objetivos y alcance (15 h). Entregable: acta de alcance preliminar.
- 1.3. Preparación de entorno de desarrollo y control de versiones (15 h). Entregable: repositorio inicial con estructura y configuración (Docker/Poetry).
- 1.4. Planificación de pruebas y criterios de aceptación (20 h). Entregable: plan de pruebas preliminar (DOC-06).
- 1.5. *Quality Gate* cierre de fase 1 Preparación (Hito, 0 h). Entregable: Revisión y aceptación formal de la fase. Condición necesaria para iniciar la siguiente.

2. Diseño (124 h)

- 2.1. Planificación detallada de la fase y asignación de recursos (4 h). Entregable: plan detallado de la fase.
- 2.2. Modelo de datos unificado: DER, diccionario y mapeo de fuentes (40 h). Entregables: DER vigente y diccionario de datos, matriz de mapeo de fuentes (DOC-01, DOC-02, DATA-01).
- 2.3. Diseño funcional: procesos, lógica de cálculo y ensamble de modelos (40 h). Entregable: documento de diseño funcional (FR-02 a FR-07).
- 2.4. Prototipo de panel ejecutivo y definición de KPIs (40 h). Entregable: mockups del dashboard con indicadores clave (UI-01, UI-02).
- 2.5. *Quality Gate* cierre de fase 2 Diseño (Hito, 0 h). Entregable: Revisión y aceptación formal de la fase. Condición necesaria para iniciar la siguiente.

3. Construcción y pruebas (274 h)

- 3.1. Planificación detallada de la fase y asignación de recursos (4 h). Entregable: plan detallado de la fase.
- 3.2. Ingesta y validación de datos (ETL, contrato de datos) (25 h). Entregables: pipeline de carga y normalización de datos con validaciones automáticas; contrato de datos en CI. (FR-01, FR-02, DATA-01 a DATA-05, TEST-02).
- 3.3. Implementación de métricas EVM (25 h). Entregable: módulo de cálculo EVM (FR-03).
- 3.4. Simulación Monte Carlo (30 h). Entregables: módulo de simulación y reporte de percentiles (FR-04, TEST-04).
- 3.5. Red bayesiana de desempeño (30 h). Entregables: red bayesiana implementada y ficha de modelo (FR-05, DOC-05).
- 3.6. Modelos de ML y calibración (40 h). Entregables: modelos entrenados, MAE/RMSE y curva de calibración (FR-06, TEST-05, TEST-06).
- 3.7. Ensamble de señales (30 h). Entregable: componente de fusión EVM+Bayes+ML (FR-07).
- 3.8. Dashboard: curvas S, histogramas, navegación y explicabilidad (35 h). Entregables: panel interactivo y módulo de explicabilidad (FR-08, UI-03, UI-04, UI-05).

- 3.9. Escenarios *what-if* (25 h). Entregable: módulo de escenarios con recálculo de percentiles y probabilidades (FR-09).
- 3.10. Exportaciones y API (30 h). Entregables: vistas exportables CSV/PDF/PNG y endpoints HTTP (UI-06, FR-11, TEST-07).
- 3.11. *Quality Gate* cierre de fase 3 Construcción y pruebas (Hito, 0 h). Entregable: Revisión y aceptación formal de la fase. Condición necesaria para iniciar la siguiente.
- 4. Preparación final (114 h)
 - 4.1. Planificación detallada de la fase y asignación de recursos (4 h). Entregable: plan detallado de la fase.
 - 4.2. Documentación: manual de usuario y operación (25 h). Entregables: manual de usuario (DOC-03, TRAIN-01) y manual de operación (DOC-04, TRAIN-03).
 - 4.3. Ficha de modelos y BN (15 h). Entregable: documento técnico de modelos y BN (DOC-05).
 - 4.4. Dataset demo reproducible (15 h). Entregable: dataset de ejemplo para pruebas/UAT (DEV-02).
 - 4.5. Cortes, manifiesto y trazabilidad de cálculos (15 h). Entregables: snapshots semanales con manifiesto/huella y trazabilidad (FR-10).
 - 4.6. Capacitación y entrenamiento (15 h). Entregables: informe de capacitación con registro de asistencia y material de formación (presentaciones y guías rápidas). (TRAIN-01, TRAIN-02).
 - 4.7. Validaciones finales: backtesting, UAT y performance del panel (25 h). Entregables: reportes de validación/aceptación (TEST-06, TEST-08, TEST-10).
 - 4.8. *Quality Gate* cierre de fase 4 Preparación final (Hito, 0 h). Entregable: Revisión y aceptación formal de la fase. Condición necesaria para iniciar la siguiente.
- 5. Salida en vivo y soporte (74 h)
 - 5.1. Planificación detallada de la fase y asignación de recursos (4 h). Entregable: plan detallado de la fase.
 - 5.2. Despliegue en contenedores y orquestación (25 h). Entregables: imágenes y jobs automáticos de corte semanal (DEV-01, DEV-03).
 - 5.3. Copias de respaldo y restauración (15 h). Entregable: política de backups con verificación de restauración (DEV-04).
 - 5.4. Cumplimiento normativo y seguridad (15 h). Entregables: checklist de cumplimiento y reporte de pruebas de seguridad (REG-01 a REG-04, TEST-09).
 - 5.5. Soporte inicial y ajustes post-salida (15 h). Entregables: informe de soporte inicial y registro de incidencias (TRAIN-04)
 - 5.6. *Quality Gate* cierre de Proyecto SPCP (Hito, 0 h). Entregable: Revisión y aceptación formal del proyecto por parte del cliente. Condición necesaria para cerrar el proyecto.

