



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**FACULTAD DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA**

CARRERA DE INGENIERÍA DE SOFTWARE

**Desarrollo de un prototipo de aplicativo web para el análisis de lesiones mamarias
a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN SOFTWARE**

AUTOR: JUSTIN MATÍAS VELÁSQUEZ CHÁVEZ

DIRECTOR: DR. ORLANDO ÁLVAREZ LLAMOZA, PHD.

CUENCA - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**FACULTAD DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA**

CARRERA DE INGENIERÍA DE SOFTWARE

Desarrollo de un prototipo de aplicativo web para el análisis de lesiones
mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN SOFTWARE**

AUTOR: JUSTIN MATÍAS VELÁSQUEZ CHÁVEZ

DIRECTOR: DR. ORLANDO ÁLVAREZ LLAMOZA, PHD.

CUENCA - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

 Universidad Católica de Cuenca	DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD
---	--

Justin Matías Velásquez Chávez portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0106746381**. Declaro ser el autor de la obra: **“Desarrollo de un prototipo de aplicativo web para el análisis de lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 27 de agosto de 2026

F: 

Justin Matías Velásquez Chávez
C.I. 0106746381



Universidad
Católica
de Cuenca

CERTIFICADO DEL TUTOR

Yo, Orlando Álvarez Llamaza, certifico que el presente trabajo de investigación / artículo científico, con el título **“Desarrollo de un prototipo de aplicativo web para el análisis de lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica”** fue desarrollado por Justin Matías Velásquez Chávez, con número de cédula 0106746381 bajo mi supervisión.

F:

Orlando Álvarez Llamaza
C.I. 0151483344

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres, Carlos y Sandra, quienes han sido el apoyo más importante durante toda mi vida y mi formación académica. Gracias por cada esfuerzo, por su confianza, por sus consejos y por acompañarme en los momentos de dificultad. Su ejemplo de responsabilidad, perseverancia y dedicación me enseñó a no rendirme y a continuar trabajando hasta alcanzar mis metas. Este logro es también el resultado de todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanas, Victoria y Amelia, por su cariño, alegría y por ser una motivación constante para seguir creciendo. Espero que este logro también pueda servirles como ejemplo de que, con esfuerzo, disciplina y confianza, es posible alcanzar los objetivos que nos proponemos.

A mi novia, Ericka, por su amor, paciencia y comprensión durante este proceso. Gracias por acompañarme en los días de cansancio, escucharme cuando las cosas parecían complicadas y recordarme que era capaz de continuar. Tu apoyo y compañía fueron fundamentales para mantenerme firme durante el desarrollo de este proyecto.

A toda mi familia, por sus palabras de aliento, su preocupación y su presencia a lo largo de esta etapa. Cada uno, de distintas maneras, contribuyó a que pudiera llegar hasta este momento.

Con todo mi cariño y gratitud, dedico a ustedes la culminación de esta etapa tan importante de mi vida.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la constancia necesarias para superar cada dificultad presentada durante mi formación académica y el desarrollo de este trabajo de titulación. Su guía me permitió continuar incluso en los momentos de incertidumbre y cansancio.

A mi familia, por su amor, confianza y apoyo incondicional. Gracias por acompañarme durante todos estos años, comprender las exigencias de este proceso y motivarme constantemente para alcanzar mis objetivos. Su presencia fue fundamental para culminar esta etapa.

A mis amigos y compañeros de la universidad, con quienes compartí conocimientos, experiencias, desafíos y momentos importantes a lo largo de la carrera. Su amistad, colaboración y apoyo hicieron que este recorrido fuera más llevadero y significativo.

A la Universidad Católica de Cuenca, por brindarme la formación académica, los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollarme como profesional. Agradezco también a los docentes que contribuyeron a mi aprendizaje y que, mediante sus enseñanzas, fortalecieron mi preparación en el área de Ingeniería de Software.

Expreso mi especial agradecimiento a mi tutor, Orlando Álvarez Llamaza, por aceptar acompañarme en este trabajo, compartir sus conocimientos y orientarme durante el desarrollo de toda la tesis. Su experiencia, disposición y observaciones fueron fundamentales para definir el enfoque de la investigación y avanzar correctamente en cada una de sus etapas.

De igual manera, agradezco al ingeniero Carlos Echeverría por su apoyo, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Valoro profundamente el tiempo dedicado, sus orientaciones y la ayuda brindada a lo largo de este proceso.

Resumen

El análisis de la difusión en lesiones mamarias requiere técnicas de imagen e infraestructura especializada, de disponibilidad limitada en algunos entornos de investigación. Esto motiva alternativas computacionales basadas en mamografías. A partir de esta necesidad, se desarrolló un prototipo web para analizar regiones de interés (ROI) mediante simulación mesoscópica. El modelo simula el movimiento de partículas que representan el agua dentro del tejido mamario, cuya heterogeneidad se obtiene de las intensidades de la ROI. La autocorrelación de velocidades (C_v) indica cuánto conserva ese movimiento su dirección inicial. El tiempo característico (τ_C) estima cuándo se pierde esa memoria. El coeficiente de difusión mesoscópico (MDC) resume la facilidad de movimiento en el dominio simulado. El coeficiente normalizado (MDC^*) relaciona el MDC con una referencia libre para comparar simulaciones. La solución emplea una arquitectura distribuida que separa la aplicación web del procesamiento intensivo realizado en un servidor universitario. El sistema ofrece a los usuarios un entorno accesible para gestionar casos, consultar su estado y revisar resultados, manteniendo trazabilidad entre imágenes, parámetros, simulaciones y reportes. También almacena de forma privada la información y permite ejecutar simulaciones sin depender del equipo del usuario. Para una misma ROI y parámetros equivalentes, el procesamiento disminuyó de 18 horas y 40 minutos en el entorno local a 2 horas y 55 minutos en el servidor, lo que representa una reducción del 84,4 %. Además, las pruebas con k6 no registraron errores HTTP. Estos resultados evidencian la viabilidad del prototipo como herramienta académica usable, accesible, trazable y reproducible.

Palabras clave: *Mamografía, región de interés (ROI), simulación mesoscópica, dinámica de colisión multipartícula, procesamiento distribuido.*

Abstract

The analysis of diffusion in breast lesions requires specialized imaging techniques and infrastructure, which may have limited availability in certain research environments. This constraint motivates computational alternatives based on standard mammograms. To address this need, a web prototype was developed to analyze regions of interest (ROIs) using mesoscopic simulation. The model simulates the motion of particles representing water within breast tissue, whose heterogeneity is derived from the ROI intensity levels. The velocity autocorrelation function (C_v) measures the degree to which this motion retains its initial direction. The characteristic time (τ_C) estimates when this directional memory is lost. The mesoscopic diffusion coefficient (MDC) summarizes the ease of particle movement within the simulated domain, while the normalized coefficient (MDC*) related the MDC to a free-diffusion reference for inter-simulation comparison. The proposed solution utilizes a distributed architecture that separates the web application from the computationally intensive processing executed on a university server. The system provides users with an accessible environment to manage cases, check their status, and review results, ensuring full traceability among images, parameters, simulations, and generated reports. Furthermore, it privately stores information and allows simulations to run independently of the user's computer. For the same ROI and equivalent parameters, processing time decreased from 18 hours and 40 minutes in the local environment to 2 hours and 55 minutes on the server, representing a 84.4% reduction in execution time. Additionally, load testing with k6 yielded zero HTTP errors. These results demonstrate the viability of the prototype as a usable, accessible, traceable, and reproducible academic tool.

Keywords: *Mammography, region of interest (ROI), mesoscopic simulation, multi-particle collision dynamics, distributed processing*

Índice

Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación de la investigación.....	3
1.2.1. Relevancia científica del análisis de difusión.....	3
1.2.2. Necesidad de alternativas computacionales	3
1.2.3. Relación con la imagen médica y la investigación.....	3
1.2.4. Pertinencia para Ingeniería de Software	4
1.2.5. Organización metodológica del desarrollo	4
1.2.6. Aporte esperado del proyecto	4
1.3. Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Alcance del estudio.....	7
1.4.1. Alcance funcional:.....	7
1.4.2. Alcance tecnológico:	8
1.4.3. Alcance documental y metodológico:	9
1.4.4. Exclusiones del proyecto:.....	10
1.4.5. Limitaciones del estudio:.....	10
Capítulo 2	12
Marco teórico.....	12
2.1. Cáncer de mama y análisis por imágenes	12
2.1.1. Cáncer de mama, detección temprana y análisis por imágenes.....	12
2.1.2. Mamografía como técnica de imagen médica y fuente de información morfológica.....	12
2.1.3. Técnicas de difusión y análisis funcional del tejido mamario.....	13
2.1.4. Región de interés y preparación de imágenes para análisis computacional .	13
2.2. Difusión en tejidos biológicos	14
2.2.1. Concepto de difusión en el tejido biológico	14
2.2.2. Resonancia magnética ponderada por difusión	15
2.2.3. Coeficiente aparente de difusión	15
2.2.4. Relación entre difusión y análisis computacional	16

2.3. Simulación mesoscópica MPC	17
2.3.1. Fundamentos de la simulación mesoscópica	17
2.3.2. Dinámica por colisión multipartícula	18
2.3.3. Caja plana de simulación y obstáculos cilíndricos	20
2.3.4. Autocorrelación de velocidades y tiempo característico	22
2.3.5. Coeficiente de difusión mesoscópico y normalización	23
2.3.6. Procedimiento para la obtención de los resultados principales	25
2.4. Estado del arte	27
2.4.1. Análisis de difusión en lesiones mamarias	27
2.4.2. Simulación mesoscópica aplicada a mamografías.....	28
2.4.3. Brecha identificada y aporte del prototipo	28
2.5. Desarrollo de aplicativos web para procesamiento de imágenes	29
2.5.1. Aplicaciones web orientadas al procesamiento de datos.....	29
2.5.2. Arquitectura cliente-servidor y despliegue distribuido	29
2.5.3. Despliegue distribuido y servicios administrados	30
2.6. Tecnologías utilizadas en el prototipo	31
2.6.1. Python, Flask y Gunicorn	31
2.6.2. HTML, CSS y JavaScript	31
2.6.3. PostgreSQL y Neon.....	31
2.6.4. Redis, Upstash y worker de procesamiento.....	32
2.6.5. Julia para simulación y cálculo.....	32
2.6.6. Paralelismo mediante hilos de CPU	33
2.6.7. Cloudflare R2	33
2.6.8. Brevo	33
2.6.9. Docker y Docker Compose	34
2.6.10. GitHub para control de versiones	34
2.6.11. Render.....	34
2.6.12. GitHub Actions.....	35
2.6.13. GitHub Container Registry	35
2.6.14. Herramientas para pruebas de rendimiento y calidad web	35
2.7. Metodología Kanban	37
2.7.1. Fundamentos de Kanban	37
2.7.2. Kanban aplicado al desarrollo de software.....	37

2.7.3. Linear.....	38
Capítulo 3	40
Especificación de requisitos del software.....	40
3.1. Descripción general del prototipo.....	40
3.1.1. Objetivo del producto	41
3.1.2. Usuarios previstos	41
3.2. Alcance funcional del prototipo	42
3.3. Funcionalidad general del producto	43
3.4. Restricciones generales del sistema.....	43
3.4.1. Restricciones funcionales	44
3.4.2. Restricciones tecnológicas.....	44
3.4.3. Restricciones metodológicas	45
3.4.4. Restricciones éticas y de alcance clínico	45
3.5. Requisitos funcionales.....	45
3.5.1. RF-01: Carga de imágenes mamográficas.....	46
3.5.2. RF-02: Validación de archivos cargados.....	46
3.5.3. RF-03: Registro de caso	47
3.5.4. RF-04: Almacenamiento privado de archivos	47
3.5.5. RF-05: Delimitación o incorporación de ROI	48
3.5.6. RF-06: Confirmación de ROI.....	48
3.5.7. RF-07: Conversión de ROI a formato PGM.....	49
3.5.8. RF-08: Preparación del espacio de simulación.....	49
3.5.9. RF-09: Envío a procesamiento en segundo plano	50
3.5.10. RF-10: Ejecución de simulación mesoscópica MPC.....	50
3.5.11. RF-11: Cálculo de métricas de difusión	51
3.5.12. RF-12: Generación de mapas de concentración y densidad	51
3.5.13. RF-13: Presentación y entrega de resultados.....	52
3.5.14. RF-14: Generación de reporte PDF explicativo	52
3.5.15. RF-15: Comparación de casos procesados	53
3.5.16. RF-16: Gestión de estados del caso	53
3.5.17. RF-17: Registro e inicio de sesión de usuarios	54
3.5.18. RF-18: Restricción de casos por usuario propietario.....	54
3.5.19. RF-19: Eliminación de casos	55

3.5.20. RF-20: Recuperación de contraseña	55
3.5.21. RF-21: Notificación de procesamiento completado	56
3.6. Requisitos no funcionales	56
3.6.1. RNF-01: Acceso web.....	57
3.6.2. RNF-02: Modularidad	57
3.6.3. RNF-03: Trazabilidad.....	58
3.6.4. RNF-04: Reproducibilidad	58
3.6.5. RNF-05: Procesamiento asíncrono.....	59
3.6.6. RNF-06: Entorno distribuido.....	59
3.6.7. RNF-07: Mantenibilidad	60
3.6.8. RNF-08: Seguridad de archivos	60
3.6.9. RNF-09: Gestión de errores.....	61
3.6.10. RNF-10: Privacidad y anonimización de casos.....	61
3.6.11. RNF-11: Portabilidad mediante Docker	62
3.6.12. RNF-12: Salud del sistema	62
3.6.13. RNF-13: Comunicación segura	63
3.6.14. RNF-14: Gestión de secretos.....	63
3.6.15. RNF-15: Aislamiento de recursos	64
3.7. Requisitos comunes de las interfaces	64
3.7.1. Interfaces de usuario	64
3.7.2. Interfaces de software.....	66
3.7.3. Interfaces de comunicación	67
3.8. Matriz de trazabilidad de requisitos y pruebas	68
Capítulo 4	69
Casos de uso del sistema	69
4.1. Propósito y alcance de los casos de uso	69
4.2. Actores del sistema.....	69
4.3. Diagrama general de casos de uso	70
4.4. Especificación de casos de uso.....	71
4.4.1. CU-01: Registro de usuario	71
4.4.2. CU-02: Inicio de sesión	72
4.4.3. CU-03: Cierre de sesión	74
4.4.4. CU-04: Recuperación de contraseña	75

4.4.5. CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen	77
4.4.6. CU-06: Delimitación manual de ROI.....	78
4.4.7. CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático	80
4.4.8. CU-08: Consulta de casos y estados.....	81
4.4.9. CU-09: Visualización de resultados	83
4.4.10. CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados.....	84
4.4.11. CU-11: Comparación de casos procesados	86
4.4.12. CU-12: Eliminación de caso.....	87
4.4.13. CU-13: Eliminación de cuenta	89
Capítulo 5	91
Diagramas de diseño del prototipo	91
5.1. Diagrama de contexto del sistema	91
5.2. Diagrama de arquitectura general.....	92
5.3. Diagrama de módulos del prototipo	93
5.4. Diagrama de flujo del caso	94
5.5. Diagrama entidad-relación de la base de datos	95
5.6. Diagrama de estados del caso	96
5.7. Diagrama de secuencia: registro e inicio de sesión	97
5.8. Diagrama de secuencia: carga y confirmación de ROI	98
5.9. Diagrama de secuencia: envío a procesamiento y simulación	99
5.10. Diagrama de secuencia: generación y descarga de reporte	100
5.11. Diagrama de clases del backend.....	101
5.12. Diagrama de componentes del simulador Julia	102
5.13. Diagrama de despliegue distribuido del prototipo.....	102
Capítulo 6	104
Implementación del prototipo y gestión del desarrollo	104
6.1. Organización del desarrollo con Kanban.....	104
6.2. Gestión del proyecto en Linear.....	104
6.2.1. Estados del tablero.....	105
6.2.2. Etiquetas utilizadas	105
6.3. Backlog general del proyecto	106
6.4. Historias de usuario organizadas por épicas.....	107
6.4.1. Épica 1: Diseño técnico y arquitectura	108

6.4.2. Épica 2: Carga de imágenes y registro de casos	108
6.4.3. Épica 3: Delimitación y confirmación de ROI	110
6.4.4. Épica 4: Gestión de usuarios y privacidad de casos	112
6.4.5. Épica 5: Procesamiento en segundo plano	115
6.4.6. Épica 6: Simulación y cálculo de métricas	116
6.4.7. Épica 7: Resultados, comparación y reportes	118
6.5. Relación entre épicas y módulos implementados	121
6.6. Resumen de la implementación	122
Capítulo 7	123
Validación, pruebas y resultados del prototipo	123
7.1. Estrategia de validación	123
7.1.1. Objetivo y alcance de las pruebas	123
7.1.2. Entornos y datos de prueba	123
7.1.3. Criterios de aceptación y evidencias	124
7.2. Validación funcional	125
7.2.1. Autenticación y control de acceso	126
7.2.2. Carga, registro y delimitación de ROI	130
7.2.3. Consulta, privacidad y eliminación de casos	133
7.2.4. Resultados, comparación y reportes	134
7.2.5. Correo transaccional	136
7.3. Pruebas de integración y procesamiento en segundo plano	136
7.3.1. Integración entre la aplicación y los servicios administrados	136
7.3.2. Cola Redis y ejecución del worker	137
7.3.3. Estados, errores y reintentos	138
7.3.4. Validación del flujo integral	139
7.3.5. Continuidad, aislamiento y tiempos de cola	140
7.4. Validación del simulador Julia/MPC	142
7.4.1. Preparación de la ROI y construcción del dominio	142
7.4.2. Dinámica MPC implementada	142
7.4.3. Parámetros y reproducibilidad	142
7.4.4. Métricas y salidas del simulador	143
7.5. Validación del despliegue distribuido	144
7.5.1. Pipeline de entrega	144

7.5.2. Aplicación web y comprobaciones de salud.....	144
7.5.3. Worker en el servidor universitario	145
7.5.4. Seguridad operativa del despliegue	146
7.6. Resultados obtenidos	146
7.6.1. Resultados operativos de los casos procesados	146
7.6.2. Mapas y representación del dominio	147
7.6.3. Autocorrelación y métricas de difusión.....	148
7.6.4. Comparación de casos	149
7.6.5. Reporte PDF y paquete de resultados.....	150
7.6.6. Tiempo de respuesta y uso de recursos	150
7.6.7. Discusión de resultados	151
7.7. Cumplimiento de requisitos y trazabilidad.....	152
7.7.1. Requisitos funcionales.....	152
7.7.2. Requisitos no funcionales.....	152
7.7.3. Correspondencia entre resultados y objetivos	153
7.8. Pruebas de rendimiento	153
7.8.1. Propósito, herramienta e indicadores.....	154
7.8.2. Escenarios definidos	154
7.8.3. Resultados obtenidos con k6	155
7.8.4. Evaluación complementaria con Lighthouse.....	156
7.9. Comparación del procesamiento local y en el servidor universitario.....	157
7.9.1. Justificación del procesamiento en el servidor universitario.....	157
7.9.2. Diseño de la comparación.....	157
7.9.3. Métricas y evidencia.....	158
7.10. Limitaciones del estudio y condiciones de generalización.....	158
Capítulo 8	161
Conclusiones y recomendaciones	161
8.1. Conclusiones.....	161
8.2. Recomendaciones	162
8.3. Trabajos futuros	162
Referencias	163
Anexos.....	167

Índice de tablas

Tabla 1 Síntesis del problema identificado.....	2
Tabla 2 Dimensiones de justificación y aporte del proyecto.....	6
Tabla 3 Comparación entre enfoques de análisis por imágenes.....	14
Tabla 4 Conceptos asociados a la difusión.....	17
Tabla 5 Elementos del modelo MPC aplicado en el prototipo.....	26
Tabla 6 Tecnologías utilizadas en el prototipo.....	36
Tabla 7 Estados Kanban utilizados en el proyecto.....	38
Tabla 8 Características de los usuarios del prototipo.....	41
Tabla 9 Elementos principales de la interfaz de usuario.....	65
Tabla 10 Componentes e interfaces de software del prototipo.....	66
Tabla 11 Comunicaciones entre componentes y servicios del prototipo.....	67
Tabla 12 Actores que participan en los casos de uso.....	69
Tabla 13 Estados utilizados en el tablero Kanban.....	105
Tabla 14 Etiquetas utilizadas en Linear.....	105
Tabla 15 Backlog general organizado por épicas.....	107
Tabla 16 Relación entre épicas y módulos implementados.....	121
Tabla 17 Niveles de validación aplicados al prototipo.....	124
Tabla 18 Resumen de la validación funcional.....	125
Tabla 19 Validación de integración y despliegue.....	137
Tabla 20 Plan de verificación de la cola y del procesamiento en segundo plano.....	141
Tabla 21 Parámetros de simulación utilizados en producción.....	143
Tabla 22 Resultados registrados en el entorno de producción.....	146
Tabla 23 Correspondencia entre objetivos, resultados y evidencias.....	153
Tabla 24 Escenarios de las pruebas de rendimiento con k6.....	154
Tabla 25 Resultados de las pruebas de rendimiento.....	155
Tabla 26 Resultados de la evaluación con Lighthouse.....	156
Tabla 27 Comparación del procesamiento local y en el servidor universitario.....	158

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Secuencia básica de la dinámica por colisión multipartícula.....	20
Ilustración 2 Ejemplo conceptual de caja de simulación con obstáculos cilíndricos	21
Ilustración 3 Flujo de gestión del proyecto en Linear.....	39
Ilustración 4 Diagrama general de casos de uso.....	70
Ilustración 5 Interfaz de registro de una nueva cuenta de usuario.....	127
Ilustración 6 Interfaz de inicio de sesión del prototipo.	128
Ilustración 7 Panel de gestión de cuenta y eliminación del usuario.	128
Ilustración 8 Formulario para solicitar la recuperación de contraseña.	129
Ilustración 9 Correo transaccional con el enlace temporal de recuperación de contraseña.	129
Ilustración 10 Formulario para definir una nueva contraseña de acceso.....	130
Ilustración 11 Interfaz de selección y carga de imágenes compatibles.	131
Ilustración 12 Selección de la modalidad de entrada de la imagen.	131

Ilustración 13 Delimitación manual de la región de interés.	132
Ilustración 14 Vista previa y confirmación de la ROI para procesamiento.....	132
Ilustración 15 Listado de casos asociados al usuario autenticado.	133
Ilustración 16 Confirmación para la eliminación permanente de un caso.....	134
Ilustración 17 Detalle y seguimiento de un caso procesado.	135
Ilustración 18 Selección de casos procesados para su comparación.	135
Ilustración 19 Opciones de descarga de resultados del caso.	136
Ilustración 20 Correo transaccional de finalización del procesamiento.	136
Ilustración 21 Representación de un caso pendiente de confirmación de ROI.	138
Ilustración 22 Representación de un caso con procesamiento completado.....	138
Ilustración 23 Representación de un error durante el procesamiento del caso.....	138
Ilustración 24 Mensaje de error y opción de reintento del procesamiento.....	139
Ilustración 25 Archivos privados de un caso procesado almacenados en Cloudflare R2.	139
Ilustración 26 Servicio PostgreSQL administrado en Neon.....	140
Ilustración 27 Servicio de cola Redis administrado en Upstash.....	140
Ilustración 28 Ejecución exitosa del flujo de despliegue mediante GitHub Actions. ..	144
Ilustración 29 Aplicación web desplegada en Render mediante un Blueprint.	145
Ilustración 30 Verificación del estado y los hilos disponibles del worker en el servidor universitario.	145
Ilustración 31 Dominio válido y representación de obstáculos derivados de la ROI... 147	
Ilustración 32 Caja de simulación mesoscópica y distribución de radios por celda.....	148
Ilustración 33 Autocorrelación normalizada de velocidades y ajuste exponencial de la memoria del movimiento.....	148
Ilustración 34 Comparación de métricas de difusión mesoscópica entre dos casos procesados.	149
Ilustración 35 Reporte PDF visual generado para un caso procesado.....	150