Cantidad total de horas: 640 h

Nota: Al esfuerzo estimado inicial de 510 h se aplica un margen de seguridad del 25 %, considerando la complejidad técnica y los riesgos de validación y despliegue.

10. Diagrama de Activity On Node

El diagrama de *Activity on Node* (AoN) representa la secuencia lógica de las fases del proyecto, con una duración estimada total de 24 semanas. El camino crítico es lineal, ya que cada fase depende de la finalización y aprobación de la precedente mediante un *quality gate* (QG). De este modo, los QG actúan como hitos de control que aseguran el cumplimiento y aprobación formal de entregables antes de avanzar a la siguiente fase, incluyendo el QG de cierre, que constituye la instancia formal de conclusión del proyecto. Este AoN constituye una planificación de alto nivel, sobre la cual se construirá en la siguiente sección el cronograma detallado en formato de diagrama de Gantt.

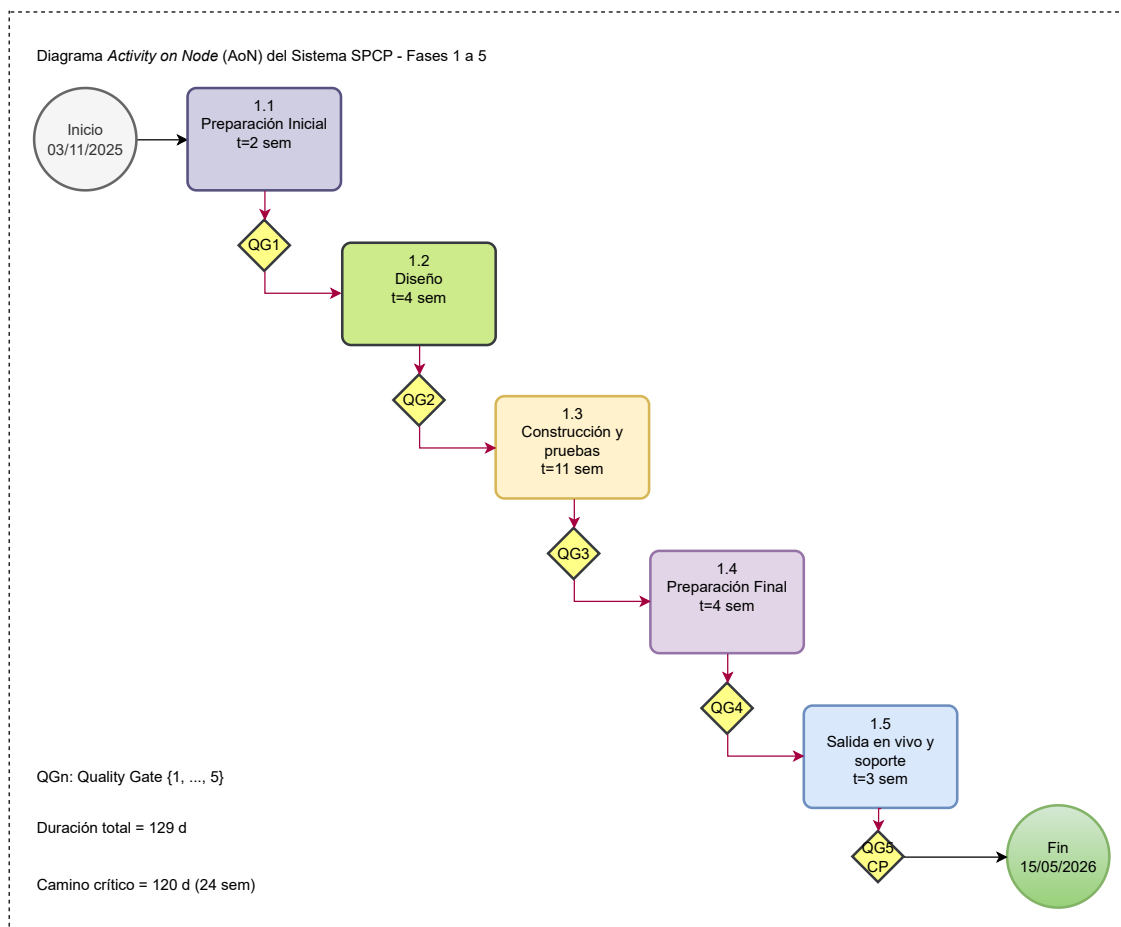


Figura 10. Diagrama *Activity on Node* (AoN) del sistema SPCP.

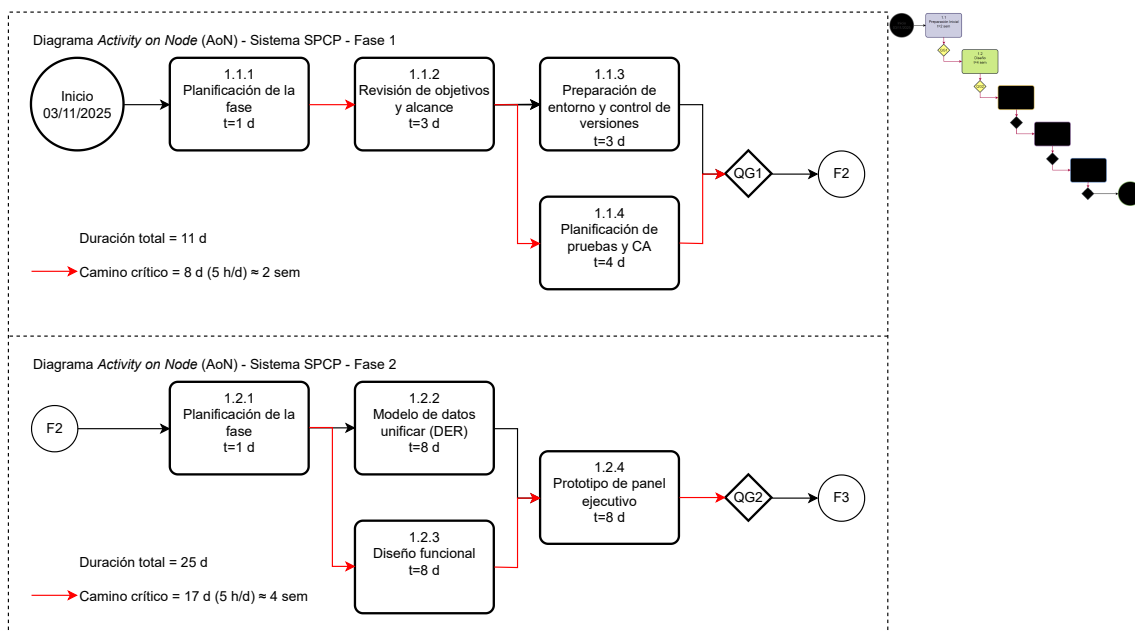


Figura 11. Diagrama *Activity on Node* (AoN) Fases 1 y 2 del sistema SPCP.

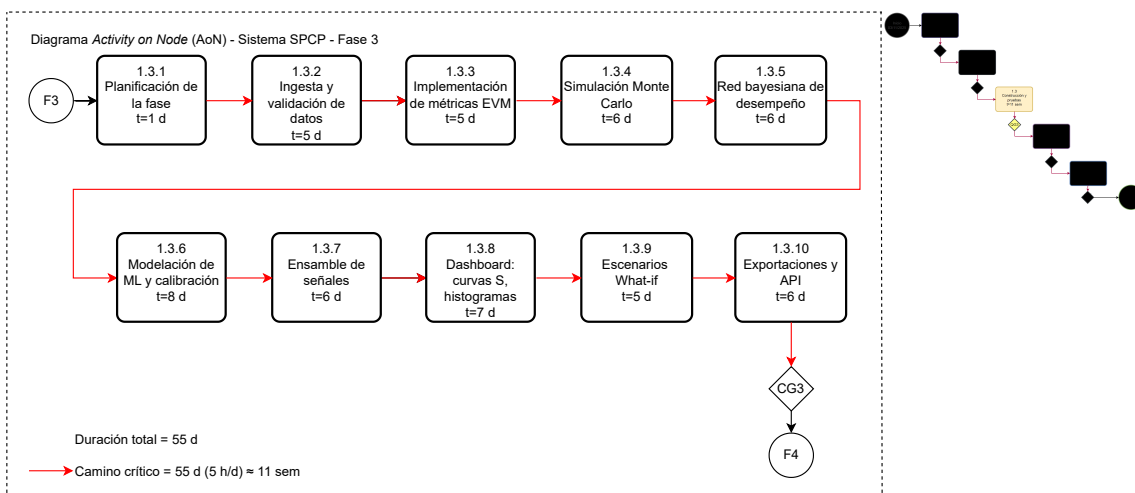


Figura 12. Diagrama *Activity on Node* (AoN) Fase 3 del sistema SPCP.