Índice de tablas de requisitos

Requisito 1 Requisito funcional 1 (RF-01): Carga de imágenes mamográficas	46
Requisito 2 Requisito funcional 2 (RF-02): Validación de archivos cargados	46
Requisito 3 Requisito funcional 3 (RF-03): Registro de caso	47
Requisito 4 Requisito funcional 4 (RF-04): Almacenamiento privado de archivos	47
Requisito 5 Requisito funcional 5 (RF-05): Delimitación o incorporación de ROI.....	48
Requisito 6 Requisito funcional 6 (RF-06): Confirmación de ROI.....	48
Requisito 7 Requisito funcional 7 (RF-07): Conversión de ROI a formato PGM	49
Requisito 8 Requisito funcional 8 (RF-08): Preparación del espacio de simulación	49
Requisito 9 Requisito funcional 9 (RF-09): Envío a procesamiento en segundo plano. 50	
Requisito 10 Requisito funcional 10 (RF-10): Ejecución de simulación mesoscópica MPC	50
Requisito 11 Requisito funcional 11 (RF-11): Cálculo de métricas de difusión.....	51

Requisito 12 Requisito funcional 12 (RF-12): Generación de mapas de concentración y densidad.....	51
Requisito 13 Requisito funcional 13 (RF-13): Presentación y entrega de resultados	52
Requisito 14 Requisito funcional 14 (RF-14): Generación de reporte PDF explicativo	52
Requisito 15 Requisito funcional 15 (RF-15): Comparación de casos procesados.....	53
Requisito 16 Requisito funcional 16 (RF-16): Gestión de estados del caso	53
Requisito 17 Requisito funcional 17 (RF-17): Registro e inicio de sesión de usuarios .	54
Requisito 18 Requisito funcional 18 (RF-18): Restricción de casos por usuario propietario	54
Requisito 19 Requisito funcional 19 (RF-19): Eliminación de casos	55
Requisito 20 Requisito funcional 20 (RF-20): Recuperación de contraseña.....	55
Requisito 21 Requisito funcional 21 (RF-21): Notificación de procesamiento completado	56
Requisito 22 Requisito no funcional 1 (RNF-01): Acceso web	57
Requisito 23 Requisito no funcional 2 (RNF-02): Modularidad.....	57
Requisito 24 Requisito no funcional 3 (RNF-03): Trazabilidad	58
Requisito 25 Requisito no funcional 4 (RNF-04): Reproducibilidad.....	58
Requisito 26 Requisito no funcional 5 (RNF-05): Procesamiento asíncrono	59
Requisito 27 Requisito no funcional 6 (RNF-06): Entorno distribuido	59
Requisito 28 Requisito no funcional 7 (RNF-07): Mantenibilidad	60
Requisito 29 Requisito no funcional 8 (RNF-08): Seguridad de archivos.....	60
Requisito 30 Requisito no funcional 9 (RNF-09): Gestión de errores	61
Requisito 31 Requisito no funcional 10 (RNF-10): Privacidad y anonimización de casos	61
Requisito 32 Requisito no funcional 11 (RNF-11): Portabilidad mediante Docker.....	62
Requisito 33 Requisito no funcional 12 (RNF-12): Salud del sistema	62
Requisito 34 Requisito no funcional 13 (RNF-13): Comunicación segura.....	63
Requisito 35 Requisito no funcional 14 (RNF-14): Gestión de secretos	63
Requisito 36 Requisito no funcional 15 (RNF-15): Aislamiento de recursos.....	64

Índice de tablas de caso de uso

Caso de Uso 1 Descripción del caso de uso CU-01: Registro de usuario	71
Caso de Uso 2 Descripción del caso de uso CU-02: Inicio de sesión	73
Caso de Uso 3 Descripción del caso de uso CU-03: Cierre de sesión.....	74
Caso de Uso 4 Descripción del caso de uso CU-04: Recuperación de contraseña	75
Caso de Uso 5 Descripción del caso de uso CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen	77
Caso de Uso 6 Descripción del caso de uso CU-06: Delimitación manual de ROI.....	79
Caso de Uso 7 Descripción del caso de uso CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático	80
Caso de Uso 8 Descripción del caso de uso CU-08: Consulta de casos y estados.....	82
Caso de Uso 9 Descripción del caso de uso CU-09: Visualización de resultados	83

Caso de Uso 10 Descripción del caso de uso CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados.....	85
Caso de Uso 11 Descripción del caso de uso CU-11: Comparación de casos procesados	86
Caso de Uso 12 Descripción del caso de uso CU-12: Eliminación de caso.....	88
Caso de Uso 13 Descripción del caso de uso CU-13: Eliminación de cuenta.....	89

Índice de diagrama de caso de uso

Diagrama Caso de Uso 1 CU-01: Registro de usuario	71
Diagrama Caso de Uso 2 CU-02: Inicio de sesión	72
Diagrama Caso de Uso 3 CU-03: Cierre de sesión	74
Diagrama Caso de Uso 4 CU-04: Recuperación de contraseña	75
Diagrama Caso de Uso 5 CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen.....	77
Diagrama Caso de Uso 6 CU-06: Delimitación manual de ROI.....	78
Diagrama Caso de Uso 7 CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático .	80
Diagrama Caso de Uso 8 CU-08: Consulta de casos y estados.....	81
Diagrama Caso de Uso 9 CU-09: Visualización de resultados	83
Diagrama Caso de Uso 10 CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados.....	84
Diagrama Caso de Uso 11 CU-11: Comparación de casos procesados	86
Diagrama Caso de Uso 12 CU-12: Eliminación de caso.....	87
Diagrama Caso de Uso 13 CU-13: Eliminación de cuenta	89

Índice de diagramas de diseño

Diagrama 1 Diagrama de contexto del sistema	91
Diagrama 2 Diagrama de arquitectura general	92
Diagrama 3 Diagrama de módulos del prototipo.....	93
Diagrama 4 Diagrama de flujo del caso	94
Diagrama 5 Diagrama entidad-relación de la base de datos.....	95
Diagrama 6 Diagrama de estados del caso	96
Diagrama 7 Diagrama de secuencia: registro e inicio de sesión	97
Diagrama 8 Diagrama de secuencia: carga y confirmación de ROI.....	98
Diagrama 9 Diagrama de secuencia: envío a procesamiento y simulación.....	99
Diagrama 10 Diagrama de secuencia: generación y descarga de reporte.....	100
Diagrama 11 Diagrama de clases del backend	101
Diagrama 12 Diagrama de componentes del simulador Julia	102
Diagrama 13 Diagrama de despliegue distribuido del prototipo	103

Índice de historias de usuario

Historia de Usuario 1 HU-01: Carga de mamografía completa	108
Historia de Usuario 2 HU-02: Carga de ROI recortada.....	109
Historia de Usuario 3 HU-03: Registro del caso	109
Historia de Usuario 4 HU-04: Eliminación de caso	110
Historia de Usuario 5 HU-05: Recorte manual de ROI.....	111
Historia de Usuario 6 HU-06: Vista previa de ROI.....	111
Historia de Usuario 7 HU-07: Confirmación de ROI.....	111
Historia de Usuario 8 HU-08: Registro de usuario.....	112
Historia de Usuario 9 HU-09: Inicio y cierre de sesión	113
Historia de Usuario 10 HU-10: Recuperación de contraseña.....	113
Historia de Usuario 11 HU-11: Consulta privada de casos	114
Historia de Usuario 12 HU-12: Eliminación de cuenta.....	114
Historia de Usuario 13 HU-13: Consulta del estado del procesamiento	115
Historia de Usuario 14 HU-14: Reintento ante errores	115
Historia de Usuario 15 HU-15: Notificación de procesamiento completado.....	116
Historia de Usuario 16 HU-16: Análisis simulado de la ROI	117
Historia de Usuario 17 HU-17: Obtención de métricas de difusión.....	117
Historia de Usuario 18 HU-18: Reproducibilidad del análisis	118
Historia de Usuario 19 HU-19: Visualización de resultados.....	118
Historia de Usuario 20 HU-20: Consulta de métricas explicadas	119
Historia de Usuario 21 HU-21: Comparación de casos procesados.....	120
Historia de Usuario 22 HU-22: Descarga de reporte y resultados	120

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, el cáncer de mama constituye uno de los principales problemas de salud a nivel mundial y su detección temprana continúa siendo un factor decisivo para mejorar el pronóstico. En el caso ecuatoriano, GLOBOCAN reportó 3.903 casos nuevos de cáncer de mama y 1.154 muertes, ubicándolo como el cáncer de mayor incidencia en el país [1].

Sin embargo, la mamografía describe principalmente rasgos morfológicos, mientras que técnicas funcionales como la Resonancia Magnética Ponderada por Difusión (DWI, por sus siglas en inglés de Diffusion-Weighted Imaging) y el Coeficiente Aparente de Difusión (ADC, por sus siglas en inglés de Apparent Diffusion Coefficient) aportan información sobre la movilidad del agua en el tejido. Estas métricas han demostrado utilidad para diferenciar lesiones y para monitorear la respuesta a quimioterapia neoadyuvante en pacientes con cáncer de mama [2].

El inconveniente es que la obtención de DWI y ADC depende de infraestructura de resonancia magnética, personal especializado y protocolos clínicos específicos, lo que restringe su disponibilidad en contextos con limitada capacidad tecnológica. En el ámbito regional, Ecuador se encuentra entre los países con menor disponibilidad de equipos de resonancia magnética en proporción a su población [3]. A esta limitación estructural se suma una barrera económica: en 2025, el Ministerio de Salud Pública informó que, en el sector privado ecuatoriano, el costo de una resonancia magnética oscila entre USD 150 y USD 600, valores que pueden dificultar el acceso oportuno a estudios especializados basados en esta tecnología [4]. Dado que la obtención de DWI depende de esta misma infraestructura, su disponibilidad efectiva resulta aún más restringida en el contexto nacional.

Frente a esta limitación, Borjas et al. propusieron una metodología que transforma la región de interés de una mamografía en un espacio de simulación mesoscópica, con el fin de estimar un coeficiente de difusión mesoscópico (MDC, por sus siglas en inglés de Mesoscopic Diffusion Coefficient) comparable con métricas de difusión reportadas en la

literatura [5]. A pesar de su potencial, dicha propuesta se presenta como una prueba de concepto científica y no como un aplicativo web operativo que organice integralmente el flujo de trabajo requerido para cargar mamografías, delimitar regiones de interés, ejecutar la simulación, visualizar mapas de densidad y comparar los resultados obtenidos con resultados previos. En consecuencia, se plantea la necesidad de desarrollar un prototipo de aplicativo web que traduzca esta metodología en un proceso estructurado, trazable y reproducible, orientado al análisis y monitoreo computacional de lesiones mamarias a partir de mamografías.

Tabla 1
Síntesis del problema identificado

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Problema principal	Limitación para disponer de un flujo computacional estructurado que permita analizar lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica.
Limitación de la mamografía	La mamografía aporta información principalmente morfológica, pero no genera directamente métricas funcionales como DWI o ADC.
Limitación de acceso	Las técnicas basadas en resonancia magnética requieren infraestructura especializada, personal técnico y costos que pueden limitar su disponibilidad.
Brecha identificada	La metodología de simulación mesoscópica existe como propuesta científica, pero no como aplicativo web operativo, trazable y reproducible.
Necesidad del proyecto	Desarrollar un prototipo web que organice la carga de imágenes, delimitación de ROI, simulación, visualización de resultados y comparación de casos.

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Relevancia científica del análisis de difusión

El presente trabajo de titulación se justifica por la necesidad de explorar soluciones computacionales que permitan organizar, procesar y presentar información derivada de imágenes mamográficas dentro de un flujo técnico estructurado. En el estudio del cáncer de mama, el análisis de cambios en el tejido y el seguimiento de lesiones constituyen aspectos relevantes para la investigación biomédica, especialmente cuando se consideran métricas asociadas a la difusión y al comportamiento funcional del tejido.

Diversos estudios han señalado que la resonancia magnética ponderada por difusión puede aportar información útil para predecir o analizar la respuesta patológica después de tratamientos neoadyuvantes en cáncer de mama [6]. Este tipo de evidencia demuestra la importancia de las métricas de difusión dentro del campo de la imagen médica, ya que permiten estudiar cambios que no siempre son visibles mediante técnicas centradas únicamente en la morfología.

1.2.2. Necesidad de alternativas computacionales

Aunque las técnicas de difusión tienen valor investigativo, su aplicación requiere infraestructura especializada, protocolos adecuados y disponibilidad de equipos de resonancia magnética. Estas condiciones pueden limitar su uso en determinados contextos, especialmente cuando se busca desarrollar herramientas accesibles para experimentación, análisis técnico o investigación académica.

En este escenario, resulta pertinente desarrollar un prototipo que aproveche imágenes mamográficas y las integre con un proceso de simulación mesoscópica orientado a la obtención de resultados computacionales. La mamografía, al ser una técnica ampliamente utilizada, puede servir como punto de partida para construir un flujo experimental en el que una región de interés sea seleccionada, procesada y transformada en una entrada compatible con el análisis mediante simulación.

1.2.3. Relación con la imagen médica y la investigación

La DWI ha sido reconocida como un biomarcador de imagen de interés en mama; sin embargo, su uso todavía presenta desafíos relacionados con la variabilidad técnica, los criterios de interpretación y las condiciones de adquisición [7]. Frente a ello, el prototipo propuesto no pretende reemplazar las técnicas clínicas existentes, sino explorar

una alternativa computacional que permita trabajar con mamografías desde un entorno controlado, reproducible y documentado.

De esta manera, el proyecto busca trasladar una propuesta de base investigativa hacia un aplicativo web funcional, capaz de gestionar casos, preparar imágenes, ejecutar procesamiento y presentar resultados de forma organizada. El propósito no es emitir diagnósticos clínicos, sino demostrar la viabilidad técnica de un flujo computacional aplicado a mamografías.

1.2.4. Pertinencia para Ingeniería de Software

Desde el ámbito de la Ingeniería de Software, el proyecto permite aplicar conocimientos relacionados con análisis de requerimientos, diseño de arquitectura, desarrollo web, procesamiento asíncrono, gestión de base de datos, integración de módulos, generación de resultados y validación funcional.

El sistema propuesto no se limita a una interfaz de carga de imágenes, sino que organiza un flujo completo que inicia con la selección o delimitación de una región de interés y finaliza con la presentación de mapas de densidad, métricas numéricas y salidas básicas de consulta o reporte. Esto permite evidenciar competencias propias del desarrollo de software aplicado a un problema biomédico real.

1.2.5. Organización metodológica del desarrollo

Asimismo, el uso de Kanban como metodología de trabajo permite gestionar el desarrollo de manera modular, registrar avances, controlar estados y realizar ajustes progresivos durante la construcción del prototipo. Esta forma de organización resulta adecuada porque el sistema está compuesto por módulos diferenciados, como carga de imágenes, delimitación de ROI, registro de casos, procesamiento en segundo plano, simulación, visualización de resultados y generación de evidencias.

1.2.6. Aporte esperado del proyecto

En síntesis, el proyecto es pertinente porque transforma una propuesta científica en una solución tecnológica funcional, enfocada en demostrar la viabilidad técnica de un flujo computacional aplicado al análisis de mamografías. Su aporte se concentra en la construcción de un prototipo web para fines académicos e investigativos, sin emitir diagnósticos clínicos, sin validar pacientes y sin sustituir la interpretación médica especializada.

El aporte tecnológico consiste en la construcción de un aplicativo web que integra en un mismo entorno la gestión de usuarios, carga de mamografías, delimitación de regiones de interés, preparación de imágenes, ejecución de simulaciones mesoscópicas y presentación de resultados. La solución utiliza una arquitectura distribuida que separa la aplicación web del procesamiento intensivo ejecutado en el servidor universitario.

El prototipo también incorpora procesamiento en segundo plano, almacenamiento privado, trazabilidad de casos, comparación de resultados y generación de reportes. Esta integración transforma un procedimiento que requería ejecutar programas y administrar archivos manualmente en un flujo accesible desde un navegador, reproducible mediante parámetros registrados y susceptible de futuras ampliaciones.

El aporte científico se relaciona con la disponibilidad de un entorno experimental para estudiar el comportamiento de modelos mesoscópicos contruidos a partir de regiones de interés mamográficas. El prototipo permite transformar las intensidades de una ROI en un dominio computacional con obstáculos, ejecutar realizaciones controladas y obtener mapas de concentración y métricas como C_v , τ_C , MDC y MDC*.

La conservación de la ROI, los parámetros, la semilla, las métricas y los resultados facilita la repetición y comparación de experimentos bajo condiciones equivalentes. Esto proporciona una base para futuras investigaciones orientadas a analizar la influencia del procesamiento de imágenes, la configuración del modelo y las características de las ROI sobre los resultados de la simulación.

El aporte científico no consiste en establecer un nuevo indicador clínico ni en validar diagnósticos, sino en proporcionar una herramienta metodológica y reproducible que permita generar evidencia computacional para posteriores estudios en procesamiento de imágenes médicas y simulación mesoscópica.

Tabla 2
Dimensiones de justificación y aporte del proyecto

DIMENSIÓN	JUSTIFICACIÓN
Científica	Proporciona un entorno experimental reproducible para estudiar métricas y mapas derivados de simulaciones mesoscópicas aplicadas a regiones de interés mamográficas.
Tecnológica	Integra una aplicación web, procesamiento en segundo plano, almacenamiento privado y simulación distribuida en una solución funcional y accesible.
Biomédica	Utiliza regiones de interés obtenidas de mamografías como entrada para explorar el comportamiento computacional del modelo construido a partir de sus intensidades.
Ingeniería de Software	Integra requisitos, autenticación, trazabilidad, procesamiento asíncrono, despliegue distribuido y pruebas del sistema.
Metodológica	Aplica Kanban para planificar, priorizar y documentar las actividades realizadas durante el desarrollo modular del prototipo.
Académica	Genera un prototipo funcional con valor investigativo, sin finalidad diagnóstica clínica.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de aplicativo web para el análisis y monitoreo de lesiones mamarias a partir de mamografías, basado en la técnica de simulación mesoscópica propuesta en el trabajo *“Diffusion Simulation on Mammograms: A Technique for Analyzing and Monitoring Breast Tumors”*, con el fin de gestionar el flujo de procesamiento de imágenes y obtener métricas relativas de difusión como apoyo al análisis y a la investigación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos funcionales y no funcionales necesarios para la construcción de un prototipo orientado a la carga de mamografías, delimitación de regiones de interés, ejecución de simulaciones y visualización de resultados comparativos.

- Diseñar y desarrollar un prototipo funcional que integre el flujo de análisis de mamografías, construcción del espacio de simulación, el cálculo de coeficientes relativos de difusión y la presentación de resultados mediante mapas de densidad, métricas numéricas y salidas comparativas.
- Evaluar el desempeño del prototipo mediante pruebas internas y pruebas simuladas, verificando la ejecución del flujo completo de análisis, la generación de mapas de densidad y la coherencia de las métricas obtenidas frente a resultados previos de referencia.

1.4. Alcance del estudio

El presente trabajo de titulación comprende el análisis, diseño y desarrollo de un prototipo de aplicativo web funcional orientado al procesamiento de mamografías y al análisis computacional de lesiones mamarias mediante simulación mesoscópica. El proyecto se enfoca en demostrar la viabilidad técnica y funcional de un flujo de trabajo computacional, sin plantear su uso como sistema de diagnóstico clínico ni como herramienta médica validada para pacientes. El alcance del estudio se organiza en los siguientes componentes:

1.4.1. Alcance funcional:

- Carga de imágenes mamográficas o regiones de interés previamente recortadas.
- Organización de los archivos cargados para mantener trazabilidad por caso.
- Delimitación manual de regiones de interés dentro del aplicativo web cuando se cargue una mamografía completa.
- Confirmación de la región de interés, seguida de la preparación automática de la entrada PGM y del envío del caso a la cola de procesamiento.
- Registro del caso, modalidad de entrada, estado del proceso, archivos asociados y resultados generados.
- Transformación de la ROI confirmada en una entrada compatible con el flujo de simulación mesoscópica.
- Ejecución del proceso de simulación para obtener métricas relativas de difusión.
- Generación de mapas de densidad bidimensionales como salida visual del análisis.
- Presentación de resultados mediante métricas numéricas, mapas generados y salidas básicas de consulta o reporte.

- Comparación básica con resultados previos de referencia, cuando exista información disponible para ello.
- Registro e inicio de sesión de usuarios para mantener separados los casos asociados a cada cuenta.
- Consulta del estado del procesamiento y actualización de la interfaz conforme el caso avanza por las etapas de registro, preparación, espera, procesamiento y finalización.
- Envío de notificaciones por correo electrónico cuando el procesamiento de un caso haya finalizado.
- Eliminación controlada de casos y archivos asociados por parte de su usuario propietario.

1.4.2. Alcance tecnológico:

- Desarrollo del backend y de la lógica web mediante Python y el framework Flask.
- Implementación de la interfaz de usuario mediante HTML, CSS y JavaScript.
- Ejecución de la aplicación web mediante Gunicorn como servidor WSGI dentro de un contenedor Docker.
- Uso de PostgreSQL como base de datos relacional para almacenar usuarios, casos, archivos asociados, estados y métricas de simulación.
- Utilización de Neon como servicio administrado de PostgreSQL para disponer de una base de datos accesible tanto por la aplicación web como por el worker de procesamiento.
- Implementación de una cola de procesamiento propia sobre Redis, mediante la cual la aplicación registra los casos pendientes y el worker los recupera sin bloquear la interacción del usuario.
- Utilización de Upstash como servicio administrado de Redis para permitir la comunicación entre la aplicación web y el worker ejecutado en el servidor universitario.
- Uso de Cloudflare R2 como almacenamiento privado de objetos para conservar mamografías, regiones de interés, entradas PGM, mapas, métricas, reportes y demás archivos asociados a cada caso.