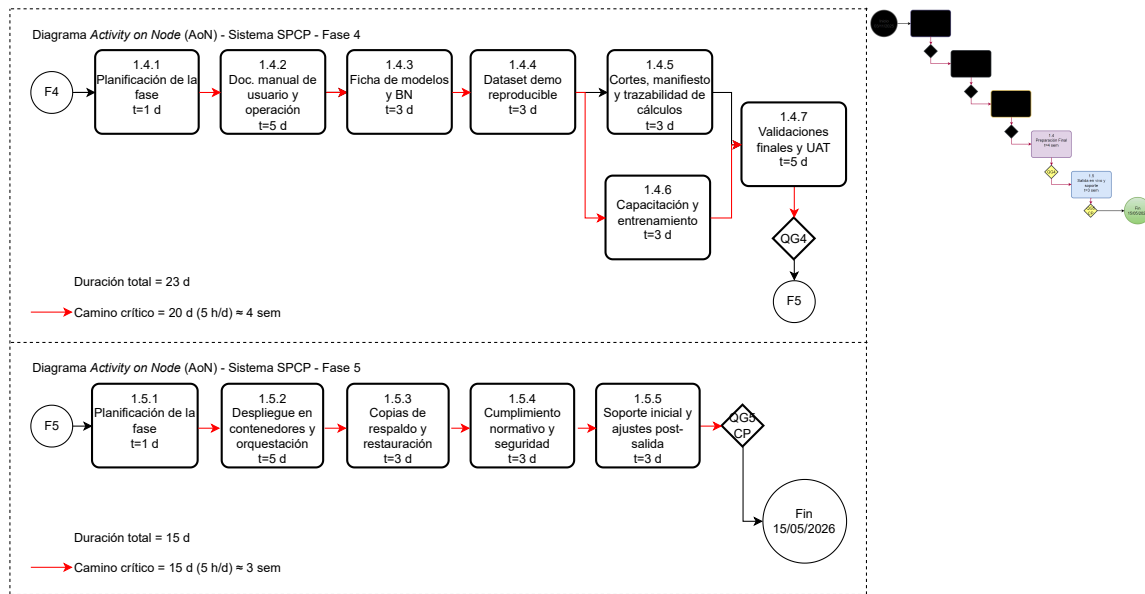


Figura 13. Diagrama *Activity on Node* (AoN) Fases 4 y 5 del sistema SPCP.

11. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt constituye la representación temporal detallada del proyecto, derivada de la red AoN previamente definida. Mientras que el AoN refleja la lógica de precedencias y el camino crítico entre fases, el Gantt permite asignar duraciones específicas, visualizar la distribución semanal de las actividades y verificar el cumplimiento de hitos. En este caso, el cronograma total previsto es de 24 semanas, con fases secuenciales y *quality gates* que actúan como puntos de control obligatorios para avanzar. De esta manera, el Gantt se convierte en la herramienta principal de seguimiento y comunicación del avance del SPCP.

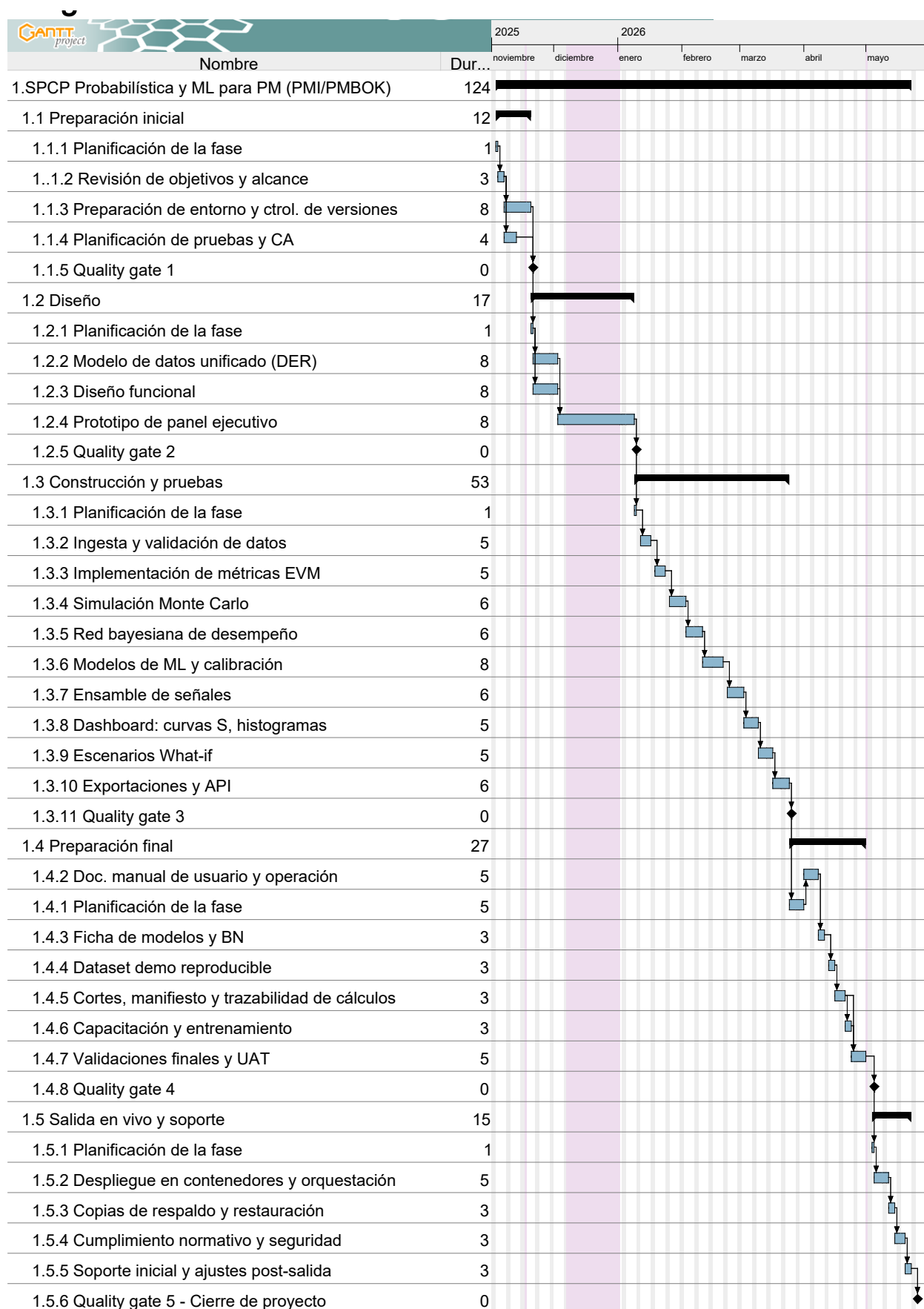


Figura 14. Cronograma del proyecto representado en diagrama de Gantt.

12. Presupuesto detallado del proyecto

En la presente sección se detalla el presupuesto del proyecto, discriminado en costos directos e indirectos. Los costos directos corresponden al esfuerzo de los perfiles técnicos y de gestión asignados a los paquetes de trabajo definidos en la EDT, expresados en días de dedicación y valor unitario en dólares estadounidenses. Los costos indirectos incluyen aquellos asociados a infraestructura, licencias, soporte administrativo y capacitación, necesarios para garantizar la correcta ejecución del proyecto pero no imputables directamente a un entregable específico.

De esta forma, se presenta a continuación una tabla resumen con la estructura de desglose de costos, indicando cantidades, valores unitarios y subtotales, seguida del total general del proyecto.

Cuadro 2. Desglose de costos del proyecto.

| COSTOS DIRECTOS | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Descripción | Cantidad (días) | Valor unitario [USD] | Valor total [USD] |
| Data Scientist | 59 | 200 | 11,800 |
| PM | 31 | 300 | 9,300 |
| QA Tester | 25 | 160 | 4,000 |
| DevOps/MLOps | 23 | 200 | 4,600 |
| Frontend/UI | 21 | 160 | 3,360 |
| Data Engineer | 19 | 160 | 3,040 |
| Compliance | 3 | 160 | 480 |
| Subtotal directos | | | US\$36,580 |
| COSTOS INDIRECTOS | | | |
| Descripción | Cantidad | Valor unitario [USD] | Valor total [USD] |
| Infraestructura y licencias | 1 | 3,000 | 3,000 |
| Soporte administrativo | 1 | 2,000 | 2,000 |
| Capacitación y entrenamiento | 1 | 1,500 | 1,500 |
| Subtotal indirectos | | | US\$6,500 |
| TOTAL PROYECTO | | | US\$43,080 |

El valor estimado total del proyecto en moneda local de Argentina (ARS) al 04/10/2025 a TC 1,415.50 ARS/USD es de ARS 60,979,740.00.

13. Gestión de riesgos

En esta sección se identifican y analizan los principales riesgos asociados al desarrollo e implementación del sistema SPCP. Cada riesgo fue evaluado en función de su Severidad (S) y probabilidad de Ocurrencia (O) en una escala de 1 a 10, obteniéndose el Número de Prioridad de Riesgo ($RPN = S \times O$), que permite establecer un orden de criticidad.

Se considera un RPN máximo aceptable de 40, por encima del cual se implementarán planes de mitigación específicos para reducir la severidad o probabilidad de ocurrencia.

Cuadro 3. Matriz de riesgos del proyecto (evaluación inicial).

| ID | Riesgo | S | O | RPN | Prioridad | Acciones de mitigación |
|-----|--|---|---|-----|-----------|--|
| R1 | Inconsistencia o baja calidad de datos. | 8 | 7 | 56 | 1 | Definir validaciones automáticas (PK/FK, tipos, acumulados), monitoreo de calidad y alertas tempranas. |
| R3 | Desactualización o pérdida de calibración del modelo. | 8 | 6 | 48 | 2 | Monitoreo de deriva, umbrales de recalibración y política de reentrenamiento documentada. |
| R2 | Fallas en integración ETL/API. | 7 | 6 | 42 | 3 | Implementar versionado de esquemas, control de errores y pruebas automáticas en CI/CD. |
| R5 | Retrasos en validación o aprobación de Quality Gates. | 7 | 6 | 42 | 4 | Planificar QG con anticipación, identificar autorizador alternativo y checklist de aceptación previa. |
| R10 | Interpretación errónea de probabilidades y percentiles. | 7 | 6 | 42 | 5 | Entrenamiento a PMs en lectura de percentiles, leyendas claras en dashboard y ejemplos guiados. |
| R8 | Fallas de versionado o trazabilidad de artefactos. | 8 | 5 | 40 | 6 | Uso obligatorio de control de versiones (Git), manifiesto + hash en cada corte semanal. |
| R7 | Incumplimiento normativo o exposición de datos sensibles. | 9 | 4 | 36 | 7 | Cumplimiento ISO 27001 / GDPR, datos anónimos en datasets y auditorías de seguridad. |
| R9 | Baja adopción del sistema por usuarios finales. | 6 | 6 | 36 | 8 | Pruebas rigurosas, talleres de uso, documentación amigable e incorporación de feedback temprano. |
| R6 | Subestimación del esfuerzo técnico. | 7 | 5 | 35 | 9 | Incluir margen de seguridad del 25 %, revisión de estimaciones en comité técnico. |
| R4 | Performance insuficiente del sistema (Monte Carlo, paneles). | 6 | 5 | 30 | 10 | Optimizar código, paralelización, uso de caché y pruebas de carga. |