- Integración de Brevo como servicio de correo transaccional para el envío de mensajes relacionados con la recuperación de contraseña y la finalización del procesamiento.
- Implementación de un worker en Python encargado de consumir los casos desde la cola Redis, preparar los archivos requeridos y ejecutar el módulo de simulación.
- Integración de un simulador desarrollado en Julia para construir el dominio mamario, representar los obstáculos derivados de la ROI, ejecutar la dinámica MPC y calcular las métricas correspondientes.
- Contenedorización de la aplicación web y del worker mediante Docker, utilizando Docker Compose para organizar su configuración y ejecución en los entornos correspondientes.
- Preparación de un despliegue distribuido, en el cual la aplicación web se publica mediante un proveedor con soporte para contenedores, mientras el procesamiento Python/Julia se ejecuta en un servidor Linux de la universidad.
- Configuración del worker universitario para utilizar procesamiento por CPU, con un límite previsto de hasta diez núcleos y sin dependencia de aceleración mediante GPU.
- Comunicación con los servicios externos mediante conexiones cifradas y uso de variables de entorno para evitar que las credenciales formen parte del código fuente.
- Uso de GitHub para el control de versiones, gestión de ramas, revisión de cambios y respaldo del repositorio.

1.4.3. Alcance documental y metodológico:

- Definición de requerimientos funcionales y no funcionales del prototipo.
- Diseño y documentación de la arquitectura general mediante diagramas de contexto, módulos, flujo del caso, entidad-relación, estados, secuencia, componentes y despliegue, considerando la distribución entre la aplicación web, los servicios administrados y el worker del servidor universitario.
- Aplicación de la metodología Kanban para organizar el desarrollo modular, registrar avances, controlar estados y evidenciar ajustes durante el proceso.
- Generación de documentación técnica y académica que permita comprender, reproducir y ampliar el prototipo en investigaciones posteriores.

- Elaboración y documentación de pruebas funcionales, de integración, simulación, rendimiento y despliegue, incluyendo evidencias del procesamiento en segundo plano, la conectividad con servicios externos y la generación de resultados.

1.4.4. Exclusiones del proyecto:

- No se realizará diagnóstico clínico ni emisión de criterios médicos sobre pacientes.
- No se validará el sistema con cohortes clínicas amplias ni estudios multicéntricos.
- No se integrará el prototipo con equipos médicos, sistemas PACS, historias clínicas o plataformas hospitalarias.
- No se buscará certificación regulatoria ni autorización para uso clínico.
- No se implementará interpretación automática de evolución clínica de lesiones.
- No se desarrollará una aplicación móvil nativa.

1.4.5. Limitaciones del estudio:

- La evaluación del prototipo se realizará mediante pruebas funcionales, técnicas y simuladas en un entorno controlado, sin incluir validación clínica con pacientes.
- Las métricas y visualizaciones generadas representan resultados computacionales del modelo MPC y no constituyen indicadores diagnósticos ni conclusiones clínicas.
- La validación científica se limita a la comparación con los parámetros, las regiones de interés y los resultados de referencia disponibles en el artículo base y en el programa proporcionado por el tutor.
- El tiempo de procesamiento depende de las dimensiones de la ROI, el número de partículas, los pasos de simulación, las realizaciones configuradas y los recursos disponibles en el servidor.
- El worker se ejecutará mediante CPU y no contempla, dentro del alcance actual, una implementación paralela basada en GPU.
- El despliegue distribuido depende de la conectividad entre la aplicación web, el servidor universitario y los servicios administrados utilizados para base de datos, cola, almacenamiento y correo.
- La disponibilidad del procesamiento dependerá del acceso al servidor universitario, de los permisos asignados al usuario y del estado del contenedor del worker.

- Los servicios administrados utilizados poseen cuotas y condiciones asociadas a sus respectivos planes, por lo que el prototipo no garantiza alta disponibilidad, escalamiento automático ni acuerdos de nivel de servicio propios de un sistema clínico en producción.
- Se dispone de un único worker de procesamiento, por lo que varios casos enviados simultáneamente pueden permanecer en cola hasta que existan recursos disponibles.
- La seguridad implementada corresponde al alcance de un prototipo académico y no sustituye una evaluación formal de ciberseguridad, protección de datos médicos o cumplimiento regulatorio.
- Futuras investigaciones podrán ampliar la validación científica, optimizar el simulador, incorporar paralelización y evaluar el comportamiento del sistema con un mayor número de casos.

En síntesis, el alcance del proyecto se centra en construir un prototipo web funcional, modular y documentado que permita registrar usuarios y casos, preparar regiones de interés, ejecutar simulaciones mesoscópicas y presentar resultados computacionales de manera organizada. La solución adopta un despliegue distribuido en el que la aplicación web, los servicios administrados y el worker de procesamiento colaboran mediante conexiones externas controladas. Su aporte principal consiste en demostrar la viabilidad técnica del flujo propuesto como herramienta académica e investigativa, sin atribuir a sus resultados una finalidad diagnóstica o clínica.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Cáncer de mama y análisis por imágenes

2.1.1. Cáncer de mama, detección temprana y análisis por imágenes

El cáncer de mama es una enfermedad de alta relevancia en salud pública, por lo que su detección temprana y tratamiento oportuno constituyen aspectos fundamentales para mejorar los resultados clínicos. La Organización Mundial de la Salud señala que la mortalidad por cáncer de mama puede reducirse cuando los casos se detectan y tratan en etapas tempranas; además, distingue dos componentes principales en este proceso: el diagnóstico temprano y el tamizaje mediante mamografía en población aparentemente sana [8].

En este contexto, las técnicas de imagen médica cumplen un papel importante, ya que permiten observar estructuras internas del tejido mamario, identificar alteraciones visibles y orientar el análisis de regiones específicas. Para el presente trabajo, el interés se centra en el uso de imágenes mamográficas como punto de partida para un flujo computacional de análisis, sin que ello implique diagnóstico clínico automático ni sustitución de la interpretación médica especializada.

2.1.2. Mamografía como técnica de imagen médica y fuente de información morfológica

La mamografía es una técnica basada en rayos X que permite obtener imágenes internas de la mama. De acuerdo con el Instituto Nacional del Cáncer, la mamografía constituye una de las pruebas estándar utilizadas en el tamizaje del cáncer de mama y permite representar estructuras internas del tejido mediante una imagen radiográfica [9].

Su utilidad radica en que ofrece información morfológica de la mama, como densidades, masas, calcificaciones, asimetrías o cambios visibles en la estructura del tejido. Esta información resulta útil para la evaluación inicial de lesiones mamarias; sin embargo, se encuentra relacionada principalmente con la apariencia visual de la imagen y no con propiedades funcionales internas del tejido.

Una de las limitaciones de la mamografía se presenta en casos de tejido mamario denso, debido a que tanto el tejido denso como algunas alteraciones pueden aparecer

como zonas blancas en la imagen, lo que puede dificultar su interpretación. Esta condición evidencia que, aunque la mamografía es una técnica relevante, su análisis puede requerir herramientas complementarias o enfoques computacionales que permitan trabajar de manera más específica sobre regiones de interés [10].

2.1.3. Técnicas de difusión y análisis funcional del tejido mamario

A diferencia de la mamografía, que se enfoca principalmente en características morfológicas, la resonancia magnética ponderada por difusión permite analizar propiedades funcionales del tejido. Esta técnica mide el movimiento de las moléculas de agua y proporciona información relacionada con la densidad celular y la microestructura tisular. En estudios de mama, la DWI ha sido explorada como técnica complementaria para mejorar la evaluación de lesiones, analizar respuesta a quimioterapia neoadyuvante y apoyar protocolos de imagen sin contraste [11].

El coeficiente aparente de difusión se deriva de este tipo de estudios y constituye una métrica cuantitativa asociada a la movilidad del agua en el tejido. No obstante, su obtención depende de equipos de resonancia magnética, protocolos específicos y criterios técnicos de adquisición e interpretación. Por ello, desde un enfoque investigativo, resulta pertinente explorar alternativas computacionales que permitan trabajar con imágenes más accesibles, como la mamografía, para generar salidas técnicas relacionadas con el comportamiento simulado de una región de interés.

2.1.4. Región de interés y preparación de imágenes para análisis computacional

La región de interés, conocida como ROI por sus siglas en inglés, corresponde a una zona específica de una imagen seleccionada para concentrar el análisis. En el procesamiento de imágenes científicas, esta delimitación permite reducir el área de trabajo, enfocar el cálculo sobre una región relevante y mantener una relación directa entre la imagen de entrada y los resultados generados.

Herramientas de análisis de imágenes como ImageJ han sido ampliamente utilizadas en ciencias biológicas y físicas para visualizar, procesar y analizar datos de imagen. Su uso demuestra la importancia de contar con mecanismos que permitan manipular imágenes, seleccionar regiones, aplicar operaciones de procesamiento y generar resultados cuantificables dentro de un flujo reproducible [12].

En el caso del prototipo propuesto, la ROI cumple un papel central, ya que será la entrada principal del proceso de simulación mesoscópica. El sistema permitirá dos caminos: cargar una ROI previamente recortada o cargar una mamografía completa para delimitar manualmente la región dentro del aplicativo web. Luego, la ROI confirmada será registrada, preparada y enviada al procesamiento correspondiente.

Tabla 3
Comparación entre enfoques de análisis por imágenes

ENFOQUE	TIPO DE INFORMACIÓN	LIMITACIÓN	RELACIÓN CON EL PROTOTIPO
Mamografía	Morfológica; permite observar estructuras internas de la mama.	Puede presentar limitaciones en tejido mamario denso.	Imagen de entrada para la selección o delimitación de la ROI.
DWI	Funcional; permite analizar la difusión del agua en el tejido.	Requiere resonancia magnética, protocolos específicos e interpretación especializada.	Base conceptual para comprender las métricas de difusión.
Simulación MPC	Computacional; permite generar métricas relativas a partir de una ROI.	No equivale a una medición clínica directa de difusión.	Núcleo experimental del prototipo propuesto.

2.2. Difusión en tejidos biológicos

2.2.1. Concepto de difusión en el tejido biológico

Difusión es un fenómeno físico relacionado con el movimiento aleatorio de moléculas dentro de un medio. En los tejidos biológicos, este comportamiento se asocia principalmente al desplazamiento de moléculas de agua en espacios intra y extracelulares, el cual puede estar condicionado por la densidad celular, la organización del tejido y la presencia de estructuras que limitan o facilitan dicho movimiento [13].

En imagen médica, el estudio de la difusión permite obtener información funcional sobre la microestructura de los tejidos, ya que el movimiento del agua puede reflejar cambios internos que no siempre son evidentes en imágenes morfológicas. Le Bihan e Iima señalan que la resonancia magnética de difusión permite explorar características biológicas del tejido a partir del comportamiento del agua, lo que explica su utilidad en diferentes áreas de investigación médica [14].

Para esta tesis, el concepto de difusión es relevante porque permite comprender el fundamento teórico detrás del análisis funcional del tejido. Sin embargo, el prototipo propuesto no mide directamente la difusión mediante resonancia magnética, sino que organiza un flujo computacional orientado a generar métricas relativas a partir de una ROI obtenida desde una mamografía.

2.2.2. Resonancia magnética ponderada por difusión

La resonancia magnética ponderada por difusión, conocida como DWI por sus siglas en inglés, es una técnica que permite representar diferencias en el movimiento de moléculas de agua dentro de los tejidos. En el estudio de la mama, esta técnica ha sido considerada una herramienta complementaria porque puede aportar información asociada a la celularidad, la microestructura y el comportamiento interno de una lesión [15].

A diferencia de la mamografía, que ofrece principalmente información morfológica, la DWI se orienta hacia el análisis funcional del tejido. Esta diferencia es importante para el presente trabajo, ya que permite distinguir entre una imagen que muestra la apariencia estructural de la lesión y una técnica que estudia el comportamiento del agua dentro del tejido.

No obstante, la aplicación de DWI depende de equipos de resonancia magnética, protocolos técnicos específicos y criterios de adquisición e interpretación. Por ello, aunque constituye una técnica relevante en investigación biomédica, su disponibilidad puede estar limitada por condiciones tecnológicas, económicas u operativas.

2.2.3. Coeficiente aparente de difusión

El coeficiente aparente de difusión, conocido como ADC, es una métrica cuantitativa derivada de la resonancia magnética ponderada por difusión. Esta medida representa el grado de movilidad del agua dentro del tejido y ha sido utilizada en estudios

orientados a diferenciar características de lesiones mamarias mediante imágenes de difusión [16].

En términos generales, los valores de ADC pueden variar según la composición y organización del tejido evaluado. Cuando el movimiento del agua se encuentra restringido, los valores pueden ser menores; mientras que en tejidos con mayor libertad de movimiento, los valores pueden ser más elevados. Sin embargo, esta métrica depende de factores como el protocolo de adquisición, el equipo utilizado, la delimitación de la región analizada y los criterios de procesamiento.

En el contexto de esta tesis, el ADC se utiliza como referencia conceptual para comprender la importancia de las métricas de difusión. El prototipo no calcula un ADC clínico ni genera resultados equivalentes a una resonancia magnética; su propósito es obtener métricas relativas derivadas de un proceso de simulación mesoscópica, interpretadas únicamente como resultados técnicos del modelo computacional.

2.2.4. Relación entre difusión y análisis computacional

El análisis de difusión ha adquirido importancia en la imagen médica porque permite estudiar propiedades funcionales del tejido que no siempre se observan mediante imágenes estructurales. A partir de este principio, diferentes investigaciones han considerado la DWI como un biomarcador de imagen con potencial para apoyar estudios oncológicos, siempre que se tomen en cuenta aspectos de estandarización, adquisición y análisis de datos [17].

Con base en este fundamento, el presente proyecto plantea una aproximación computacional que utiliza mamografías como punto de partida. La finalidad no es reemplazar la DWI ni reproducir directamente una medición clínica de resonancia magnética, sino estructurar un flujo experimental donde una ROI mamográfica sea preparada, procesada y convertida en resultados visuales y numéricos.

De esta manera, la difusión funciona como el fundamento teórico que conecta el análisis de imágenes con la simulación mesoscópica. La ROI seleccionada en el aplicativo web se convierte en la entrada del proceso, mientras que las métricas relativas y los mapas de densidad constituyen las salidas principales del prototipo. Este enfoque permite demostrar la viabilidad técnica de un flujo reproducible, trazable y orientado a investigación.

Tabla 4
Conceptos asociados a la difusión

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	USO DENTRO DEL PROTOTIPO
Difusión	Movimiento de moléculas dentro de un medio biológico.	Fundamento teórico para comprender el análisis funcional del tejido.
DWI	Técnica de resonancia magnética ponderada por difusión que permite observar diferencias en el movimiento del agua dentro de los tejidos.	Referencia conceptual para comprender el estudio de la movilidad del agua en el tejido.
ADC	Valor cuantitativo obtenido a partir de DWI que refleja qué tan restringido o libre es el movimiento del agua dentro del tejido analizado.	Referencia conceptual para comprender las métricas de difusión; el prototipo no calcula ADC clínico ni resultados equivalentes a resonancia magnética.
Métricas relativas	Valores numéricos generados mediante simulación mesoscópica.	Salidas técnicas del prototipo para comparar resultados bajo condiciones controladas.

2.3. Simulación mesoscópica MPC

2.3.1. Fundamentos de la simulación mesoscópica

La simulación mesoscópica corresponde a un enfoque computacional ubicado entre los modelos microscópicos y los modelos macroscópicos. A diferencia de una simulación microscópica, que representa con alto detalle el comportamiento individual de las partículas, y de una simulación macroscópica, que describe el sistema mediante ecuaciones continuas, el enfoque mesoscópico permite representar fenómenos colectivos mediante unidades simplificadas de interacción. Esta característica lo convierte en una

alternativa útil cuando se busca analizar procesos de transporte, difusión o dinámica de fluidos sin asumir el costo computacional de una descripción molecular completa.

Dentro de este enfoque se encuentra la dinámica por colisión multipartícula, conocida como MPC por sus siglas en inglés. Este método fue introducido como un modelo mesoscópico para la dinámica de solventes, en el cual un conjunto de partículas se desplaza en un dominio de simulación y posteriormente interactúa mediante eventos colectivos de colisión. La propuesta original permite representar el comportamiento de un medio mediante partículas con posiciones y velocidades continuas, actualizadas en pasos discretos de tiempo [18].

En el contexto de esta tesis, la simulación mesoscópica se utiliza como fundamento para construir un proceso computacional aplicado a una región de interés obtenida desde una mamografía. El propósito no es reproducir de manera exacta la física completa del tejido mamario, sino generar una representación técnica que permita estudiar, desde un modelo computacional, el comportamiento relativo de partículas dentro de una región derivada de la imagen.

2.3.2. Dinámica por colisión multipartícula

La dinámica por colisión multipartícula se basa en una secuencia alternada de dos etapas principales: propagación y colisión. En la etapa de propagación, las partículas se desplazan dentro del dominio de simulación de acuerdo con sus velocidades. Posteriormente, en la etapa de colisión, el dominio se divide en celdas y las partículas ubicadas dentro de cada celda modifican sus velocidades mediante una operación colectiva. Esta dinámica conserva propiedades relevantes del sistema, como masa, cantidad de movimiento y, según la variante utilizada, energía [19].

La escala de las velocidades iniciales se determina a partir de la energía térmica y la masa de cada partícula:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

En la propagación libre, la nueva posición es la posición anterior más el desplazamiento producido por la velocidad durante el paso temporal:

$$r_i(t + \tau) = r_i(t) + v_i(t)\tau$$

Durante la colisión se calcula primero la velocidad media de las partículas que se encuentran en la misma celda:

$$u_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} m_i v_i}{\sum_{i=1}^{N_c} m_i}$$

Luego, la velocidad relativa de cada partícula se rota un ángulo α alrededor de la velocidad media de la celda:

$$v'_i = u_c + R(\pm\alpha)[v_i - u_c]$$

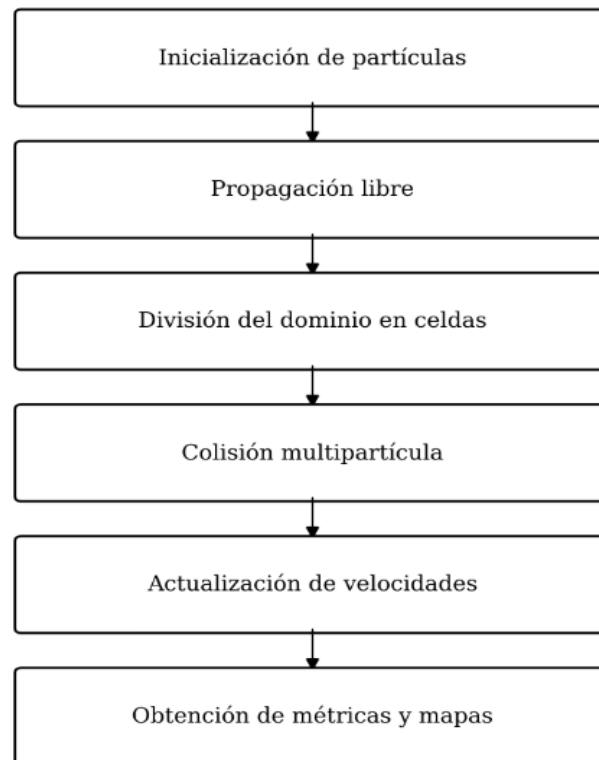
Cuando una partícula alcanza un obstáculo o el límite de la ROI, la componente normal de su velocidad se invierte mediante la siguiente reflexión:

$$v'_i = v_i - 2(v_i \cdot n)n$$

En estas expresiones, τ es el paso temporal, N_c es el número de partículas de la celda, u_c es su velocidad media, R es la rotación de la colisión y n es el vector normal de la superficie de rebote.

La utilidad de MPC radica en que permite representar interacciones colectivas sin calcular directamente todas las fuerzas entre partículas, como ocurre en métodos moleculares más detallados. Esto reduce el costo computacional y facilita la simulación de sistemas donde interesa observar fenómenos de transporte, dispersión o difusión. Por esta razón, MPC ha sido utilizado en investigaciones relacionadas con fluidos complejos, partículas suspendidas y medios con estructuras internas.

Para el prototipo desarrollado, esta dinámica permite construir una simulación en la que las partículas se desplazan dentro de una región preparada a partir de la ROI mamográfica. Las colisiones multipartícula permiten obtener información sobre la evolución del movimiento dentro del dominio, lo que posteriormente se utiliza para generar métricas relativas y salidas visuales del proceso.

Ilustración 1**Secuencia básica de la dinámica por colisión multipartícula****2.3.3. Caja plana de simulación y obstáculos cilíndricos**

En una simulación MPC, el dominio computacional define el espacio donde las partículas se desplazan e interactúan. Este dominio puede adoptar distintas formas según el problema que se desea representar. En el caso del prototipo propuesto, la región de interés confirmada se transforma en una caja plana de simulación, donde la información de intensidad de la imagen se utiliza como base para construir una representación simplificada del tejido.

La representación mediante una caja plana permite trabajar con una entrada bidimensional derivada de la mamografía, manteniendo una relación directa entre la imagen original y el espacio de simulación. Dentro de esta caja se incorporan obstáculos cilíndricos, los cuales actúan como elementos que modifican el desplazamiento de las partículas. Estos obstáculos no deben interpretarse como estructuras anatómicas exactas, sino como una abstracción computacional basada en la información de la imagen.

El uso de dominios con restricciones u obstáculos es compatible con el análisis de transporte en medios complejos, ya que permite estudiar cómo la presencia de barreras modifica el movimiento de partículas dentro de un espacio determinado. En

investigaciones sobre MPC aplicadas a medios porosos, se ha demostrado que este tipo de metodología puede extenderse para representar flujos en dominios con resistencia o restricciones internas [20].

En el prototipo, los obstáculos cilíndricos se generan a partir de la intensidad de los píxeles de la ROI. De esta forma, las zonas con distintas características visuales dentro de la imagen pueden influir en la configuración del dominio de simulación. Esta transformación permite convertir una entrada mamográfica en un modelo computacional procesable por el simulador.

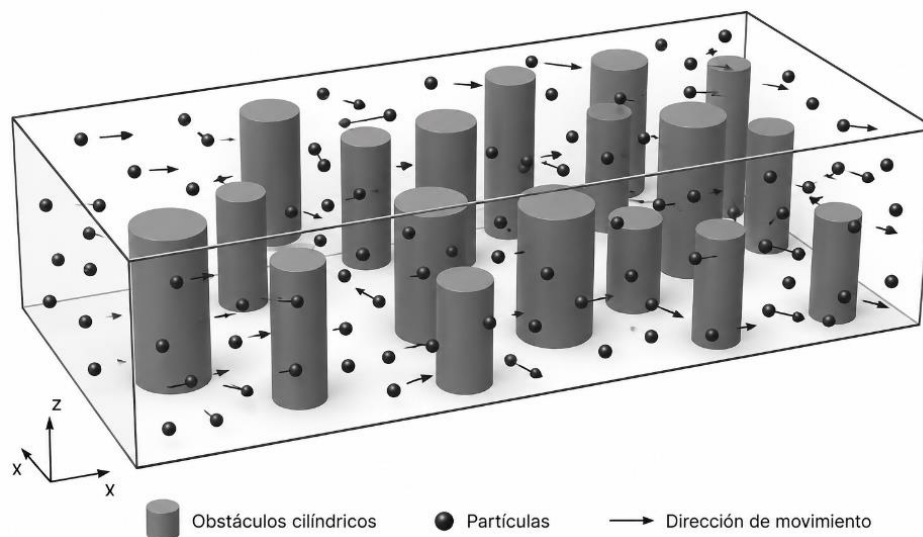
El radio asignado a cada obstáculo se calcula a partir de la intensidad de la celda mediante:

$$r(I) = \frac{a}{2} \left(1 - \frac{I}{I_{max} + 1} \right)$$

donde a es el tamaño de la celda, I es su intensidad e I_{max} es la intensidad máxima del archivo PGM. Por ello, una intensidad menor produce un radio mayor y una intensidad mayor produce un radio menor.