En la siguiente lista se justifican las asignaciones de Severidad (S) y Ocurrencia (O) para los cinco riesgos identificados como críticos (RPN>40):

- R1 - Inconsistencia o baja calidad de datos: S=8 por su impacto directo en la confiabilidad de los indicadores y simulaciones; O=7 por la heterogeneidad y carga manual de las fuentes.
- R3 - Desactualización o pérdida de calibración del modelo: S=8 por afectar la validez de las predicciones; O=6 por la naturaleza cambiante de los datos semanales.
- R2 - Fallas en integración ETL/API: S=7 porque interrumpe el flujo de datos hacia los modelos; O=6 por cambios frecuentes en APIs externas.
- R5 - Retrasos en validación o aprobación de Quality Gates: S=7 por bloquear el avance entre fases del camino crítico; O=6 por la disponibilidad limitada de revisores, aprobadores.
- R10 - Interpretación errónea de probabilidades y percentiles: S=7 por su impacto en la toma de decisiones; O=6 por la complejidad estadística de los resultados.
- R8 - Fallas de versionado o trazabilidad: S=8 por comprometer la reproducibilidad de los resultados; O=5 por posibles errores de configuración o procedimientos manuales.

A los valores de S, O y RPN, se los pondera bajo el supuesto de aplicar las acciones de mitigación establecidas, para reflejar el nivel de riesgo residual resultante (S*, O* y

RPN*), donde las acciones de mitigación preventivas reducen el impacto (O), mientras que las mitigantes o de contingencia la severidad (S).

En la siguiente tabla se establecen los valores ponderados para los riesgos con RPN>40:

Cuadro 4. Matriz de riesgos del proyecto (S*, O* y RPN*).

| ID | Riesgo | SxO=RPN | Prioridad | Acciones de mitigación | S* | O* | RPN* |
|-----|---|---------|-----------|--|----|----|------|
| R1 | Inconsistencia o baja calidad de datos. | 8x7=56 | 1 | Definir validaciones automáticas (PK/FK, tipos, acumulados), monitoreo de calidad y alertas tempranas. | 5 | 6 | 30 |
| R3 | Desactualización o pérdida de calibración del modelo. | 8x6=48 | 2 | Monitoreo de deriva, umbrales de recalibración y política de reentrenamiento documentada. | 6 | 6 | 36 |
| R2 | Fallas en integración ETL/API. | 7x6=42 | 3 | Implementar versionado de esquemas, control de errores y pruebas automáticas en CI/CD. | 4 | 6 | 24 |
| R5 | Retrasos en validación o aprobación de Quality Gates. | 7x6=42 | 4 | Planificar QG con anticipación, identificar autorizador alternativo y checklist de aceptación previa. | 5 | 5 | 25 |
| R10 | Interpretación errónea de probabilidades y percentiles. | 7x6=42 | 5 | Entrenamiento a PMs en lectura de percentiles, leyendas claras en dashboard y ejemplos guiados. | 5 | 6 | 30 |

Se representa la matriz de riesgos en un *heatmap*, donde se visualizan las combinaciones de Severidad y Ocurrencia, y se destaca en rojo los que requieren atención prioritaria.

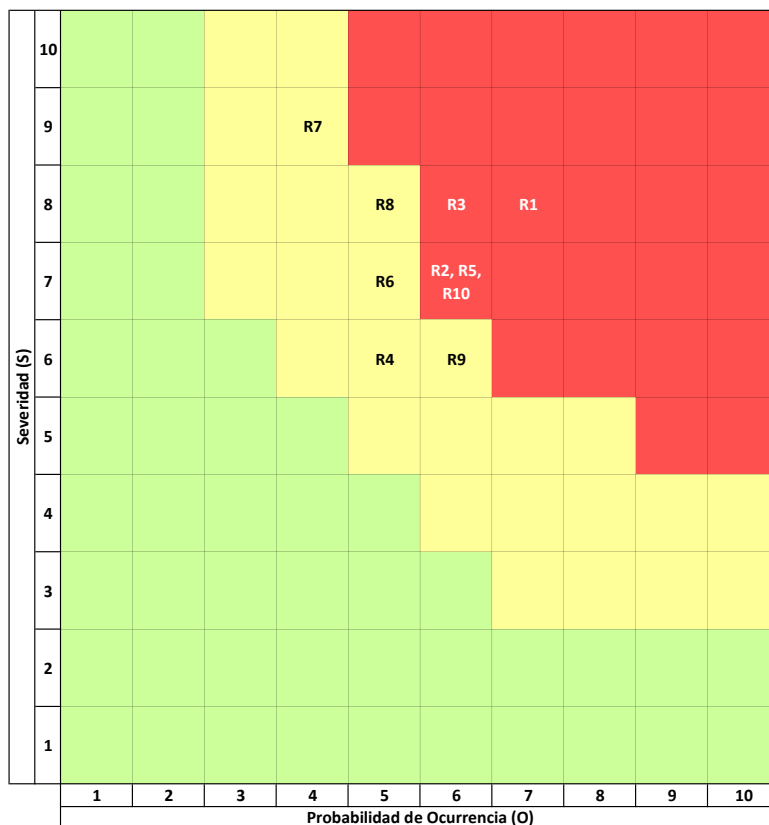


Figura 15. Mapa de calor de riesgos según el valor del RPN (rojo indica críticos >40).

14. Gestión de la calidad

La gestión de la calidad del proyecto SPCP tiene como propósito asegurar que los entregables cumplan con los requerimientos funcionales, técnicos y normativos definidos, manteniendo trazabilidad, verificabilidad y aceptación formal por parte del cliente.

Para cada requerimiento seleccionado se definen acciones de verificación y validación. Las acciones de verificación consideran al entregable como una caja blanca", es decir, se examina su funcionamiento interno mediante revisión de código, simulaciones, cálculos, análisis de resultados, pruebas unitarias o revisión de hojas de datos. Las acciones de validación, en cambio, tratan al entregable como una caja negra", evaluando su comportamiento externo, la percepción del usuario, la conformidad del cliente o la coherencia con los objetivos del proyecto. En ambos casos se contemplan consultas con expertos, mediciones, o contrastes con datos reales o simulados según corresponda.

A continuación, se describen la verificación y validación correspondientes a 13 requerimientos seleccionados.

- Req #FR-03 - Cálculo EVM (CPI, SPI, CV, SV, EAC, TCPI).
 - Verificación: revisión de fórmulas en el código y pruebas con dataset controlado (valores conocidos); comparación contra resultados calculados manualmente y contra una planilla de referencia; pruebas unitarias de cada indicador y de casos borde.
 - Validación: contraste con series históricas provistas por el cliente; revisión con el comité técnico de la coherencia de tendencias (CPI/SPI) y aceptación de resultados en un caso real de negocio.
- Req #FR-04 - Monte Carlo (cronograma) con PERT (a,m,b) y $\geq 10,000$ corridas; reporte de P50/P80/P90 y $P(\text{Finish} > \text{Baseline})$.
 - Verificación: ejecución con semilla fija para reproducibilidad; chequeo de estabilidad de percentiles ante repeticiones; validación de la transformación PERT y de la propagación de duraciones; pruebas de tolerancias sobre P50/P80/P90 con escenarios sintéticos.
 - Validación: demostración al cliente de escenarios de cronograma y coherencia de percentiles con expectativas; aceptación formal del comportamiento probabilístico en una WBS de prueba.
- Req #FR-05 - Red bayesiana (desempeño) para estimar $P(\text{EAC} > \text{BAC})$ con observables (CPI, SPI, exposición de riesgo, cambios, retrabajo, demoras proveedor).
 - Verificación: revisión de estructura y supuestos de la red; pruebas de posterior predictivo y sensibilidad de nodos; chequeos con datos simulados controlando direcciones de efecto.
 - Validación: revisión guiada con el cliente (PM) sobre los resultados inferidos y su interpretación; acuerdo de que los cambios en observables se reflejan en *posteriors* de manera esperable.

- Req #FR-07 - Fusión de señales (EVM + Bayes + ML) mediante ensamble para EAC final y probabilidad de sobre costo.
 - Verificación: comparación de salidas individuales vs. ensamble; revisión de pesos o metamodelo (*stacking*) y chequeo de mejora en error y estabilidad; pruebas de consistencia cuando falta alguna señal.
 - Validación: presentación de desempeño consolidado al comité; aceptación de que el ensamble no degrada y aporta robustez frente a métodos individuales.
- Req #FR-08 - Visualización ejecutiva (KPIs, curvas S, histograma y tabla ejecutiva exportable).
 - Verificación: verificación de presentación y actualización de los datos con datasets de distintos tamaños; comparación de los valores mostrados respecto al backend y pruebas de exportación CSV/PDF/PNG.
 - Validación: sesión con usuarios clave para evaluar legibilidad, navegabilidad y comprensión de KPIs; ajustes menores y aceptación en UAT.
- Req #TEST-02 - Contrato de datos en CI: el build debe fallar ante cambios incompatibles.
 - Verificación: integración de validación de esquema (tipos, PK/FK, requeridos) en el pipeline; inyección de cambios incompatibles simulados y comprobación de fallo controlado.
 - Validación: demostración al cliente del proceso de rechazo con evidencia de logs y política de versionado de esquema aprobada.
- Req #TEST-05 - Validación de modelos de ML (*k-fold*, MAE/RMSE, curva de calibración).
 - Verificación: ejecución del pipeline con particiones fijas; revisión de métricas por *fold* y promedio; verificación de calibración y tests de no fuga temporal.
 - Validación: presentación de métricas consolidadas y gráficos de calibración al cliente; aceptación de umbrales acordados.
- Req #UI-05 - Explicabilidad combinada.
 - Verificación: chequeo de consistencia de valores SHAP con perturbaciones controladas; validación de sensibilidad en nodos de la red bayesiana; prueba de sincronía entre texto y visual.
 - Validación: revisión con usuarios avanzados de si las explicaciones permiten entender drivers; aprobación de ejemplos guiados.
- Req #DEV-05 - MLOps.
 - Verificación: pruebas de registro y versionado (modelo, *features*, semillas); restauración desde un *snapshot*; ejecución de reentrenamiento según umbrales.
 - Validación: simulación de ciclo de vida completo ante el cliente con trazabilidad de artefactos; aceptación del procedimiento.