Ilustración 2

Ejemplo conceptual de caja de simulación con obstáculos cilíndricos



Nota. La figura representa un esquema ilustrativo del dominio de simulación y no corresponde a una salida diagnóstica ni a una reconstrucción anatómica real.

2.3.4. Autocorrelación de velocidades y tiempo característico

La autocorrelación de velocidades, representada como C_v , permite evaluar cuánto se conserva el movimiento inicial de las partículas conforme avanza la simulación. Para calcularla, se selecciona un conjunto de partículas etiquetadas y se compara su velocidad inicial con la velocidad observada después de diferentes intervalos de tiempo. Los valores obtenidos se promedian entre las partículas, los tiempos iniciales considerados y las realizaciones ejecutadas, lo que reduce la influencia de las variaciones aleatorias propias del modelo.

Esta comparación se expresa como el promedio del producto punto entre la velocidad inicial y la velocidad observada después de un intervalo t :

$$C_v(t) = \langle v(t_0) \cdot v(t_0 + t) \rangle$$

Los corchetes angulares representan el promedio entre partículas etiquetadas, tiempos iniciales y realizaciones. Para comparar la forma de la curva, C_v se divide para su valor inicial:

$$C_v^N(t) = \frac{C_v(t)}{C_v(0)}$$

El valor de C_v se normaliza respecto de su valor inicial, por lo que la curva comienza cerca de uno. Una disminución rápida hacia cero indica que las colisiones y los rebotes hicieron que las partículas perdieran pronto la memoria de su movimiento inicial. Por el contrario, una disminución más lenta representa una mayor persistencia del movimiento. Las funciones de correlación temporal permiten relacionar la dinámica de las partículas con propiedades de transporte mediante el enfoque de Green-Kubo [21]. En fluidos simulados mediante MPC, estas correlaciones también dependen de la dinámica colectiva y de las condiciones establecidas para la simulación [22].

A partir de la caída inicial de C_v , el prototipo estima el tiempo característico, τ_C , mediante un ajuste exponencial. Un valor menor de τ_C representa una pérdida más rápida de la dirección inicial, mientras que un valor mayor indica que el movimiento conserva esa dirección durante más tiempo. Tanto C_v como τ_C son resultados técnicos del modelo y no indicadores clínicos.

El ajuste utilizado para estimar el tiempo característico se representa de forma simplificada como:

$$C_v^N(t) \approx e^{-t/\tau_c}$$

Cuando t es igual a τ_c , el ajuste ha descendido aproximadamente a $1/e$ de su valor inicial.

2.3.5. Coeficiente de difusión mesoscópico y normalización

El coeficiente de difusión mesoscópico, denominado MDC en el prototipo, resume la movilidad calculada de las partículas dentro del dominio simulado. Su obtención se basa en la acumulación numérica de los valores de la autocorrelación de velocidades a lo largo del tiempo, siguiendo la relación de Green-Kubo. De esta forma, MDC integra en un solo valor el comportamiento temporal representado por C_v .

La relación continua entre la autocorrelación y el coeficiente de difusión se expresa como:

$$\text{MDC} = \frac{1}{d} \int_0^T C_v(t) dt, d = 2$$

Como la simulación registra valores discretos, el prototipo aproxima esta integral mediante la regla del trapecio:

$$\text{MDC} \approx \frac{\tau}{d} \left[\frac{C_v(0)}{2} + \sum_{k=1}^{K-1} C_v(k\tau) + \frac{C_v(K\tau)}{2} \right]$$

En estas expresiones, $d=2$ corresponde a las direcciones x e y analizadas, τ es el paso temporal y K es el último intervalo considerado.

El resultado depende de las características del dominio, los obstáculos derivados de la imagen y los parámetros utilizados en la simulación. Los estudios sobre fluidos modelados mediante MPC muestran que la difusión puede variar según la configuración del sistema, las colisiones y las correlaciones presentes entre las partículas [23].

El prototipo también calcula MDC_0 , que funciona como una referencia teórica para un espacio ideal sin obstáculos. Este valor se obtiene a partir de los parámetros generales del modelo, como la densidad media de partículas, la energía térmica, la masa

y el paso temporal. Posteriormente se calcula el coeficiente normalizado mediante la siguiente relación:

La referencia libre utilizada por el simulador se calcula mediante:

$$\text{MDC}_0 = \frac{k_B T \tau}{2m} \left(\frac{2n_0 + 1 - e^{-n_0}}{n_0 - 1 + e^{-n_0}} \right)$$

donde n_0 es la densidad media de partículas, $k_B T$ es la energía térmica, m es la masa y τ es el paso temporal.

$$\text{MDC}^* = \frac{\text{MDC}}{\text{MDC}_0}$$

Un MDC^* cercano a uno representa una movilidad próxima a la referencia libre, mientras que un valor menor indica una movilidad más restringida por los obstáculos del dominio. Esta comparación facilita analizar casos ejecutados bajo una misma configuración, pero no equivale a un coeficiente clínico obtenido mediante técnicas de imagen médica.

Cuando se ejecutan varias realizaciones, el sistema calcula el promedio, la desviación estándar y el error estándar de MDC y MDC^* . El promedio resume el resultado general, la desviación estándar muestra cuánto variaron las realizaciones y el error estándar expresa la incertidumbre del promedio calculado.

Para R realizaciones con resultados x_r , estas medidas se obtienen mediante:

$$\bar{x} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R x_r$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^R (x_r - \bar{x})^2}{R - 1}}$$

$$\text{SE} = \frac{s}{\sqrt{R}}$$

Aquí, $\bar{x}$ es el promedio, s es la desviación estándar y SE es el error estándar.

2.3.6. Procedimiento para la obtención de los resultados principales

La obtención de los resultados principales sigue un procedimiento ordenado que relaciona la ROI, la configuración del modelo y las salidas generadas:

- Preparación de la ROI. La región confirmada se convierte a escala de grises y se genera una máscara para separar el tejido considerado válido del fondo externo.
- Construcción del dominio. Cada posición válida de la ROI se representa como una celda de la caja plana de simulación. Las regiones excluidas por la máscara no participan en el movimiento de las partículas.
- Generación de obstáculos. La intensidad de cada celda se transforma en el radio de un obstáculo cilíndrico. Los tonos más oscuros producen radios mayores y los tonos más claros radios menores, de acuerdo con la relación adoptada por el modelo.
- Inicialización de partículas. Las partículas se distribuyen en el dominio según la densidad media configurada. Sus posiciones y velocidades iniciales se generan utilizando los parámetros del modelo y una semilla que permite repetir la simulación bajo condiciones equivalentes.
- Ejecución de la dinámica MPC. En cada paso se realiza el desplazamiento de las partículas, se controlan los rebotes contra obstáculos y límites de la ROI, y se actualizan las velocidades mediante la regla de colisión multipartícula. El proceso se repite durante la cantidad de pasos y realizaciones configuradas.
- Generación de mapas. El número de partículas presentes en cada celda se registra en los tiempos definidos. Estos valores se convierten en mapas de concentración que conservan la forma del dominio mamario utilizado.

La concentración de una celda c en el instante t corresponde al número de partículas ubicadas dentro de ella:

$$N_c(t) = \#\{i: r_i(t) \in c\}$$

Las zonas resaltadas en rojo cumplen el criterio de concentración alta definido por:

$$N_c(t) > 2n_0$$

Este umbral señala una acumulación computacional de partículas y no una clasificación clínica.

- Cálculo de métricas. Las partículas etiquetadas permiten obtener C_v y estimar τ_C . A partir de C_v se calcula MDC, se obtiene la referencia MDC0 y finalmente se determina MDC*.
- Consolidación de resultados. Los valores de las realizaciones se promedian y se calculan sus medidas de variación. Las métricas, mapas y parámetros quedan almacenados para su consulta, comparación y presentación en el reporte.

Este procedimiento permite conservar la relación entre la entrada, los parámetros y las salidas generadas. Por ello, una ejecución puede repetirse bajo condiciones equivalentes, aunque sus resultados representan únicamente el comportamiento computacional del modelo.

Tabla 5
Elementos del modelo MPC aplicado en el prototipo

ELEMENTO	REPRESENTACIÓN EN EL PROTOTIPO
ROI de entrada	Región en escala de grises utilizada para construir el modelo.
Máscara del dominio	Separación entre el tejido válido y el fondo externo.
Caja de simulación	Dominio plano compuesto por las celdas válidas de la ROI.
Partículas MPC	Elementos móviles distribuidos dentro del dominio.
Obstáculos cilíndricos	Restricciones cuyos radios se derivan de las intensidades.
Traslación y colisión	Etapas que actualizan la posición y velocidad de las partículas.
C_v	Autocorrelación de velocidades, es la memoria normalizada del movimiento de las partículas.
τ_C	Tiempo característico estimado a partir de la caída de C_v .
MDC	Coeficiente de difusión mesoscópico que resume la movilidad de las partículas y se calcula a partir de la acumulación temporal de C_v .
MDC0	Referencia teórica correspondiente a un espacio sin obstáculos.
MDC*	Relación normalizada entre MDC y MDC0.

Realizaciones	Ejecuciones independientes utilizadas para promediar los resultados.
Medidas de variación	Desviación estándar y error estándar entre realizaciones.
Mapas de concentración	Distribución de partículas por celda en tiempos determinados.

2.4. Estado del arte

2.4.1. Análisis de difusión en lesiones mamarias

Las técnicas de difusión continúan siendo estudiadas por su capacidad para caracterizar el movimiento de las moléculas de agua en el tejido mamario. Una revisión sistemática y metaanálisis publicada en 2024 evaluó protocolos de resonancia magnética sin contraste basados en difusión y encontró resultados favorables para la identificación de lesiones mamarias. Sin embargo, también evidenció una elevada heterogeneidad entre los estudios, asociada con diferencias en los protocolos de adquisición, las poblaciones evaluadas y los procedimientos de interpretación [24].

Estos resultados muestran que el análisis cuantitativo de la difusión requiere condiciones controladas y criterios metodológicos claramente documentados. También evidencian la importancia de conservar información sobre la configuración utilizada, debido a que los valores obtenidos pueden variar entre procedimientos y entornos de ejecución. En este contexto, las métricas clínicas derivadas de imágenes médicas y las métricas generadas mediante simulación computacional deben considerarse magnitudes diferentes y no intercambiables.

La tendencia actual busca complementar las técnicas tradicionales con métodos computacionales que faciliten la experimentación y el análisis reproducible. Estas alternativas no sustituyen la evaluación clínica, pero permiten estudiar modelos del comportamiento del tejido bajo parámetros definidos y documentar de forma sistemática los resultados obtenidos.

2.4.2. Simulación mesoscópica aplicada a mamografías

La simulación aplicada a imágenes mamográficas ha evolucionado mediante modelos matemáticos, representaciones obtenidas de datos reales y métodos híbridos que combinan imágenes clínicas con estructuras generadas computacionalmente. Van Camp et al. identificaron distintas estrategias para crear modelos virtuales de lesiones e incorporarlas en mamografías o representaciones tridimensionales de la mama. Estas técnicas se han utilizado principalmente para evaluar sistemas de adquisición, algoritmos de procesamiento y procedimientos de detección [25].

Aunque estas investigaciones demuestran la utilidad de transformar imágenes mamográficas en representaciones computacionales, una parte importante de la literatura se concentra en la generación de lesiones virtuales o en la evaluación de tecnologías de imagen. La simulación mesoscópica plantea una perspectiva diferente, debido a que utiliza la información de intensidad de una ROI para construir un dominio artificial en el que se representa el movimiento y la interacción de partículas.

En el prototipo desarrollado, cada zona válida de la ROI contribuye a definir los obstáculos cilíndricos del dominio de simulación. Las partículas se desplazan y colisionan dentro de este espacio, permitiendo calcular mapas y métricas relativas de difusión. Esta representación no constituye una reconstrucción anatómica tridimensional ni pretende reproducir directamente el comportamiento clínico de una lesión, sino ofrecer un modelo computacional controlado para el análisis académico de la región seleccionada.

2.4.3. Brecha identificada y aporte del prototipo

La literatura reciente presenta avances importantes en el análisis de difusión, la simulación de estructuras mamarias y el procesamiento computacional de mamografías. No obstante, con frecuencia estos trabajos se concentran en el modelo matemático, el algoritmo de procesamiento o la precisión de los resultados, sin integrar en una misma solución la gestión de usuarios, la preparación de la ROI, la ejecución del simulador, la conservación de parámetros y la presentación comprensible de las salidas.

Las revisiones de sistemas computacionales aplicados a imágenes mamarias también señalan limitaciones relacionadas con la explicación de los resultados, la reproducibilidad y la evaluación de la confianza del usuario. Gurmessu y Jimma encontraron que la valoración sistemática de la interpretabilidad y confiabilidad todavía

es limitada en las soluciones computacionales estudiadas [26]. Aunque su revisión se concentra en aprendizaje automático, esta dificultad también resulta relevante para otras herramientas de análisis, ya que una salida numérica o visual necesita acompañarse de información que permita comprender su significado y sus restricciones.

La brecha identificada corresponde, por tanto, a la falta de un entorno integrado que conecte la preparación de imágenes mamográficas con una simulación mesoscópica reproducible y con la consulta posterior de resultados. El aporte del prototipo consiste en organizar este proceso dentro de un aplicativo web que mantiene la trazabilidad de los casos, ejecuta el procesamiento de manera desacoplada y presenta mapas, métricas, comparaciones y reportes explicativos.

El aporte principal se encuentra en la integración de componentes científicos y de Ingeniería de Software, no en la creación de un nuevo indicador clínico. El sistema proporciona un entorno académico para ejecutar, documentar y comparar simulaciones bajo condiciones controladas, manteniendo explícita la diferencia entre los resultados computacionales y una interpretación diagnóstica.

2.5. Desarrollo de aplicativos web para procesamiento de imágenes

2.5.1. Aplicaciones web orientadas al procesamiento de datos

Las aplicaciones web permiten centralizar la lógica del sistema en un servidor y facilitar el acceso desde distintos dispositivos mediante un navegador. Este tipo de aplicaciones resulta útil cuando se requiere cargar información, procesar datos, almacenar resultados y permitir la consulta posterior por parte del usuario.

Desde la Ingeniería de Software, el desarrollo de sistemas web debe considerar aspectos como calidad, escalabilidad, usabilidad, mantenimiento y evolución del sistema [27]. En el prototipo propuesto, la aplicación web permite organizar el flujo de carga de mamografías, delimitación de ROI, registro de casos, procesamiento, visualización de resultados y generación de reportes.

2.5.2. Arquitectura cliente-servidor y despliegue distribuido

La arquitectura cliente-servidor separa las funciones de presentación, lógica del sistema y gestión de datos. El cliente permite la interacción del usuario, mientras que el servidor recibe las solicitudes, ejecuta las operaciones correspondientes y coordina el

acceso a los recursos. Esta separación favorece la organización de responsabilidades y permite que los componentes evolucionen de manera independiente [28].

El prototipo utiliza una arquitectura cliente-servidor como modelo principal de interacción. El cliente corresponde a la interfaz web desarrollada con HTML, CSS y JavaScript, ejecutada desde el navegador. El servidor corresponde a la aplicación implementada con Python, Flask y Gunicorn, responsable de la autenticación, gestión de casos, preparación de imágenes, consulta de resultados y comunicación con los servicios externos.

Las simulaciones mesoscópicas no se ejecutan dentro de la solicitud web. La aplicación registra el caso y envía su identificador a una cola Redis. Posteriormente, un worker independiente consume la tarea, ejecuta el simulador Julia y actualiza los estados, métricas y resultados del caso.

En cuanto al despliegue, la solución es distribuida porque sus componentes se ejecutan en infraestructuras diferentes: la aplicación web se encuentra publicada en Render, el worker y el simulador funcionan en el servidor universitario, y la base de datos, la cola, el almacenamiento y el correo se proporcionan mediante servicios administrados. Por tanto, el prototipo combina una arquitectura lógica cliente-servidor con un despliegue distribuido.

2.5.3. Despliegue distribuido y servicios administrados

Un sistema distribuido está conformado por elementos computacionales autónomos que colaboran mediante una red y se presentan ante el usuario como un sistema coherente [29]. En este tipo de despliegue, los componentes no necesitan ejecutarse en una misma máquina, pero deben intercambiar información y coordinar sus operaciones.

El despliegue del prototipo distribuye sus responsabilidades entre diferentes entornos. La aplicación web se ejecuta en un contenedor alojado por un proveedor web, mientras que el worker Python y el simulador Julia se ejecutan en el servidor Linux de la universidad. La persistencia relacional se proporciona mediante Neon, la cola mediante Upstash, los archivos privados mediante Cloudflare R2 y los correos transaccionales mediante Brevo.

Esta distribución no implica una arquitectura de microservicios. El prototipo continúa siendo una aplicación modular con arquitectura cliente-servidor, pero su entorno de ejecución se distribuye entre componentes y servicios administrados. Esto permite asignar el procesamiento científico al servidor universitario y mantener disponible la aplicación web durante las simulaciones. Como contraparte, introduce dependencias de red y la posibilidad de fallos parciales, por lo que requiere conexiones cifradas, comprobaciones de disponibilidad y manejo controlado de errores.

2.6. Tecnologías utilizadas en el prototipo

2.6.1. Python, Flask y Gunicorn

Python se utiliza para desarrollar el backend, gestionar la lógica del aplicativo, acceder a la base de datos y coordinar el procesamiento en segundo plano [30]. Flask funciona como framework web y permite organizar rutas, vistas, formularios y servicios internos mediante una estructura modular [31].

Para ejecutar la aplicación Flask en el entorno de despliegue se utiliza Gunicorn, un servidor HTTP compatible con la interfaz WSGI. Gunicorn administra procesos o trabajadores encargados de atender las solicitudes recibidas, evitando depender del servidor de desarrollo incorporado en Flask [32].

2.6.2. HTML, CSS y JavaScript

HTML, CSS y JavaScript conforman la base de la interfaz web del prototipo. HTML estructura el contenido, CSS define la presentación visual y JavaScript permite agregar interacción en el navegador, como validaciones, selección de archivos y acciones relacionadas con la delimitación de la ROI.

Estas tecnologías forman parte del ecosistema de estándares web utilizados para construir aplicaciones accesibles desde navegadores modernos [33]. En el caso de JavaScript, su base formal se encuentra en la especificación ECMAScript, utilizada como estándar para definir el comportamiento del lenguaje [34].

2.6.3. PostgreSQL y Neon

PostgreSQL se utiliza como sistema de gestión de base de datos relacional para almacenar usuarios, casos, estados, métricas y referencias de archivos. Su modelo relacional permite mantener vínculos entre las entidades y preservar la trazabilidad del procesamiento [35].

En el entorno distribuido, PostgreSQL se proporciona mediante Neon como servicio administrado. La aplicación web y el worker utilizan la misma base de datos mediante conexiones protegidas y agrupadas. Neon emplea PgBouncer para gestionar el agrupamiento de conexiones, lo que reduce la creación repetitiva de conexiones directas a PostgreSQL [36]. Los archivos de imagen no se almacenan dentro de la base de datos; únicamente se registran sus referencias hacia el almacenamiento de objetos.

2.6.4. Redis, Upstash y worker de procesamiento

Redis se utiliza para implementar la cola que comunica la aplicación web con el worker. Las listas de Redis y sus operaciones bloqueantes permiten implementar un patrón productor-consumidor sin que el proceso consumidor deba consultar continuamente si existen tareas nuevas [37].

En el prototipo, la aplicación web agrega el identificador del caso a una lista mediante RPush. El worker espera nuevos elementos mediante BLPOP, recupera el identificador y ejecuta el procesamiento correspondiente. Por esta razón, el sistema utiliza directamente las primitivas proporcionadas por Redis y no depende de la biblioteca RQ.

La cola se aloja en Upstash, un servicio administrado compatible con Redis. La comunicación se realiza mediante TLS, de modo que la transferencia entre los componentes y la base Redis se encuentra cifrada [38]. El worker se ejecuta de forma independiente en el servidor universitario y se encarga de preparar la entrada, invocar el simulador Julia y registrar los resultados obtenidos.

2.6.5. Julia para simulación y cálculo

Julia se utiliza para el módulo de simulación mesoscópica y cálculo de métricas. Este lenguaje está orientado al cómputo científico y numérico, por lo que resulta adecuado para implementar procesos de simulación, manejo de matrices, cálculos iterativos y generación de resultados derivados del modelo MPC [39].

En el prototipo, Julia recibe la ROI convertida a formato PGM, construye el dominio de simulación, ejecuta el proceso de partículas y genera mapas, métricas y archivos de trazabilidad.

2.6.6. Paralelismo mediante hilos de CPU

Un hilo de ejecución representa una secuencia de instrucciones que puede desarrollarse de manera concurrente con otras dentro de un mismo proceso. El uso de varios hilos permite distribuir determinadas operaciones entre los recursos de procesamiento disponibles, lo que puede reducir el tiempo requerido por tareas con un alto costo computacional.

Julia incorpora soporte para programación multihilo y permite dividir las iteraciones de un cálculo entre varios hilos mediante mecanismos como `Threads.@threads`. La cantidad de hilos disponibles puede configurarse al iniciar el programa o mediante la variable de entorno `JULIA_NUM_THREADS` [40].

En el prototipo, esta capacidad se utiliza para ejecutar en paralelo las realizaciones y operaciones compatibles del simulador mesoscópico. La versión desplegada puede utilizar hasta 30 hilos de CPU en el servidor universitario. Sin embargo, esta cantidad no representa necesariamente 30 núcleos físicos ni garantiza una aceleración proporcional, debido a que el rendimiento también depende del algoritmo, el tamaño de la ROI, el acceso a memoria y la parte del procesamiento que puede paralelizarse.

2.6.7. Cloudflare R2

Cloudflare R2 es un servicio de almacenamiento de objetos compatible con la API de Amazon S3 [41]. A diferencia de una base de datos relacional, el almacenamiento de objetos está orientado a conservar archivos y datos no estructurados dentro de contenedores denominados buckets.

El prototipo utiliza un bucket privado para almacenar la mamografía original, la ROI confirmada, la entrada PGM, los mapas, las métricas y los reportes generados. PostgreSQL conserva las referencias de estos objetos, mientras que la aplicación controla su acceso. Esto permite que la aplicación web y el worker compartan los mismos archivos sin depender de una carpeta local común.

2.6.8. Brevo

Brevo se utiliza como servicio de correo transaccional. Este tipo de correo se genera automáticamente como respuesta a una acción o evento del sistema, por ejemplo, una solicitud de recuperación de contraseña o la finalización del procesamiento de un caso [42].

La integración se realiza mediante la API HTTPS de Brevo y un remitente previamente verificado. Las credenciales se mantienen fuera del código fuente mediante variables de entorno. De esta manera, el sistema puede informar al usuario sobre eventos relevantes sin incorporar un servidor de correo propio.

2.6.9. Docker y Docker Compose

Docker permite empaquetar la aplicación y sus dependencias dentro de imágenes reproducibles. El prototipo utiliza una misma imagen base para ejecutar la aplicación Flask con Gunicorn o iniciar el worker Python y el simulador Julia, según el comando asignado al contenedor.