- Req #DATA-01 - Modelo unificado (DER vigente).
 - Verificación: validación automática del esquema contra el diccionario; rechazo de columnas extra y reporte de discrepancias; pruebas con datasets deliberadamente inválidos.
 - Validación: verificación conjunta con el cliente de la correspondencia DER-dataset en un corte real; conformidad de estructura y dominios.
- Req #REG-01 - Cumplimiento de privacidad de datos.
 - Verificación: revisión del módulo de anonimización y de los mecanismos de cifrado de credenciales; auditoría interna de logs para confirmar la ausencia de datos sensibles en outputs.
 - Validación: validación con el responsable de cumplimiento y el cliente de que los datos utilizados y exportados cumplen las políticas de privacidad vigentes; aceptación formal mediante checklist de cumplimiento.
- Req #DOC-03 - Manual de usuario.
 - Verificación: revisión editorial y técnica del documento para asegurar coherencia entre pantallas, pasos y funcionalidades; pruebas cruzadas por un integrante ajeno al desarrollo.
 - Validación: sesión de revisión guiada con usuarios reales siguiendo los procedimientos del manual; incorporación de observaciones y aprobación final del cliente.
- Req #TEST-10 - Pruebas de aceptación de usuario (UAT).
 - Verificación: ejecución de los escenarios definidos en el plan de pruebas con registro de resultados y evidencias.
 - Validación: sesión de pruebas con usuarios finales y cliente; firma del acta de aceptación tras confirmar cumplimiento de todos los casos de prueba.

15. Procesos de cierre

El proceso de cierre del proyecto SPCP tiene como objetivo consolidar los resultados alcanzados, verificar el cumplimiento del plan aprobado, documentar las lecciones aprendidas y reconocer el esfuerzo del equipo y de los interesados. Las siguientes pautas establecen las actividades que se llevarán a cabo en la reunión final de evaluación y cierre en el *Quality Gate 5* - Cierre del proyecto.

15.1. Revisión del cumplimiento del Plan de Proyecto

La revisión del cumplimiento del plan estará a cargo del responsable del proyecto (PM), con la participación del *Data Scientist* líder y del responsable técnico. El procedimiento consistirá en:

- Comparar las fechas reales de cada hito y entregable contra las planificadas en el cronograma base (*Gantt*).
- Contrastar los indicadores EVM finales (CPI, SPI, EAC) con los valores objetivo definidos al inicio.
- Revisar los entregables aprobados y verificar la cobertura de los requerimientos funcionales, no funcionales y normativos.
- Registrar las desviaciones detectadas y clasificarlas según su causa (alcance, cronograma, recursos o calidad).

El resultado de esta revisión quedará documentado en un acta de cumplimiento firmada por el PM y validada por el comité académico del proyecto.

15.2. Lecciones aprendidas, técnicas y problemas identificados

El análisis de las técnicas y procedimientos empleados será coordinado por el PM con la colaboración de los responsables técnicos de cada área (ETL, ML, MLOps, UI, QA). El procedimiento incluirá:

- Identificar las metodologías y herramientas que resultaron más útiles (por ejemplo, CI/CD, validaciones automáticas, control de versiones, simulaciones Monte Carlo).
- Documentar aquellas prácticas o enfoques que resultaron poco eficientes o redundantes, junto con las razones identificadas.
- Describir los principales problemas surgidos durante el desarrollo (integración de datos, calibración de modelos, coordinación de *Quality Gates*) y las soluciones aplicadas.
- Consolidar la información en un documento de “Lecciones aprendidas” para referencia en futuros proyectos.

El acta de lecciones aprendidas será publicada en el repositorio del proyecto y formará parte del material de referencia del SPCP.

15.3. Agradecimientos y reconocimiento al equipo

La organización del acto de agradecimiento estará a cargo del PM, con apoyo administrativo y logístico del área de operaciones académicas. Durante este evento se presentarán los resultados finales, se reconocerá el aporte de los integrantes del equipo de trabajo y se agradecerá a los colaboradores externos y asesores académicos. Los gastos asociados (logística, materiales, refrigerios) serán financiados con cargo al presupuesto del proyecto en el rubro de indirectos “Gastos administrativos” asignado al Trabajo Final.

Finalmente, se elaborará un informe de cierre que consolidará toda la documentación del proyecto (actas, entregables finales, métricas de desempeño, resultados de pruebas, lecciones aprendidas y reconocimientos), constituyendo la versión definitiva del SPCP para archivo y referencia.