Docker Compose permite declarar los servicios, variables, límites de recursos y comprobaciones de salud [43]. En desarrollo local coordina la aplicación web, PostgreSQL, Redis y el worker. En el despliegue distribuido, el servidor universitario ejecuta únicamente el worker, mientras que PostgreSQL, Redis, almacenamiento y correo se consumen como servicios externos.

2.6.10. GitHub para control de versiones

GitHub se utiliza para alojar el repositorio y gestionar el control de versiones mediante Git. Esto permite registrar cambios, trabajar con ramas asociadas a las tareas de Linear, revisar modificaciones mediante Pull Requests y conservar un historial verificable del desarrollo [44].

Además, el repositorio centraliza los archivos de construcción de las imágenes Docker y la configuración necesaria para el despliegue. Las credenciales de producción no se almacenan en GitHub, sino que se incorporan directamente como variables protegidas en cada entorno.

2.6.11. Render

Render es una plataforma de servicios en la nube que permite desplegar aplicaciones web a partir de un repositorio de código o una imagen Docker. La plataforma proporciona una dirección pública mediante HTTPS, gestión de variables de entorno, registros de ejecución, comprobaciones de salud y mecanismos de despliegue manual o automatizado [45].

En el prototipo, Render aloja la aplicación web desarrollada con Flask y Gunicorn. Esta capa recibe las solicitudes de los usuarios, gestiona la autenticación y presenta los

casos y resultados, mientras que el procesamiento intensivo se mantiene separado en el servidor universitario. Esta distribución evita que la simulación mesoscópica dependa de los recursos disponibles en la instancia web.

2.6.12. GitHub Actions

GitHub Actions es una herramienta de integración y entrega continua incorporada en GitHub. Permite definir flujos de trabajo mediante archivos YAML, los cuales pueden ejecutarse por eventos como la publicación de cambios, la creación de etiquetas o la aprobación de un despliegue. Cada flujo se organiza en trabajos y pasos destinados a ejecutar pruebas, construir artefactos o desplegar aplicaciones [46].

En este proyecto, GitHub Actions automatiza la validación del código, la construcción de la imagen Docker del worker y su publicación en un registro de contenedores. Posteriormente, realiza el despliegue controlado en el servidor universitario y comprueba la disponibilidad de la aplicación web. Las credenciales necesarias se almacenan como secretos del entorno de producción y no forman parte del repositorio.

2.6.13. GitHub Container Registry

GitHub Container Registry es un servicio de GitHub Packages destinado al almacenamiento y administración de imágenes de contenedores Docker y OCI. Las imágenes pueden asociarse con un repositorio, configurarse con permisos de acceso y recuperarse mediante etiquetas o identificadores inmutables denominados digest [47].

En el prototipo, este registro conserva la imagen Docker del worker que contiene Python, Julia y las dependencias del simulador. El servidor universitario descarga la versión identificada por su digest y la ejecuta mediante Docker Compose. De esta manera, se garantiza que la versión desplegada corresponda exactamente con la imagen construida y validada durante el flujo de GitHub Actions.

2.6.14. Herramientas para pruebas de rendimiento y calidad web

Para evaluar el comportamiento de la aplicación web se utilizó k6, una herramienta de pruebas de rendimiento que permite generar solicitudes concurrentes mediante usuarios virtuales y configurar diferentes escenarios de ejecución. k6 recopila métricas como el número de solicitudes atendidas, la duración de las respuestas, los

percentiles de tiempo y la tasa de errores. También permite establecer umbrales para determinar si el sistema cumple los criterios de rendimiento definidos [48].

La calidad de las interfaces se evaluó mediante Lighthouse, una herramienta automatizada disponible en las herramientas de desarrollo de Google Chrome. Lighthouse analiza las páginas web y genera puntuaciones relacionadas con rendimiento, accesibilidad, buenas prácticas y optimización para motores de búsqueda. Sus resultados permiten identificar problemas que podrían afectar la experiencia del usuario y comprobar la calidad general de la interfaz implementada [49].

Tabla 6
Tecnologías utilizadas en el prototipo

TECNOLOGÍA	FUNCIÓN DENTRO DEL PROTOTIPO
Python, Flask y Gunicorn	Backend web y atención de solicitudes HTTP
HTML, CSS y JavaScript	Interfaz e interacción del usuario
PostgreSQL y Neon	Persistencia relacional administrada
Redis y Upstash	Cola de procesamiento productor-consumidor
Julia y multihilo de CPU	Ejecución de la simulación MPC, cálculo de métricas y paralelización del procesamiento mediante hilos de CPU.
Render	Alojamiento y publicación de la aplicación web Flask mediante un contenedor Docker.
GitHub Actions y GitHub Container Registry	Automatización del despliegue, validación de la entrega y almacenamiento de la imagen Docker del worker.
Cloudflare R2	Almacenamiento privado de imágenes y resultados
Brevo	Envío de correos transaccionales
Docker y Docker Compose	Contenedorización y ejecución de componentes
Git y GitHub	Control de versiones y gestión del repositorio
k6 y Lighthouse	Ejecución de pruebas de rendimiento y evaluación de la calidad de las interfaces web.
Linear	Gestión Kanban del proyecto

2.7. Metodología Kanban

2.7.1. Fundamentos de Kanban

Kanban es una metodología orientada a la gestión visual del trabajo y al control del flujo de tareas. Su origen se relaciona con el sistema de producción Toyota, donde se utilizó para organizar procesos bajo principios de producción justo a tiempo, reducción de desperdicios y mejora continua [50].

En términos generales, Kanban permite representar las actividades en un tablero dividido por estados, de modo que cada tarea avance progresivamente desde su planificación hasta su finalización. Esta organización facilita observar el estado del trabajo, identificar bloqueos y controlar la cantidad de tareas en proceso.

2.7.2. Kanban aplicado al desarrollo de software

En el desarrollo de software, Kanban se utiliza para organizar tareas, requisitos, correcciones y entregables mediante un flujo visual. A diferencia de enfoques basados en iteraciones fijas, Kanban permite trabajar de manera continua, priorizando el avance gradual de las tareas y la entrega progresiva de funcionalidades.

Diversos estudios sobre Kanban en software señalan beneficios como mayor visibilidad del trabajo, mejor control del flujo, reducción de tiempos de espera y mejora en la colaboración del equipo [51]. Además, su aplicación en proyectos de software ha mostrado utilidad para organizar actividades, controlar el trabajo en progreso y facilitar el seguimiento de entregables [52].

En este proyecto, Kanban también permitió gestionar los cambios que surgieron durante el desarrollo del prototipo. A medida que se ajustaban módulos, se corregían errores o se incorporaban nuevas necesidades técnicas, las actividades podían reorganizarse dentro del tablero sin perder la trazabilidad del trabajo realizado. Esto facilitó mantener un control ordenado de los avances, cambios y tareas pendientes durante la construcción del sistema.

Tabla 7
Estados Kanban utilizados en el proyecto

ESTADO	SIGNIFICADO
Backlog	Tareas identificadas, pero aún no priorizadas
Por hacer	Tareas listas para iniciar
En progreso	Actividades en desarrollo
En revisión	Tareas terminadas que requieren validación
Completado	Actividades finalizadas y evidenciadas

2.7.3. Linear

En este proyecto, Linear se utiliza como herramienta de apoyo para aplicar Kanban durante el desarrollo del prototipo. A través de esta plataforma se registran tareas, estados de avance, prioridades y evidencias del trabajo realizado. Su uso permite organizar el desarrollo de manera progresiva, facilitando el seguimiento de cada módulo implementado y la relación entre los requerimientos definidos y las actividades ejecutadas.

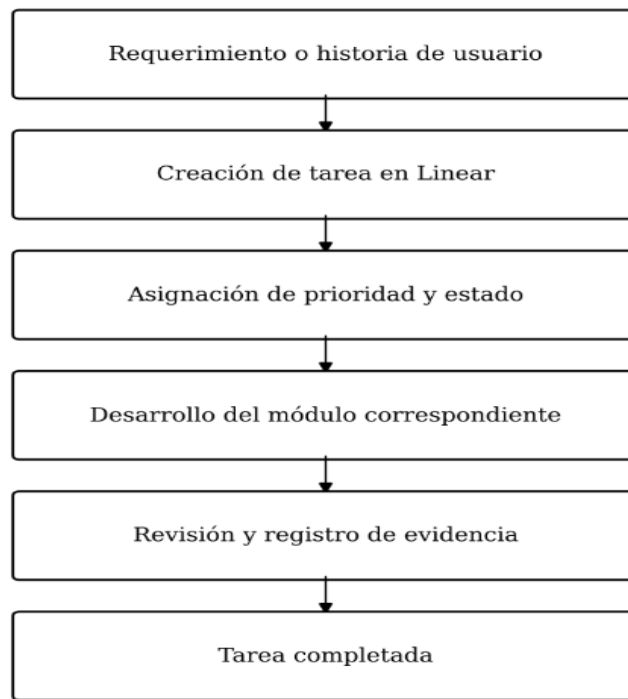
Linear permite organizar los issues mediante flujos de trabajo configurables, donde las tareas pueden avanzar por estados como backlog, por hacer, en progreso, en revisión y completado [53]. Esto permite mantener trazabilidad del desarrollo, documentar avances y evidenciar la gestión modular del prototipo. Además, la plataforma facilita la visualización del trabajo pendiente y del trabajo completado, lo cual resulta útil para controlar el progreso del proyecto y respaldar documentalmente las decisiones tomadas durante la implementación.

En el contexto de este prototipo, Linear no se utiliza únicamente como una herramienta de planificación, sino también como un medio para demostrar la aplicación práctica de Kanban. Cada tarea registrada representa una unidad de trabajo vinculada con algún componente del sistema, como autenticación, carga de imágenes, delimitación de ROI, procesamiento, simulación o visualización de resultados. De esta manera, la herramienta contribuye a mantener un flujo ordenado, verificable y coherente con el desarrollo incremental del prototipo. Asimismo, Linear permitió registrar y reorganizar los cambios realizados durante el desarrollo, manteniendo evidencia de las tareas

modificadas, completadas o ajustadas conforme avanzaba la implementación del prototipo.

Ilustración 3

Flujo de gestión del proyecto en Linear



Capítulo 3

Especificación de requisitos del software

3.1. Descripción general del prototipo

El prototipo desarrollado corresponde a un aplicativo web orientado al análisis computacional de lesiones mamarias a partir de mamografías o regiones de interés previamente seleccionadas. Su funcionamiento se organiza mediante un flujo que permite registrar usuarios, cargar imágenes, gestionar casos, preparar una región de interés y ejecutar una simulación mesoscópica para obtener mapas, métricas y reportes.

El sistema utiliza una arquitectura distribuida compuesta por una aplicación web, una base de datos PostgreSQL administrada, una cola Redis, un almacenamiento privado de objetos, un servicio de correo transaccional y un worker de procesamiento. La aplicación web gestiona la interacción con el usuario, mientras que el worker ejecuta de manera independiente la preparación de imágenes y el simulador desarrollado en Julia. Esta separación evita que las tareas de mayor duración bloqueen la interfaz y permite aprovechar los recursos del servidor universitario.

Los datos estructurados se almacenan en PostgreSQL, mientras que las imágenes originales, las ROI, las entradas de simulación, los resultados y los reportes se conservan en almacenamiento privado. La comunicación entre los componentes utiliza conexiones cifradas y las credenciales se proporcionan mediante variables de entorno, sin incluirlas en el código fuente.

El propósito del aplicativo no es realizar diagnóstico clínico ni reemplazar la interpretación médica especializada. Su finalidad es académica e investigativa y se concentra en demostrar la viabilidad técnica de un flujo computacional reproducible para procesar regiones de interés mamográficas y presentar resultados derivados del modelo implementado.

3.1.1. Objetivo del producto

El objetivo del producto es proporcionar un prototipo web funcional que permita gestionar el análisis computacional de mamografías mediante simulación mesoscópica. Para ello, el sistema permite registrar usuarios, cargar imágenes, delimitar o incorporar una región de interés, almacenar los archivos de cada caso, ejecutar el procesamiento en segundo plano y presentar los resultados de manera organizada.

El producto busca integrar en una sola herramienta la preparación de la imagen, la simulación, el cálculo de métricas, la visualización de mapas y la generación de reportes. Cada usuario puede consultar únicamente sus casos, eliminar aquellos que ya no necesita y recuperar el acceso a su cuenta mediante correo electrónico. Cuando el procesamiento termina correctamente, el sistema puede notificar al propietario del caso.

Este objetivo se mantiene dentro de un enfoque académico. Los resultados generados representan salidas computacionales del modelo y no constituyen diagnósticos, clasificaciones de lesiones ni recomendaciones médicas.

3.1.2. Usuarios previstos

El prototipo contempla tres perfiles de usuario, diferenciados según sus actividades y conocimientos técnicos.

Tabla 8
Características de los usuarios del prototipo

PERFIL	CONOCIMIENTOS	FUNCIONES Y NIVEL DE ACCESO
Usuario final	Manejo básico de aplicaciones web.	Gestiona su cuenta, carga imágenes, confirma la ROI, consulta sus propios casos, revisa resultados y descarga reportes. No puede acceder a información de otros usuarios.
Usuario administrador	Administración de servicios web, bases de datos, contenedores y plataformas en la nube.	Supervisa la aplicación, la cola de procesamiento, el worker, el almacenamiento y los servicios externos. Esta supervisión se

		realiza mediante las plataformas de infraestructura.
Usuario desarrollador	Python, Flask, PostgreSQL, Redis, Julia, Docker, Git y tecnologías web.	Mantiene el código, ejecuta pruebas, corrige errores, administra el despliegue y desarrolla nuevas funcionalidades, protegiendo las credenciales y la privacidad de los casos.

3.2. Alcance funcional del prototipo

El alcance funcional comprende las acciones necesarias para ejecutar el flujo de análisis propuesto. El sistema permite registrar una cuenta, iniciar sesión y cargar una mamografía completa o una región de interés previamente recortada. Cuando se carga una mamografía completa, el usuario puede delimitar manualmente la región que será utilizada en el procesamiento.

Una vez confirmada la ROI, el sistema registra el caso, organiza sus archivos en almacenamiento privado y prepara la entrada requerida por el simulador. El caso se coloca en una cola Redis y es atendido por un worker independiente, encargado de descargar temporalmente los archivos, ejecutar el simulador en Julia, registrar las métricas y publicar los resultados definitivos.

El prototipo también permite consultar el estado de los casos, visualizar mapas y métricas, comparar resultados, descargar un reporte PDF, eliminar casos propios y recuperar la contraseña mediante correo electrónico. Al finalizar correctamente una simulación, el sistema puede informar al usuario que sus resultados están disponibles.

El sistema no incluye diagnóstico automático, clasificación clínica, integración con equipos médicos ni validación clínica con pacientes. Su alcance se limita a una herramienta académica y experimental para el análisis computacional de regiones de interés mamográficas.

3.3. Funcionalidad general del producto

El flujo inicia cuando el usuario accede al aplicativo mediante una cuenta autenticada. Desde la interfaz puede crear un caso, cargar una imagen mamográfica o una ROI y confirmar la región que desea procesar. Los datos del caso se registran en la base de datos y sus archivos se almacenan de manera privada bajo una organización asociada al usuario y al identificador del caso.

Después de confirmar la ROI, la aplicación coloca una tarea en la cola de procesamiento. El worker del servidor universitario obtiene la tarea, recupera los archivos necesarios desde el almacenamiento privado y ejecuta la preparación de la imagen y la simulación mesoscópica. Al finalizar, publica los resultados, actualiza el estado del caso y elimina las copias temporales utilizadas durante la ejecución.

El usuario puede continuar utilizando la aplicación mientras el procesamiento se realiza en segundo plano. Posteriormente, puede consultar los mapas y métricas generados, comparar casos, descargar el reporte PDF o eliminar un caso propio. Cuando el procesamiento termina correctamente, el sistema envía una notificación al correo registrado.

La funcionalidad se organiza en las etapas de autenticación, carga de imagen, confirmación de ROI, almacenamiento privado, envío a cola, procesamiento, simulación, publicación de resultados, notificación y consulta. Esta secuencia mantiene un flujo ordenado, trazable y separado por responsabilidades.

3.4. Restricciones generales del sistema

El prototipo se desarrolla bajo un conjunto de restricciones que delimitan su funcionamiento, alcance y condiciones de uso. Estas restricciones permiten establecer con claridad lo que el sistema puede realizar, las tecnologías de las que depende, la forma en que se organiza su desarrollo y los límites éticos relacionados con el manejo de imágenes mamográficas.

Las restricciones consideradas se agrupan en funcionales, tecnológicas, metodológicas y éticas. Esta clasificación permite mantener una visión ordenada de los límites del prototipo y evita que el sistema sea interpretado como una herramienta clínica validada.

3.4.1. Restricciones funcionales

El sistema se limita a ejecutar un flujo computacional basado en la carga de imágenes, delimitación o incorporación de una ROI, registro del caso, procesamiento, simulación y presentación de resultados. No realiza diagnóstico automático, no clasifica lesiones como benignas o malignas y no genera recomendaciones médicas.

Además, el prototipo depende de que el usuario proporcione imágenes adecuadas para el procesamiento. Si la imagen no cumple con las condiciones necesarias de formato, calidad o delimitación de la ROI, los resultados generados pueden verse afectados. Por esta razón, el sistema debe validar los archivos cargados y controlar los estados del caso durante el flujo de trabajo.

3.4.2. Restricciones tecnológicas

El funcionamiento del prototipo depende de una arquitectura distribuida compuesta por la aplicación web, PostgreSQL administrado, Redis administrado, almacenamiento privado de objetos, correo transaccional y un worker instalado en el servidor universitario. La disponibilidad o los límites de los servicios externos pueden afectar temporalmente el registro de datos, el envío de tareas, la descarga de archivos o las notificaciones.

La aplicación web y el worker se distribuyen mediante contenedores Docker. El servicio web se ejecuta con Gunicorn, mientras que el worker integra Python y Julia para atender la cola y realizar la simulación. El servidor debe disponer de Docker y Docker Compose, conectividad saliente hacia los servicios administrados y recursos de CPU suficientes para las corridas configuradas.

La comunicación con PostgreSQL, Redis, el almacenamiento y el proveedor de correo requiere conexiones cifradas. Las claves de acceso, contraseñas y tokens deben suministrarse mediante variables de entorno privadas. El sistema no debe depender de credenciales incorporadas en el repositorio ni exponer directamente los archivos almacenados.

3.4.3. Restricciones metodológicas

El desarrollo del prototipo se organiza mediante la metodología Kanban, por lo que las actividades se gestionan de manera progresiva a través de tareas, estados y evidencias de avance. Esta organización permite controlar el trabajo realizado, registrar cambios y mantener trazabilidad durante la construcción del sistema.

La validación del prototipo se limita a pruebas funcionales y técnicas dentro de un entorno controlado. Por lo tanto, la evaluación se enfoca en verificar que los módulos funcionen correctamente, que el flujo de procesamiento se ejecute de forma ordenada y que los resultados sean generados conforme a la lógica implementada.

3.4.4. Restricciones éticas y de alcance clínico

El prototipo tiene una finalidad académica e investigativa, por lo que no debe utilizarse como herramienta de diagnóstico clínico. Los mapas, métricas y reportes generados corresponden a salidas técnicas del modelo computacional implementado y no representan conclusiones médicas sobre el estado de una paciente.

Las imágenes utilizadas en el sistema deben manejarse sin datos personales identificables. En caso de trabajar con imágenes reales, estas deben estar anonimizadas y emplearse únicamente con fines de investigación o prueba del prototipo. Esta restricción es necesaria para proteger la privacidad de la información y mantener el alcance del proyecto dentro de un contexto académico.

Además, los archivos de cada caso deben permanecer en almacenamiento privado y solo pueden ser consultados por su usuario propietario. Los enlaces de descarga deben ser temporales y no deben revelar rutas internas ni permitir el acceso permanente a las imágenes. La eliminación de un caso debe retirar tanto su información estructurada como los archivos asociados, siempre que el caso no se encuentre en procesamiento.

3.5. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales describen las acciones que el prototipo debe permitir al usuario y las operaciones necesarias para completar el flujo de análisis. Comprenden la autenticación, carga y validación de imágenes, gestión de casos, delimitación de ROI, almacenamiento privado, procesamiento en segundo plano, simulación, presentación de resultados, recuperación de contraseña, eliminación de casos y envío de notificaciones.

3.5.1. RF-01: Carga de imágenes mamográficas

El sistema debe permitir que el usuario cargue una imagen mamográfica desde la interfaz web. Esta imagen representa la entrada inicial del flujo cuando se desea trabajar con una mamografía completa y posteriormente delimitar una región de interés dentro del aplicativo.

Requisito 1

Requisito funcional 1 (RF-01): Carga de imágenes mamográficas

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-01
Nombre	Carga de imágenes mamográficas
Actor principal	Usuario final
Entrada	Archivo de imagen mamográfica seleccionado por el usuario.
Proceso	El sistema recibe la imagen cargada y la deja disponible para continuar con el flujo de registro y delimitación de ROI.
Salida esperada	Imagen mamográfica cargada correctamente en el sistema.
Prioridad	Alta

3.5.2. RF-02: Validación de archivos cargados

El sistema debe validar los archivos cargados antes de permitir que continúen dentro del flujo del caso. Esta validación permite reducir errores durante el procesamiento y asegurar que el archivo ingresado pueda ser utilizado por el prototipo.

Requisito 2

Requisito funcional 2 (RF-02): Validación de archivos cargados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-02
Nombre	Validación de archivos cargados
Actor principal	Usuario final / Sistema
Entrada	Archivo cargado desde la interfaz web.
Proceso	El sistema verifica que el archivo exista, que tenga un formato permitido y que pueda ser tratado como imagen procesable.
Salida esperada	Archivo aceptado para continuar el flujo o mensaje de error si no cumple las condiciones necesarias.
Prioridad	Alta

3.5.3. RF-03: Registro de caso

El sistema debe permitir registrar un caso asociado a la imagen cargada y al usuario propietario. Este registro permite organizar la información del análisis y mantener trazabilidad desde la carga inicial hasta la generación de resultados.

Requisito 3

Requisito funcional 3 (RF-03): Registro de caso

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-03
Nombre	Registro de caso
Actor principal	Usuario final
Entrada	Datos básicos del caso e imagen o ROI cargada.
Proceso	El sistema crea un nuevo caso, lo asocia al usuario correspondiente y registra su estado inicial dentro de la base de datos.
Salida esperada	Caso creado correctamente y disponible para las siguientes etapas del flujo.
Prioridad	Alta

3.5.4. RF-04: Almacenamiento privado de archivos

El sistema debe almacenar de manera privada la imagen original, la ROI confirmada, la entrada de simulación, los resultados y los reportes asociados a cada caso. Los objetos deben organizarse por usuario y caso, mientras que la base de datos conserva las referencias necesarias para recuperarlos mediante accesos autorizados.

Requisito 4

Requisito funcional 4 (RF-04): Almacenamiento privado de archivos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-04
Nombre	Almacenamiento privado de archivos
Actor principal	Usuario autenticado
Entrada	Imagen original, ROI, entrada de simulación, resultados y reportes asociados a un caso.
Proceso	El sistema almacena los archivos en un espacio privado organizado por usuario y caso, y registra sus referencias en la base de datos.
Salida esperada	Archivos almacenados de forma privada y disponibles únicamente mediante accesos autorizados.
Prioridad	Alta

3.5.5. RF-05: Delimitación o incorporación de ROI

El sistema debe permitir trabajar con una región de interés de dos formas: mediante la delimitación manual sobre una mamografía completa o mediante la incorporación de una ROI previamente recortada. Esta región será la entrada principal para las etapas posteriores de preparación y simulación.

Requisito 5

Requisito funcional 5 (RF-05): Delimitación o incorporación de ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-05
Nombre	Delimitación o incorporación de ROI
Actor principal	Usuario final
Entrada	Mamografía completa para recorte manual o archivo de ROI previamente recortado.
Proceso	El sistema permite seleccionar manualmente una región de interés o aceptar una ROI cargada por el usuario.
Salida esperada	ROI definida y disponible para confirmación dentro del flujo del caso.
Prioridad	Alta

3.5.6. RF-06: Confirmación de ROI

El sistema debe permitir que el usuario confirme la región de interés antes de enviarla al procesamiento. Esta confirmación es necesaria para asegurar que la ROI seleccionada o incorporada sea la que se utilizará como entrada en la simulación mesoscópica.

Requisito 6

Requisito funcional 6 (RF-06): Confirmación de ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-06
Nombre	Confirmación de ROI
Actor principal	Usuario final
Entrada	Región de interés seleccionada o cargada previamente.
Proceso	El sistema muestra la ROI al usuario y permite confirmar que será utilizada en las siguientes etapas del flujo.
Salida esperada	ROI confirmada y asociada al caso correspondiente.
Prioridad	Alta

3.5.7. RF-07: Conversión de ROI a formato PGM

El sistema debe convertir la ROI confirmada a formato PGM, con el fin de generar una entrada compatible con el módulo de simulación. Esta conversión permite transformar la imagen seleccionada en una representación procesable por el simulador.

Requisito 7

Requisito funcional 7 (RF-07): Conversión de ROI a formato PGM

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-07
Nombre	Conversión de ROI a formato PGM
Actor principal	Sistema
Entrada	ROI confirmada por el usuario.
Proceso	El sistema procesa la ROI y la convierte a un archivo PGM compatible con el módulo de simulación.
Salida esperada	Archivo PGM generado y vinculado al caso.
Prioridad	Alta

3.5.8. RF-08: Preparación del espacio de simulación

El sistema debe preparar el espacio de simulación a partir de la ROI procesada. Esta etapa permite construir el dominio computacional donde se representarán las condiciones necesarias para ejecutar la simulación mesoscópica.

Requisito 8

Requisito funcional 8 (RF-08): Preparación del espacio de simulación

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-08
Nombre	Preparación del espacio de simulación
Actor principal	Sistema
Entrada	Archivo PGM generado a partir de la ROI.
Proceso	El sistema prepara los datos de entrada, construye el dominio de simulación y define los elementos necesarios para el procesamiento.
Salida esperada	Espacio de simulación preparado para la ejecución del modelo MPC.
Prioridad	Alta

3.5.9. RF-09: Envío a procesamiento en segundo plano

El sistema debe permitir que el caso sea enviado a procesamiento en segundo plano. Esta funcionalidad evita que la aplicación web se bloquee durante la ejecución de tareas pesadas, como la preparación de datos y la simulación.

Requisito 9

Requisito funcional 9 (RF-09): Envío a procesamiento en segundo plano

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-09
Nombre	Envío a procesamiento en segundo plano
Actor principal	Usuario final / Sistema
Entrada	Caso registrado con ROI confirmada.
Proceso	El sistema envía el caso a una cola de procesamiento para que sea ejecutado por el worker correspondiente.
Salida esperada	Caso enviado correctamente a procesamiento y con estado actualizado.
Prioridad	Alta

3.5.10. RF-10: Ejecución de simulación mesoscópica MPC

El sistema debe ejecutar la simulación mesoscópica MPC a partir de la ROI preparada. Esta etapa constituye el núcleo computacional del prototipo, ya que permite generar resultados técnicos derivados del modelo de simulación.

Requisito 10

Requisito funcional 10 (RF-10): Ejecución de simulación mesoscópica MPC

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-10
Nombre	Ejecución de simulación mesoscópica MPC
Actor principal	Sistema
Entrada	Espacio de simulación preparado y parámetros requeridos por el simulador.
Proceso	El sistema ejecuta el módulo de simulación en Julia y procesa el caso bajo el modelo MPC.
Salida esperada	Simulación ejecutada y archivos de salida generados.
Prioridad	Alta

3.5.11. RF-11: Cálculo de métricas de difusión

El sistema debe calcular métricas técnicas derivadas de la simulación mesoscópica. Estas métricas permiten representar de forma numérica el comportamiento simulado dentro del dominio construido a partir de la ROI.

Requisito 11

Requisito funcional 11 (RF-11): Cálculo de métricas de difusión

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-11
Nombre	Cálculo de métricas de difusión
Actor principal	Sistema
Entrada	Resultados generados por la simulación MPC.
Proceso	El sistema calcula métricas relativas asociadas al comportamiento de las partículas dentro del dominio de simulación.
Salida esperada	Métricas numéricas generadas y asociadas al caso procesado.
Prioridad	Alta

3.5.12. RF-12: Generación de mapas de concentración y densidad

El sistema debe generar mapas visuales a partir de los resultados de la simulación. Estos mapas permiten representar gráficamente la distribución o actividad simulada dentro del dominio computacional.

Requisito 12

Requisito funcional 12 (RF-12): Generación de mapas de concentración y densidad

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-12
Nombre	Generación de mapas de concentración y densidad
Actor principal	Sistema
Entrada	Datos de salida obtenidos de la simulación.
Proceso	El sistema transforma los resultados numéricos en mapas visuales de concentración, densidad o actividad simulada.
Salida esperada	Mapas generados y disponibles para consulta del usuario.
Prioridad	Alta

3.5.13. RF-13: Presentación y entrega de resultados

El sistema debe presentar los resultados generados de manera organizada dentro del aplicativo web. Esta funcionalidad permite que el usuario consulte mapas, métricas y archivos relacionados con el caso procesado.

Requisito 13

Requisito funcional 13 (RF-13): Presentación y entrega de resultados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-13
Nombre	Presentación y entrega de resultados
Actor principal	Usuario final / Sistema
Entrada	Resultados generados por el procesamiento y la simulación.
Proceso	El sistema organiza y muestra los resultados asociados al caso dentro de la interfaz web.
Salida esperada	Resultados visibles y disponibles para revisión por parte del usuario.
Prioridad	Alta

3.5.14. RF-14: Generación de reporte PDF explicativo

El sistema debe generar un reporte PDF con la información principal del caso procesado. Este reporte debe incluir datos del caso, resultados técnicos, mapas generados y una explicación básica de las salidas obtenidas.

Requisito 14

Requisito funcional 14 (RF-14): Generación de reporte PDF explicativo

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-14
Nombre	Generación de reporte PDF explicativo
Actor principal	Usuario final / Sistema
Entrada	Información del caso, métricas y mapas generados.
Proceso	El sistema compila los datos principales del caso y genera un documento PDF explicativo.
Salida esperada	Reporte PDF generado y disponible para descarga.
Prioridad	Media

3.5.15. RF-15: Comparación de casos procesados

El sistema debe permitir la comparación entre casos previamente procesados. Esta funcionalidad facilita revisar diferencias entre métricas y resultados visuales generados bajo condiciones controladas.

Requisito 15

Requisito funcional 15 (RF-15): Comparación de casos procesados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-15
Nombre	Comparación de casos procesados
Actor principal	Usuario final
Entrada	Dos o más casos procesados disponibles en el sistema.
Proceso	El sistema permite seleccionar casos y presentar sus resultados de manera comparativa.
Salida esperada	Comparación de métricas y resultados visuales entre casos procesados.
Prioridad	Media

3.5.16. RF-16: Gestión de estados del caso

El sistema debe gestionar los estados del caso durante todo el flujo de trabajo. Esto permite conocer si un caso se encuentra registrado, pendiente, en procesamiento, completado o con error.

Requisito 16

Requisito funcional 16 (RF-16): Gestión de estados del caso

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-16
Nombre	Gestión de estados del caso
Actor principal	Sistema
Entrada	Acciones realizadas durante el flujo del caso.
Proceso	El sistema actualiza el estado del caso conforme avanza por las etapas de carga, procesamiento, simulación y generación de resultados.
Salida esperada	Estado del caso actualizado y visible para el usuario.
Prioridad	Alta

3.5.17. RF-17: Registro e inicio de sesión de usuarios

El sistema debe permitir el registro e inicio de sesión de usuarios. Esta funcionalidad permite identificar al usuario que accede al aplicativo y asociar los casos procesados a una cuenta específica.

Requisito 17

Requisito funcional 17 (RF-17): Registro e inicio de sesión de usuarios

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-17
Nombre	Registro e inicio de sesión de usuarios
Actor principal	Usuario final
Entrada	Datos de registro o credenciales de acceso.
Proceso	El sistema permite crear una cuenta, validar credenciales e iniciar sesión dentro del aplicativo.
Salida esperada	Usuario registrado o autenticado correctamente en el sistema.
Prioridad	Alta

3.5.18. RF-18: Restricción de casos por usuario propietario

El sistema debe restringir el acceso a los casos según el usuario propietario. Esta funcionalidad permite que cada usuario visualice únicamente los casos asociados a su cuenta, manteniendo separación y control básico de la información.

Requisito 18

Requisito funcional 18 (RF-18): Restricción de casos por usuario propietario

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-18
Nombre	Restricción de casos por usuario propietario
Actor principal	Sistema
Entrada	Usuario autenticado y casos registrados en el sistema
Proceso	El sistema filtra los casos disponibles según el usuario propietario autenticado
Salida esperada	El usuario visualiza únicamente los casos asociados a su cuenta
Prioridad	Alta

3.5.19. RF-19: Eliminación de casos

El sistema debe permitir que el usuario propietario elimine un caso que ya no necesite. Antes de ejecutar la acción debe solicitar una confirmación explícita y verificar que el caso no se encuentre en cola o procesamiento. La eliminación debe retirar el registro y los archivos asociados.

Requisito 19

Requisito funcional 19 (RF-19): Eliminación de casos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-19
Nombre	Eliminación de casos
Actor principal	Usuario propietario del caso
Entrada	Solicitud de eliminación y confirmación explícita del usuario.
Proceso	El sistema verifica la propiedad y el estado del caso antes de eliminar su registro, archivos y resultados asociados.
Salida esperada	Caso eliminado y retirado del listado personal del usuario.
Prioridad	Alta

3.5.20. RF-20: Recuperación de contraseña

El sistema debe permitir que un usuario recupere el acceso a su cuenta mediante el correo electrónico registrado. La solicitud debe generar un enlace temporal que permita establecer una contraseña nueva sin revelar si una dirección específica se encuentra registrada.

Requisito 20

Requisito funcional 20 (RF-20): Recuperación de contraseña

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-20
Nombre	Recuperación de contraseña
Actor principal	Usuario registrado
Entrada	Correo electrónico asociado a la cuenta.
Proceso	El sistema genera un token temporal y envía al usuario un enlace para establecer una contraseña nueva.
Salida esperada	Contraseña actualizada y token invalidado después de su utilización.
Prioridad	Alta

3.5.21. RF-21: Notificación de procesamiento completado

El sistema debe notificar por correo electrónico al propietario cuando el procesamiento de un caso termine correctamente. Si el proveedor de correo no se encuentra disponible, el error debe registrarse sin eliminar los resultados ni revertir el estado completado del caso.

Requisito 21

Requisito funcional 21 (RF-21): Notificación de procesamiento completado

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RF-21
Nombre	Notificación de procesamiento completado
Actor principal	Usuario propietario del caso
Entrada	Finalización correcta del procesamiento de un caso.
Proceso	El sistema envía automáticamente un correo electrónico al propietario para informar que los resultados están disponibles.
Salida esperada	Usuario notificado mediante correo electrónico sin necesidad de mantener abierta la aplicación.
Prioridad	Media

3.6. Requisitos no funcionales

Los requisitos no funcionales establecen las condiciones de calidad, seguridad y operación del prototipo. Incluyen acceso web, modularidad, trazabilidad, reproducibilidad, procesamiento asíncrono, despliegue distribuido, mantenibilidad, privacidad de archivos, manejo de errores, portabilidad, comprobaciones de salud, comunicación cifrada, gestión de secretos y aislamiento de recursos.

3.6.1. RNF-01: Acceso web

El prototipo debe permitir el acceso a sus funcionalidades principales mediante una interfaz web. Esto facilita que el usuario pueda interactuar con el sistema desde un navegador, sin necesidad de instalar aplicaciones adicionales en su equipo.

Requisito 22

Requisito no funcional 1 (RNF-01): Acceso web

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-01
Nombre	Acceso web
Descripción	El sistema debe estar disponible mediante una interfaz web accesible desde un navegador.
Criterio de cumplimiento	El usuario puede ingresar al aplicativo, cargar imágenes, gestionar casos y consultar resultados desde la interfaz web.
Prioridad	Alta

3.6.2. RNF-02: Modularidad

El prototipo debe organizarse en componentes diferenciados para facilitar su desarrollo, comprensión y mantenimiento. Esta división permite separar funciones como interfaz web, lógica del servidor, base de datos, procesamiento en segundo plano y simulación.

Requisito 23

Requisito no funcional 2 (RNF-02): Modularidad

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-02
Nombre	Modularidad
Descripción	El sistema debe estructurarse en módulos independientes según la función que cumple cada componente.
Criterio de cumplimiento	Se identifican módulos separados para interfaz, backend, almacenamiento, worker y simulador Julia.
Prioridad	Alta

3.6.3. RNF-03: Trazabilidad

El sistema debe permitir mantener trazabilidad sobre los casos procesados y las etapas del flujo de trabajo. Esto implica registrar información relacionada con la imagen cargada, la ROI, el estado del caso, los archivos generados y los resultados obtenidos.

Requisito 24

Requisito no funcional 3 (RNF-03): Trazabilidad

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-03
Nombre	Trazabilidad
Descripción	El sistema debe conservar información que permita seguir el recorrido de cada caso dentro del flujo de procesamiento.
Criterio de cumplimiento	Cada caso mantiene relación con su usuario propietario, archivos cargados, ROI, estado, resultados y reporte generado.
Prioridad	Alta

3.6.4. RNF-04: Reproducibilidad

El prototipo debe permitir que los procesos se ejecuten bajo condiciones controladas, de manera que los casos puedan ser procesados siguiendo una misma secuencia técnica. Esto favorece la revisión de resultados y la repetición de pruebas durante la validación funcional.

Requisito 25

Requisito no funcional 4 (RNF-04): Reproducibilidad

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-04
Nombre	Reproducibilidad
Descripción	El sistema debe mantener un flujo de procesamiento ordenado y repetible para los casos ingresados.
Criterio de cumplimiento	Los casos siguen una misma secuencia: carga de imagen, confirmación de ROI, preparación, simulación y generación de resultados.
Prioridad	Alta

3.6.5. RNF-05: Procesamiento asíncrono

El sistema debe ejecutar las tareas pesadas en segundo plano para evitar que la interfaz web se bloquee durante el procesamiento. Esta condición es importante debido a que la simulación mesoscópica y la generación de resultados pueden requerir mayor tiempo de ejecución.

Requisito 26

Requisito no funcional 5 (RNF-05): Procesamiento asíncrono

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-05
Nombre	Procesamiento asíncrono
Descripción	El sistema debe enviar las tareas de procesamiento a una cola para que sean ejecutadas por un worker.
Criterio de cumplimiento	El usuario puede enviar un caso a procesamiento y continuar utilizando la aplicación mientras el worker ejecuta la tarea.
Prioridad	Alta

3.6.6. RNF-06: Entorno distribuido

El prototipo debe ejecutarse mediante componentes independientes y reproducibles. La aplicación web y el worker se despliegan en contenedores separados y se conectan con PostgreSQL, Redis, almacenamiento privado y correo transaccional mediante configuración externa.

Requisito 27

Requisito no funcional 6 (RNF-06): Entorno distribuido

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-06
Nombre	Entorno distribuido
Descripción	El prototipo debe ejecutarse mediante componentes independientes para la aplicación web y el worker de procesamiento, conectados con servicios administrados mediante configuración externa.
Criterio de cumplimiento	La aplicación web y el worker pueden construirse y ejecutarse por separado mediante Docker, utilizando PostgreSQL, Redis y almacenamiento privado configurados mediante variables de entorno.
Prioridad	Media

3.6.7. RNF-07: Mantenibilidad

El sistema debe permitir que su código, estructura y componentes puedan ser revisados, corregidos o ampliados con facilidad. Esta característica es necesaria porque el prototipo puede requerir ajustes durante el desarrollo, pruebas o trabajos futuros.

Requisito 28

Requisito no funcional 7 (RNF-07): Mantenibilidad

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-07
Nombre	Mantenibilidad
Descripción	El prototipo debe organizar su código y componentes de manera clara para facilitar futuras modificaciones.
Criterio de cumplimiento	La estructura del proyecto permite identificar módulos, rutas, archivos de configuración, servicios y componentes del simulador.
Prioridad	Media

3.6.8. RNF-08: Seguridad de archivos

Las mamografías, ROI, entradas de simulación, resultados y reportes deben permanecer en almacenamiento privado. Los archivos deben separarse por usuario y caso, sin exposición pública directa y con descargas autorizadas mediante enlaces temporales.

Requisito 29

Requisito no funcional 8 (RNF-08): Seguridad de archivos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-08
Nombre	Seguridad de archivos
Descripción	Las mamografías, ROI, entradas de simulación, resultados y reportes deben permanecer en almacenamiento privado, separados por usuario y caso.
Criterio de cumplimiento	Los archivos no se exponen públicamente y su descarga requiere que el usuario autenticado sea propietario del caso, utilizando accesos temporales autorizados.
Prioridad	Alta

3.6.9. RNF-09: Gestión de errores

El prototipo debe manejar errores durante las etapas principales del flujo, especialmente en la carga de archivos, confirmación de ROI, procesamiento, simulación y generación de resultados. Esto permite informar al usuario cuando una acción no puede completarse correctamente.

Requisito 30

Requisito no funcional 9 (RNF-09): Gestión de errores

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-09
Nombre	Gestión de errores
Descripción	El sistema debe identificar errores durante el flujo de trabajo y actualizar el estado del caso cuando sea necesario.
Criterio de cumplimiento	El usuario recibe mensajes o estados de error cuando ocurre un problema en la carga, procesamiento o simulación del caso.
Prioridad	Alta

3.6.10. RNF-10: Privacidad y anonimización de casos

El prototipo debe trabajar con imágenes y casos sin datos personales identificables. Debido a que el sistema se relaciona con imágenes mamográficas, es necesario mantener un manejo responsable de la información utilizada durante pruebas o análisis.

Requisito 31

Requisito no funcional 10 (RNF-10): Privacidad y anonimización de casos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-10
Nombre	Privacidad y anonimización de casos
Descripción	El sistema debe utilizar casos e imágenes sin información personal identificable.
Criterio de cumplimiento	Los casos registrados no contienen datos personales de pacientes y las imágenes utilizadas se manejan con fines académicos o de prueba.
Prioridad	Alta

3.6.11. RNF-11: Portabilidad mediante Docker

La aplicación web y el worker deben poder construirse y ejecutarse mediante imágenes Docker compatibles con Linux. La configuración debe mantenerse fuera de las imágenes para que los mismos artefactos puedan utilizarse en desarrollo, pruebas y despliegue.

Requisito 32

Requisito no funcional 11 (RNF-11): Portabilidad mediante Docker

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-11
Nombre	Portabilidad mediante Docker
Descripción	La aplicación web y el worker deben poder construirse y ejecutarse mediante imágenes Docker compatibles con un servidor Linux.
Criterio de cumplimiento	Los servicios pueden construirse desde el repositorio y ejecutarse mediante Docker Compose, utilizando configuración externa sin instalar manualmente las dependencias del aplicativo.
Prioridad	Media

3.6.12. RNF-12: Salud del sistema

El despliegue debe proporcionar mecanismos que permitan comprobar si la aplicación web está activa, si sus dependencias se encuentran disponibles y si el worker continúa operativo. Estas verificaciones facilitan la detección de fallos sin ejecutar manualmente el flujo completo.

Requisito 33

Requisito no funcional 12 (RNF-12): Salud del sistema

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-12
Nombre	Salud del sistema
Descripción	El despliegue debe proporcionar mecanismos para comprobar la actividad de la aplicación web, la disponibilidad de sus dependencias y el funcionamiento del worker.
Criterio de cumplimiento	La aplicación expone comprobaciones de actividad y preparación, mientras que el worker dispone de un healthcheck que permite verificar su estado operativo.
Prioridad	Alta

3.6.13. RNF-13: Comunicación segura

Las comunicaciones entre los componentes desplegados y los servicios externos deben realizarse mediante conexiones cifradas. Esto comprende el acceso a la base de datos, la cola Redis, el almacenamiento privado y el proveedor de correo transaccional.

Requisito 34

Requisito no funcional 13 (RNF-13): Comunicación segura

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-13
Nombre	Comunicación segura
Descripción	Las comunicaciones entre los componentes desplegados y los servicios externos deben utilizar conexiones cifradas mediante TLS.
Criterio de cumplimiento	PostgreSQL utiliza una conexión SSL, Redis emplea el esquema rediss y las comunicaciones con el almacenamiento y el proveedor de correo se realizan mediante HTTPS.
Prioridad	Alta

3.6.14. RNF-14: Gestión de secretos

Las contraseñas, tokens y claves de acceso utilizadas por el prototipo deben mantenerse fuera del código fuente, las imágenes Docker y los registros de ejecución. Los valores deben suministrarse mediante variables de entorno o archivos privados no versionados.

Requisito 35

Requisito no funcional 14 (RNF-14): Gestión de secretos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-14
Nombre	Gestión de secretos
Descripción	Las contraseñas, claves de API, tokens y credenciales de servicios deben mantenerse fuera del código fuente, las imágenes de contenedor y los registros de ejecución.
Criterio de cumplimiento	Los valores sensibles se proporcionan mediante variables de entorno o archivos privados no versionados, y el sistema rechaza configuraciones obligatorias incompletas.
Prioridad	Alta

3.6.15. RNF-15: Aislamiento de recursos

El worker debe ejecutarse de manera independiente a la aplicación web, sin publicar puertos de acceso y con límites configurables de CPU e hilos. En el servidor universitario podrá utilizar hasta 30 hilos autorizados, de acuerdo con la carga disponible y la configuración definida para cada prueba.

Requisito 36

Requisito no funcional 15 (RNF-15): Aislamiento de recursos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	RNF-15
Nombre	Aislamiento de recursos
Descripción	El worker debe ejecutarse de manera independiente a la aplicación web, sin publicar puertos y con límites configurables de recursos para no interferir con otros procesos del servidor.
Criterio de cumplimiento	El contenedor del worker no expone servicios de red, permite configurar hasta 30 hilos de Julia autorizados, utiliza un directorio temporal privado y elimina las copias locales después de publicar los resultados.
Prioridad	Media

3.7. Requisitos comunes de las interfaces

Los requisitos comunes de las interfaces describen la interacción entre el usuario, la aplicación web y los servicios que conforman el despliegue distribuido. Estas interfaces permiten completar el flujo desde el registro de la cuenta y la carga de una imagen hasta el procesamiento, almacenamiento y consulta de resultados.

Las interfaces consideradas comprenden la interfaz web, la comunicación interna entre módulos y la conexión cifrada con PostgreSQL, Redis, almacenamiento privado y correo transaccional. La separación entre componentes permite que el procesamiento se realice en el servidor universitario sin exponer directamente el worker al usuario.

3.7.1. Interfaces de usuario

La interfaz de usuario permite acceder al prototipo desde un navegador sin requerir conocimientos técnicos sobre su funcionamiento interno. Desde ella, el usuario

puede registrarse, iniciar sesión, recuperar su contraseña, cargar una mamografía o ROI, delimitar y confirmar la región de interés, consultar el estado de sus casos, visualizar resultados y descargar reportes.

La interfaz también permite comparar casos propios y eliminarlos mediante una confirmación explícita. Durante el procesamiento muestra estados comprensibles para indicar si un caso está pendiente, en cola, en procesamiento, completado o con error. Los mensajes deben evitar exponer rutas internas, credenciales o detalles técnicos innecesarios.

Tabla 9
Elementos principales de la interfaz de usuario

ELEMENTO DE INTERFAZ	FUNCIÓN DENTRO DEL PROTOTIPO
Pantalla de registro e inicio de sesión	Permite identificar al usuario y asociar los casos a una cuenta específica.
Recuperación de contraseña	Permite solicitar un enlace temporal para establecer una contraseña nueva.
Vista de cuenta	Permite consultar los datos de la cuenta, acceder a los casos propios y solicitar la eliminación definitiva de la cuenta.
Formulario de carga de imágenes	Permite cargar una mamografía completa o una ROI previamente recortada.
Herramienta de delimitación de ROI	Permite seleccionar manualmente la región de interés sobre una mamografía completa.
Vista de confirmación de ROI	Permite revisar y confirmar la región que será enviada a procesamiento.
Vista de casos	Presenta únicamente los casos del usuario autenticado y su estado dentro del flujo.
Eliminación de casos	Permite eliminar un caso propio mediante una confirmación explícita.
Vista de resultados	Muestra mapas, métricas y archivos generados por la simulación.
Opción de reporte PDF	Permite descargar un reporte explicativo con los resultados del caso.

3.7.2. Interfaces de software

El backend Flask se comunica con PostgreSQL para registrar usuarios, casos, estados y referencias de archivos. Para el procesamiento asíncrono utiliza una cola propia sobre Redis basada en operaciones bloqueantes. El worker obtiene las tareas de esta cola, recupera temporalmente los objetos necesarios y ejecuta el simulador Julia.

El almacenamiento privado conserva las imágenes y resultados definitivos, mientras que la base de datos mantiene sus referencias. El servicio de correo transaccional se utiliza para recuperación de contraseña y notificación de casos completados. La aplicación web se ejecuta mediante Gunicorn y el worker se mantiene como un proceso independiente.

Tabla 10
Componentes e interfaces de software del prototipo

COMPONENTE	SE COMUNICA CON	PROPÓSITO
Aplicación web Flask	PostgreSQL administrado	Registrar usuarios, casos, estados, referencias y resultados.
Aplicación web Flask	Redis administrado	Enviar las tareas de simulación a la cola mediante operaciones de escritura.
Redis administrado	Worker	Conservar temporalmente las tareas pendientes y permitir que el worker las recupere mediante una operación bloqueante.
Worker	PostgreSQL administrado	Consultar los casos y actualizar sus estados, métricas y resultados.
Worker	Simulador Julia	Ejecutar la simulación mesoscópica MPC y generar los resultados del procesamiento.
Aplicación web y worker	Almacenamiento privado compatible con S3	Guardar y recuperar mamografías, ROI, entradas de simulación, mapas, resultados y reportes.

Aplicación web y worker	Servicio de correo	Enviar enlaces de recuperación de contraseña y notificaciones cuando finaliza el procesamiento de un caso.
--------------------------------	--------------------	--

3.7.3. Interfaces de comunicación

La interacción del usuario con la aplicación se realiza mediante solicitudes web seguras. Las conexiones con los servicios externos utilizan cifrado: PostgreSQL mediante SSL, Redis mediante TLS y los servicios de almacenamiento y correo mediante HTTPS.

Los archivos no se entregan mediante rutas públicas permanentes. La aplicación comprueba que el usuario sea propietario del caso y genera un acceso temporal cuando corresponde. El worker no publica puertos hacia Internet; únicamente establece conexiones salientes con la cola, la base de datos y el almacenamiento para recibir tareas y publicar resultados.

Tabla 11
Comunicaciones entre componentes y servicios del prototipo

COMUNICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Navegador del usuario - Aplicación web	El usuario interactúa con el prototipo mediante solicitudes web seguras a través de HTTPS.
Aplicación web y worker - PostgreSQL	Se consultan y actualizan usuarios, casos, estados, referencias y resultados mediante una conexión cifrada.
Aplicación web - Redis	Se envían tareas a la cola mediante una conexión TLS.
Redis - Worker	El worker obtiene las tareas pendientes mediante una conexión TLS y una operación bloqueante.
Aplicación web y worker - Almacenamiento privado	Se publican y recuperan objetos mediante una API compatible con S3 sobre HTTPS.
Navegador del usuario - Almacenamiento privado	El usuario autorizado accede a determinados archivos mediante enlaces temporales firmados y conexiones HTTPS.
Worker - Simulador Julia	La simulación se ejecuta dentro del contenedor de procesamiento mediante una invocación local.

Aplicación web - Servicio de correo	Se envían mensajes transaccionales mediante una API HTTPS.
Aplicación web - Navegador del usuario	Se presentan estados, mapas, métricas, reportes y accesos temporales autorizados.

3.8. Matriz de trazabilidad de requisitos y pruebas

La matriz de trazabilidad relaciona los requisitos funcionales y no funcionales con sus fuentes, prioridades, criterios de aceptación, métodos de verificación, evidencias y estados. Su propósito es comprobar que cada requisito definido cuente con una forma concreta de validación y mantener la coherencia entre la especificación, la implementación y las pruebas.

La matriz comprende 22 requisitos funcionales y 15 requisitos no funcionales. Debido a su extensión, se presenta de forma completa en el Anexo A. Matriz de trazabilidad de requisitos y pruebas.

Capítulo 4

Casos de uso del sistema

4.1. Propósito y alcance de los casos de uso

Los casos de uso describen las interacciones observables entre los actores externos y el prototipo web. Su finalidad es representar los objetivos que una persona busca completar mediante la aplicación, desde la creación de una cuenta y el registro de un caso hasta la consulta, comparación, descarga o eliminación de sus resultados.

La especificación se elaboró a partir de las funcionalidades implementadas y de los requisitos definidos en el capítulo anterior. Las operaciones internas, como la validación de archivos, la conversión a PGM, la comunicación con Redis, la ejecución del worker y el almacenamiento de resultados, se incorporan dentro del flujo de los casos de uso que las activan; no se presentan como casos independientes porque no constituyen objetivos directos del usuario.

El alcance se limita a funciones académicas y de investigación. La aplicación no emite diagnósticos, no clasifica lesiones y no reemplaza la evaluación de un profesional de la salud.

4.2. Actores del sistema

Se identificaron dos perfiles de interacción humana y un servicio externo de apoyo. El worker, el simulador Julia, PostgreSQL, Redis y el almacenamiento privado forman parte de la solución técnica y, por tanto, no se consideran actores del sistema.

Tabla 12
Actores que participan en los casos de uso

ACTOR	DESCRIPCIÓN
Usuario visitante	Persona que todavía no mantiene una sesión activa. Puede registrarse, iniciar sesión y solicitar la recuperación de su contraseña.
Usuario autenticado	Persona con una sesión activa. Puede registrar y gestionar casos propios, delimitar y confirmar ROI, consultar estados y resultados, descargar reportes, comparar casos y eliminar información de su cuenta.

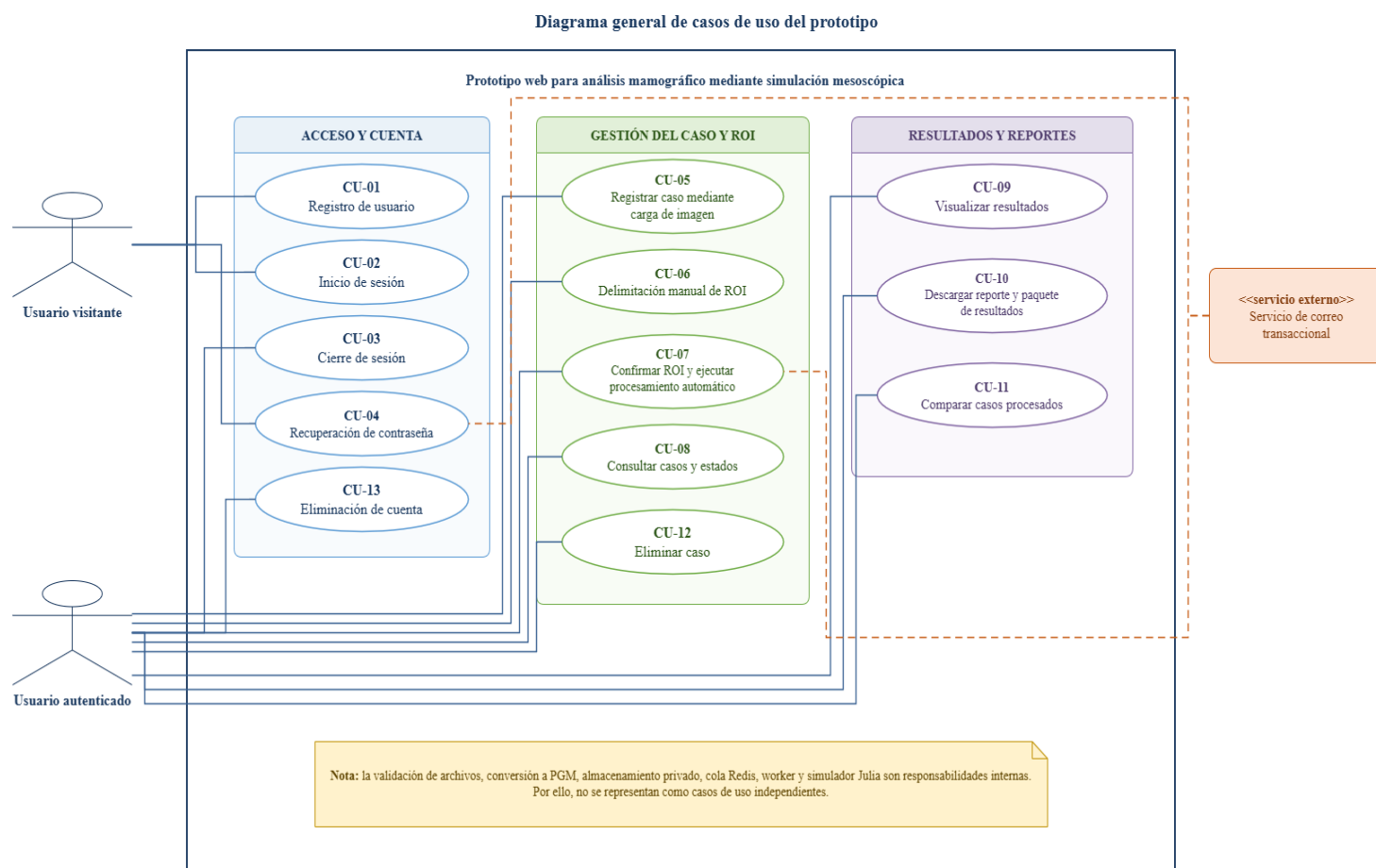
Servicio de correo transaccional Sistema externo de apoyo utilizado para entregar enlaces de recuperación de contraseña y notificaciones de procesamiento completado.

4.3. Diagrama general de casos de uso

El diagrama general debe representar el límite del prototipo, las asociaciones de cada actor y las relaciones entre los casos de uso. El usuario visitante participa en el registro, inicio de sesión y recuperación de contraseña; el usuario autenticado interviene en la gestión de casos, ROI, resultados y cuenta. El servicio de correo actúa como apoyo en la recuperación de acceso y en la notificación de resultados disponibles.

Las tareas internas del procesamiento se muestran como responsabilidades incluidas en la confirmación y procesamiento automático de la ROI, evitando confundir componentes técnicos con actores externos.

Ilustración 4 *Diagrama general de casos de uso*



4.4. Especificación de casos de uso

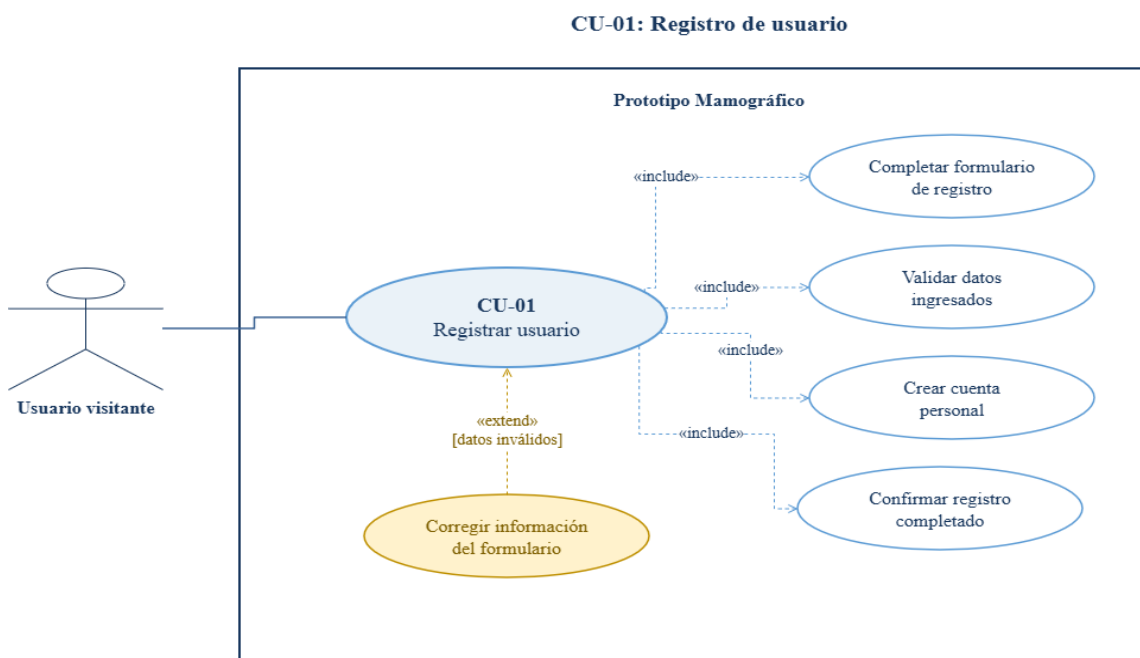
Cada caso de uso se documenta mediante su actor, objetivo, condiciones previas, flujo observable, excepciones, resultado final y relación con los requisitos funcionales. Esta estructura permite mantener correspondencia entre las necesidades del usuario, la implementación y las pruebas posteriores.

4.4.1. CU-01: Registro de usuario

Permite que una persona cree una cuenta propia para acceder al prototipo y mantener sus casos separados de los pertenecientes a otros usuarios.

Diagrama Caso de Uso 1

CU-01: Registro de usuario



Caso de Uso 1

Descripción del caso de uso CU-01: Registro de usuario

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-01
Nombre	Registro de usuario
Actor principal	Usuario visitante
Objetivo	Crear una cuenta personal para acceder al prototipo y gestionar casos propios.
Precondiciones	El usuario no mantiene una sesión activa y dispone de un correo electrónico no registrado previamente.

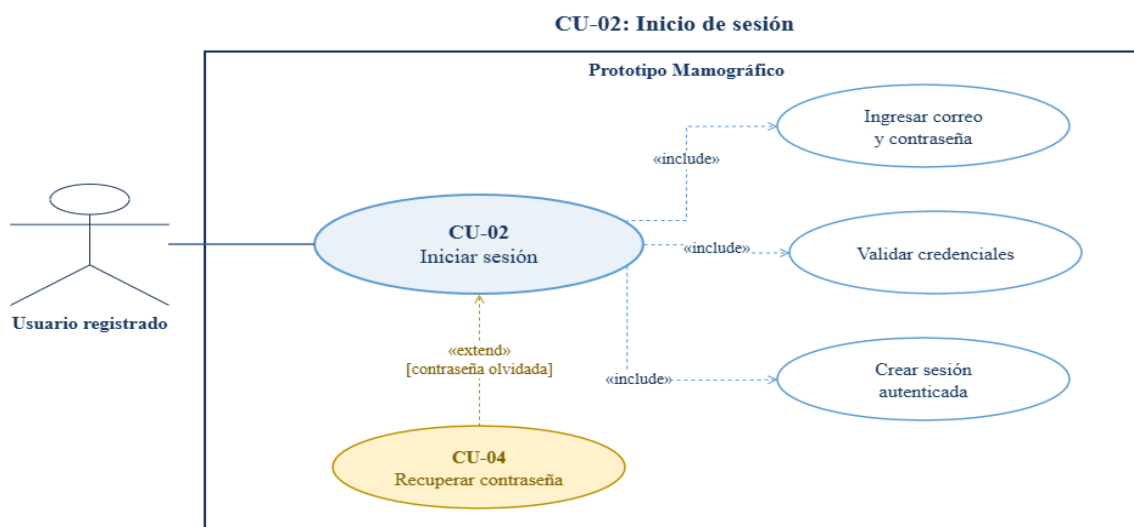
Flujo principal	1. El usuario visitante accede a la opción de registro. 2. Ingresa su nombre, correo electrónico, contraseña y confirmación de contraseña. 3. Envía el formulario de registro. 4. El sistema valida la información ingresada. 5. El sistema crea la cuenta y almacena la contraseña de forma segura. 6. El sistema confirma el registro y dirige al usuario a la página de inicio.
Flujos alternos o excepciones	Si faltan datos, el correo no es válido, la contraseña no cumple las condiciones o el correo ya está registrado, el sistema informa el problema y conserva el formulario para su corrección.
Postcondiciones	La cuenta queda registrada y el usuario puede iniciar sesión.
Requisitos relacionados	RF-17

4.4.2. CU-02: Inicio de sesión

Permite que un usuario registrado se autentique para acceder a sus casos y a las funciones protegidas del prototipo.

Diagrama Caso de Uso 2

CU-02: Inicio de sesión



Caso de Uso 2**Descripción del caso de uso CU-02: Inicio de sesión**

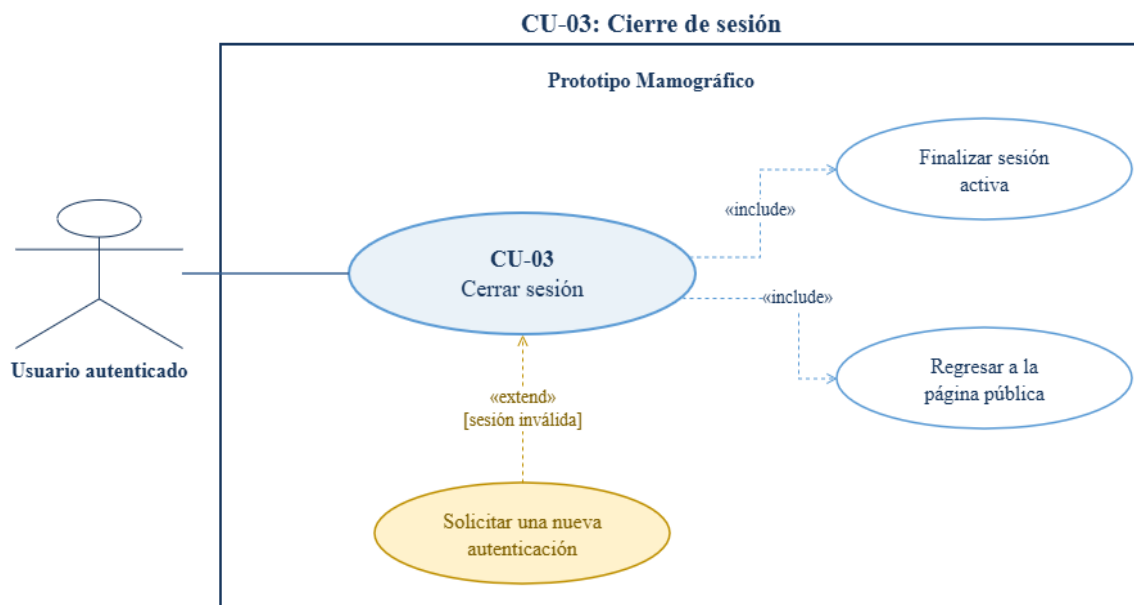
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-02
Nombre	Inicio de sesión
Actor principal	Usuario registrado
Objetivo	Acceder al prototipo mediante credenciales válidas.
Precondiciones	El usuario posee una cuenta registrada y no mantiene una sesión activa.
Flujo principal	1. El usuario accede a la opción de inicio de sesión. 2. Ingresa su correo electrónico y contraseña. 3. Envía sus credenciales. 4. El sistema verifica que las credenciales correspondan a una cuenta registrada. 5. El sistema inicia la sesión del usuario. 6. El usuario es dirigido al listado de sus casos.
Flujos alternos o excepciones	Si las credenciales son incorrectas, el sistema presenta un mensaje genérico y no revela si el correo está registrado.
Postcondiciones	La sesión queda activa y el usuario puede utilizar las funciones autorizadas.
Requisitos relacionados	RF-17 y RF-18

4.4.3. CU-03: Cierre de sesión

Permite finalizar de forma explícita la sesión activa cuando el usuario termina de utilizar el aplicativo.

Diagrama Caso de Uso 3

CU-03: Cierre de sesión



Caso de Uso 3

Descripción del caso de uso CU-03: Cierre de sesión

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-03
Nombre	Cierre de sesión
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Finalizar la sesión activa y evitar que otra persona continúe usando la cuenta desde el mismo navegador.
Precondiciones	El usuario mantiene una sesión activa.
Flujo principal	1. El usuario autenticado selecciona la opción de cerrar sesión. 2. El sistema recibe la solicitud. 3. El sistema finaliza la sesión activa. 4. El sistema muestra una confirmación del cierre de sesión. 5. El usuario es dirigido a la página de inicio.

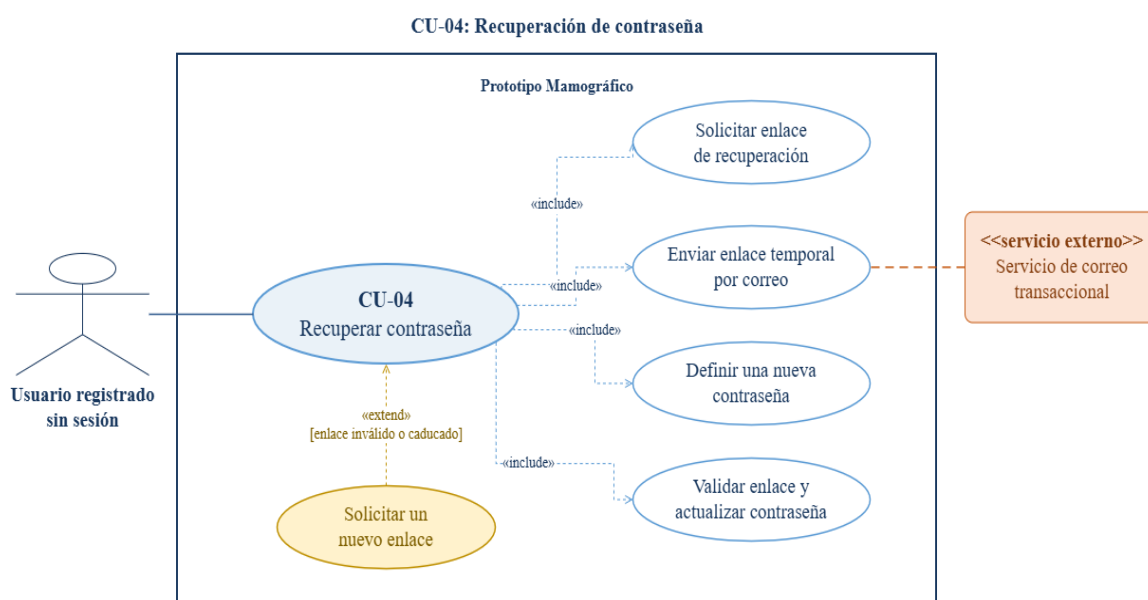
Flujos alternos o excepciones	Si la sesión ya no es válida, el sistema mantiene protegidas las rutas privadas y solicita un nuevo inicio de sesión.
Postcondiciones	La sesión queda finalizada y las funciones protegidas dejan de estar disponibles.
Requisitos relacionados	RF-17 y RF-18

4.4.4. CU-04: Recuperación de contraseña

Permite restablecer el acceso a una cuenta mediante un enlace temporal enviado al correo electrónico registrado.

Diagrama Caso de Uso 4

CU-04: Recuperación de contraseña



Caso de Uso 4

Descripción del caso de uso CU-04: Recuperación de contraseña

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-04
Nombre	Recuperación de contraseña
Actor principal	Usuario registrado sin sesión; participa el servicio de correo transaccional como actor de apoyo.
Objetivo	Establecer una contraseña nueva sin conocer la contraseña anterior.

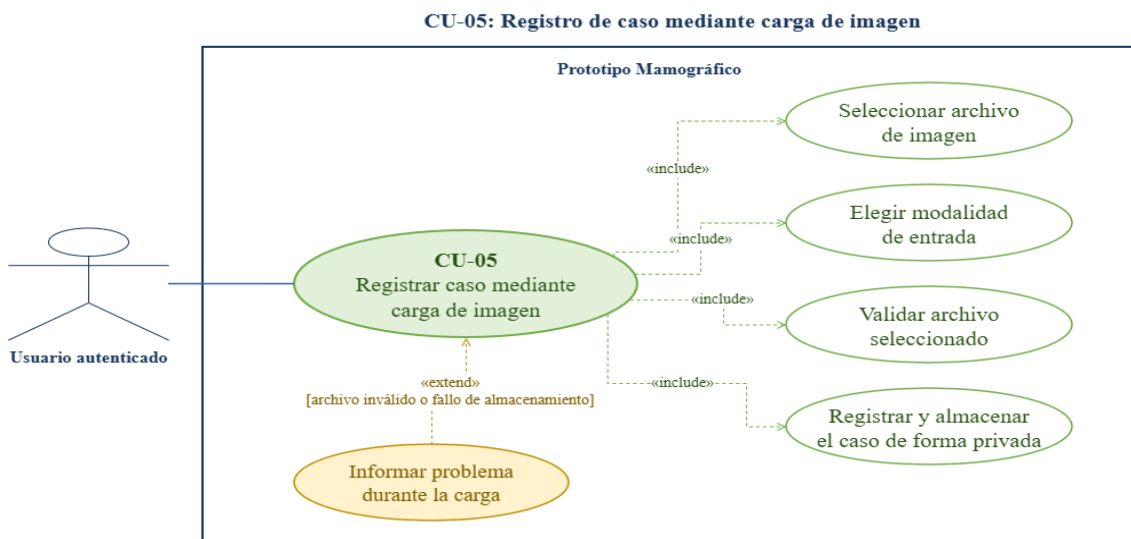
Precondiciones	El usuario posee una cuenta y puede acceder al correo asociado.
Flujo principal	1. El usuario selecciona la opción de recuperación de contraseña. 2. Ingresa el correo electrónico asociado a su cuenta. 3. Envía la solicitud de recuperación. 4. El sistema genera un enlace temporal y lo envía al correo registrado. 5. El usuario abre el enlace recibido. 6. Ingresa y confirma una nueva contraseña. 7. El sistema valida la información y actualiza la contraseña. 8. El usuario es dirigido a la pantalla de inicio de sesión.
Flujos alternos o excepciones	Si el correo no está registrado, la respuesta no lo revela. Si el enlace es inválido o caducó, se solicita uno nuevo. Si el correo no puede enviarse o la contraseña no es válida, el sistema informa que la operación no pudo completarse.
Postcondiciones	La contraseña queda actualizada y los enlaces anteriores dejan de ser válidos.
Requisitos relacionados	RF-20

4.4.5. CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen

Reúne las dos modalidades de entrada disponibles: una mamografía completa que será recortada posteriormente o una ROI previamente preparada.

Diagrama Caso de Uso 5

CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen



Caso de Uso 5

Descripción del caso de uso CU-05: Registro de caso mediante carga de imagen

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-05
Nombre	Registro de caso mediante carga de imagen
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Crear un caso propio a partir de una mamografía completa o una ROI previamente recortada.
Precondiciones	El usuario mantiene una sesión activa y dispone de un archivo en un formato admitido.
Flujo principal	1. El usuario autenticado selecciona la opción de crear un nuevo caso. 2. Selecciona un archivo de imagen desde su dispositivo. 3. El sistema muestra el archivo seleccionado y solicita indicar cómo será utilizado. 4. El usuario elige entre mamografía completa o ROI previamente recortada.

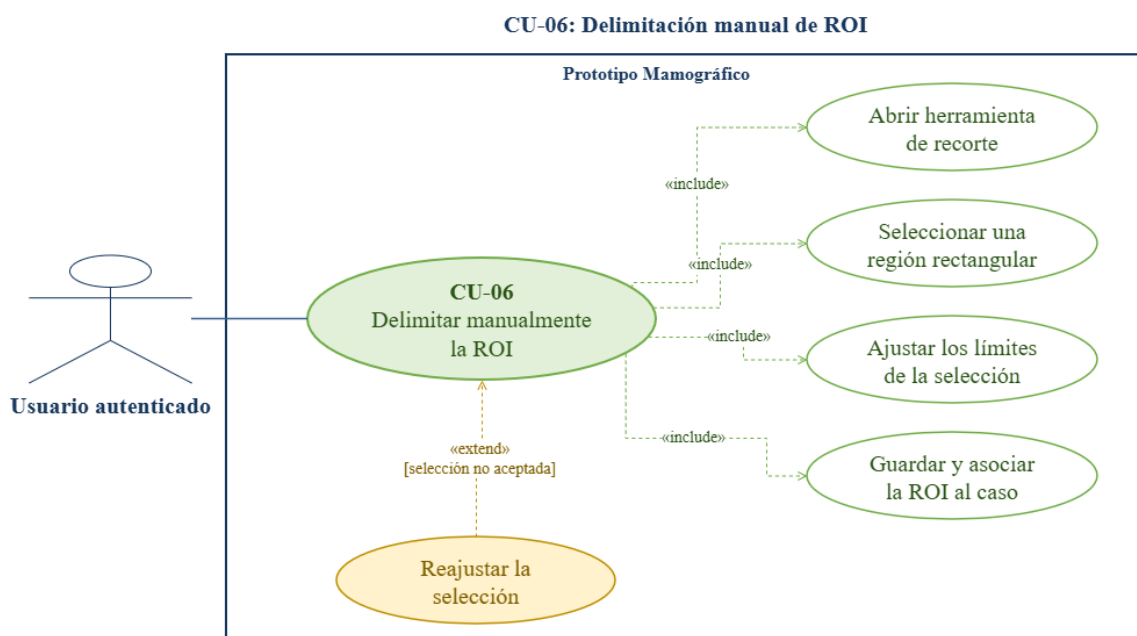
	5. El usuario confirma la carga del archivo. 6. El sistema verifica que el archivo sea compatible. 7. El sistema registra el caso y almacena la imagen asociada. 8. El sistema muestra el detalle del nuevo caso y su estado inicial.
Flujos alternos o excepciones	Si el archivo está vacío, excede el tamaño permitido, posee una extensión no admitida o no puede leerse, el sistema rechaza la carga y presenta un mensaje comprensible. Si falla el almacenamiento, el caso no se confirma como registrado.
Postcondiciones	El caso queda asociado al usuario. Una mamografía completa queda disponible para recorte; una ROI directa queda disponible para revisión y confirmación.
Requisitos relacionados	RF-01, RF-02, RF-03, RF-04 y RF-18

4.4.6. CU-06: Delimitación manual de ROI

Permite seleccionar sobre una mamografía completa la región específica que se utilizará como entrada del análisis computacional.

Diagrama Caso de Uso 6

CU-06: Delimitación manual de ROI



Caso de Uso 6**Descripción del caso de uso CU-06: Delimitación manual de ROI**

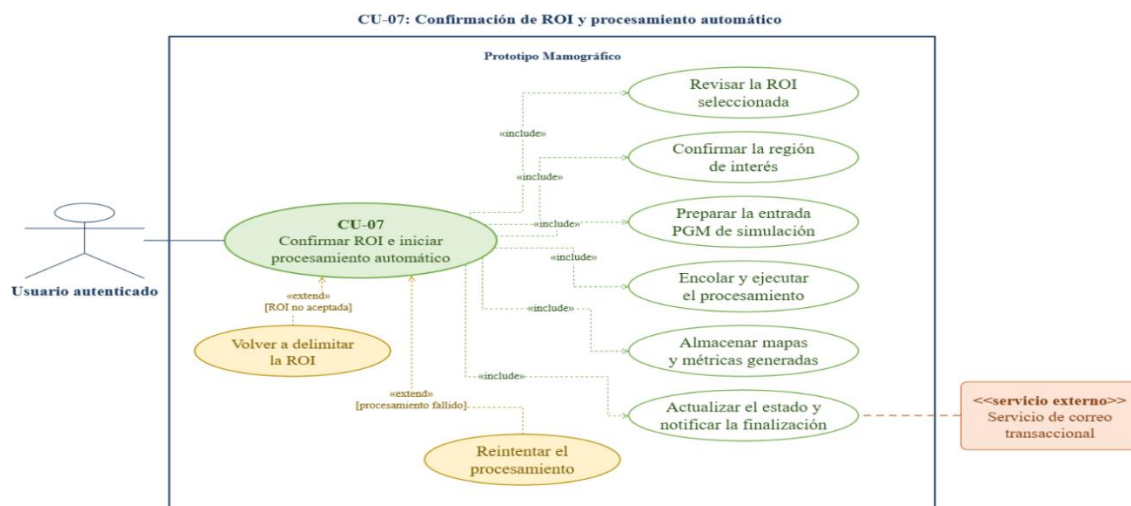
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-06
Nombre	Delimitación manual de ROI
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Recortar manualmente una región de interés sobre una mamografía completa.
Precondiciones	Existe un caso propio registrado como mamografía completa, con una vista previa disponible y sin procesamiento finalizado.
Flujo principal	1. El usuario abre un caso que contiene una mamografía completa. 2. Selecciona la opción de recortar la región de interés. 3. El sistema presenta la imagen y la herramienta de recorte. 4. El usuario delimita manualmente la región que desea analizar. 5. El usuario confirma el recorte seleccionado. 6. El sistema genera y almacena la ROI asociada al caso. 7. El sistema muestra una vista previa de la región obtenida.
Flujos alternos o excepciones	El usuario puede reajustar la selección antes de confirmarla. Si las coordenadas son inválidas o la imagen no está disponible, el sistema no guarda el recorte y comunica el problema.
Postcondiciones	La ROI queda almacenada y disponible para revisión y confirmación.
Requisitos relacionados	RF-05 y RF-18

4.4.7. CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático

La confirmación de la ROI inicia automáticamente la preparación PGM, el envío a la cola y la simulación, sin exigir una acción técnica adicional al usuario.

Diagrama Caso de Uso 7

CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático



Caso de Uso 7

Descripción del caso de uso CU-07: Confirmación de ROI y procesamiento automático

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-07
Nombre	Confirmación de ROI y procesamiento automático
Actor principal	Usuario autenticado; participa el servicio de correo transaccional al finalizar el procesamiento.
Objetivo	Confirmar la región seleccionada e iniciar automáticamente su procesamiento mesoscópico.
Precondiciones	El usuario posee un caso propio con una ROI asociada que todavía no ha sido confirmada.
Flujo principal	1. El usuario revisa la vista previa de la ROI asociada al caso. 2. Selecciona la opción de confirmar la ROI y preparar la simulación. 3. El sistema registra la ROI como confirmada.

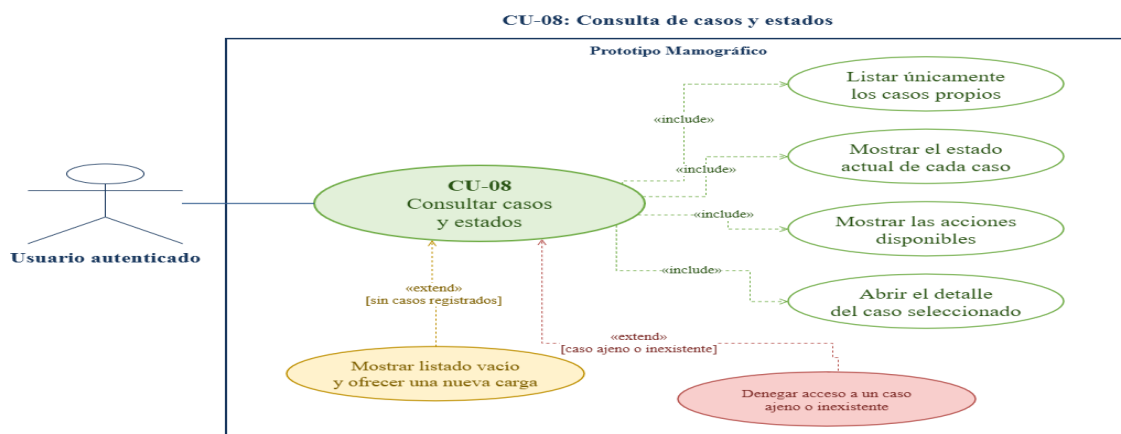
	4. El sistema prepara automáticamente la imagen para la simulación. 5. El sistema envía el caso a la cola de procesamiento. 6. El worker ejecuta la simulación mesoscópica. 7. El sistema actualiza el estado del caso durante el procesamiento. 8. Al finalizar, el sistema registra los mapas, métricas y resultados generados. 9. El usuario puede consultar los resultados desde el detalle del caso.
Flujos alternos o excepciones	Si el usuario no acepta la ROI, puede volver al recorte o cargar otra imagen. Si falla la preparación, la cola o la simulación, el caso registra el error y ofrece la acción de reintento que corresponda. Un fallo de correo no invalida los resultados ya generados.
Postcondiciones	El caso queda en cola, en procesamiento, completado o con error. Cuando finaliza correctamente, sus resultados quedan disponibles para consulta.
Requisitos relacionados	RF-06, RF-07, RF-08, RF-09, RF-10, RF-11, RF-12, RF-16 y RF-21

4.4.8. CU-08: Consulta de casos y estados

Permite revisar únicamente los casos pertenecientes al usuario y conocer la etapa alcanzada por cada uno.

Diagrama Caso de Uso 8

CU-08: Consulta de casos y estados



Caso de Uso 8**Descripción del caso de uso CU-08: Consulta de casos y estados**

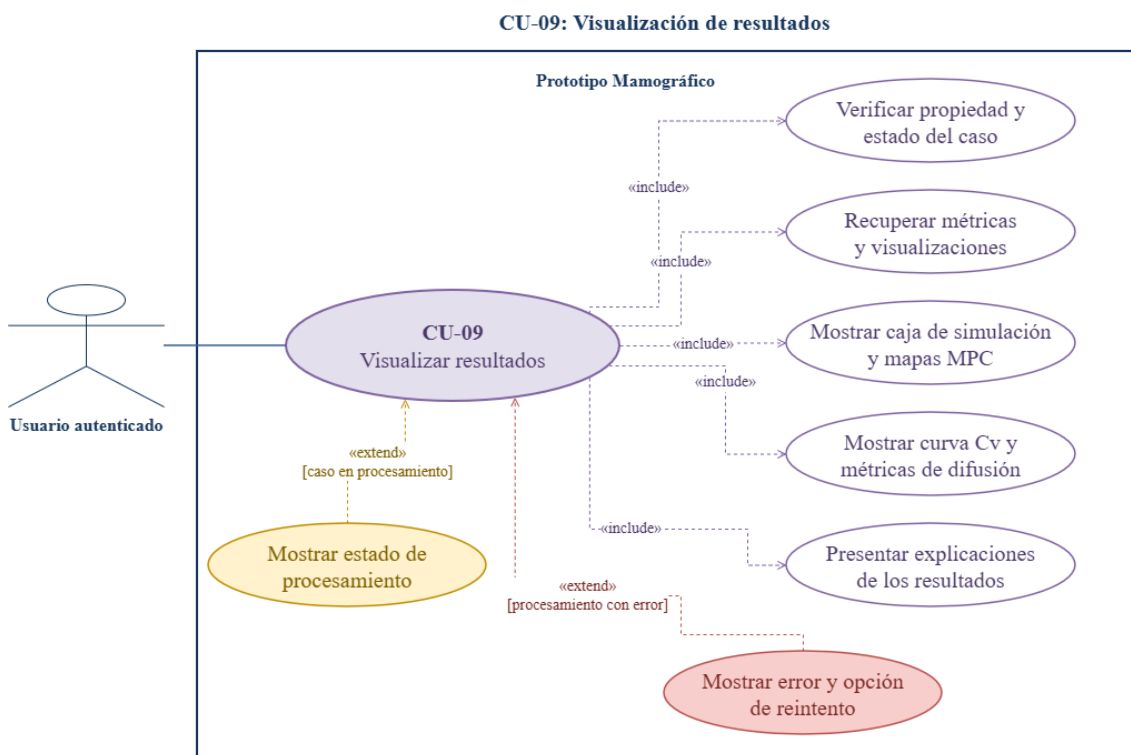
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-08
Nombre	Consulta de casos y estados
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Consultar los casos propios, sus estados y las acciones disponibles en cada etapa.
Precondiciones	El usuario mantiene una sesión activa.
Flujo principal	1. El usuario accede a la sección de casos. 2. El sistema consulta únicamente los casos pertenecientes al usuario autenticado. 3. El sistema presenta el listado con la información y el estado de cada caso. 4. El usuario identifica un caso y selecciona la opción de detalle. 5. El sistema muestra la información, el progreso y las acciones disponibles para el caso.
Flujos alternos o excepciones	Si no existen casos, el sistema muestra el listado vacío y ofrece iniciar una nueva carga. Si se solicita un caso ajeno o inexistente, el sistema deniega el acceso.
Postcondiciones	El usuario conoce el estado de sus casos y puede continuar con una acción permitida.
Requisitos relacionados	RF-03, RF-16 y RF-18

4.4.9. CU-09: Visualización de resultados

Presenta las métricas y visualizaciones generadas por el simulador mediante explicaciones orientadas a una lectura académica y no diagnóstica.

Diagrama Caso de Uso 9

CU-09: Visualización de resultados



Caso de Uso 9

Descripción del caso de uso CU-09: Visualización de resultados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-09
Nombre	Visualización de resultados
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Consultar los mapas, métricas y explicaciones correspondientes a un caso procesado.
Precondiciones	El caso pertenece al usuario y se encuentra completado con resultados disponibles.
Flujo principal	1. El usuario accede al detalle de un caso procesado. 2. El sistema comprueba que el caso pertenece al usuario y tiene resultados disponibles.

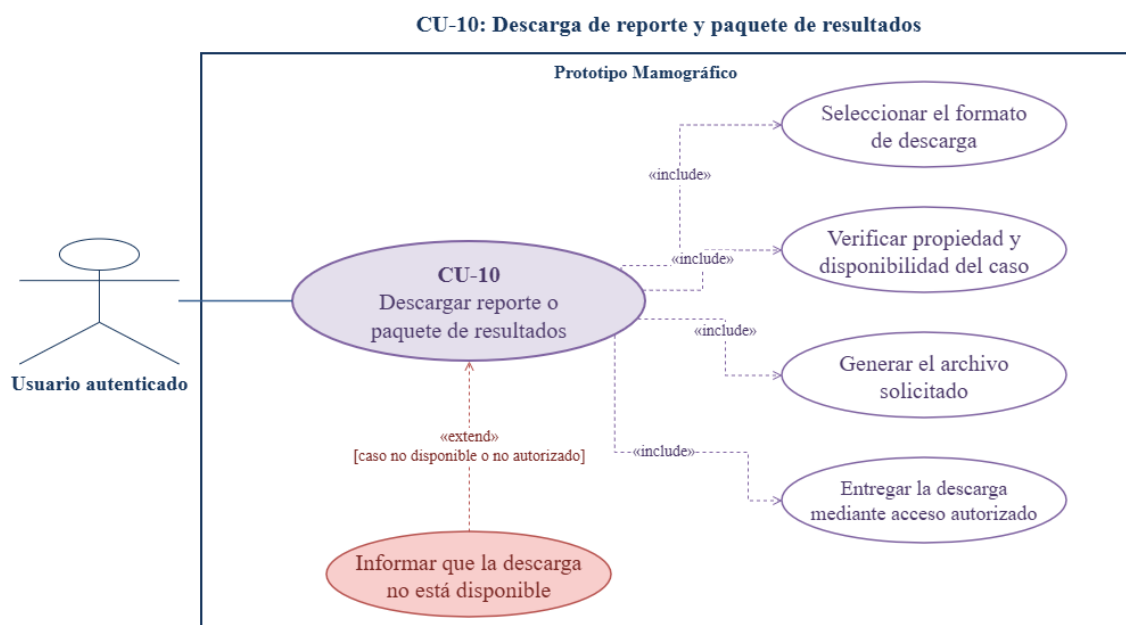
	3. El sistema recupera las métricas, mapas e imágenes generadas. 4. El sistema presenta los resultados de forma organizada y visual. 5. El usuario consulta las métricas y las ayudas disponibles para interpretarlas. 6. El usuario puede acceder a las opciones de descarga del caso.
Flujos alternos o excepciones	Si el caso todavía se procesa, el sistema presenta su estado y actualiza la vista periódicamente. Si terminó con error, muestra un mensaje comprensible y la acción de reintento disponible.
Postcondiciones	El usuario visualiza los resultados sin acceder a rutas internas, credenciales ni información de otros usuarios.
Requisitos relacionados	RF-11, RF-12, RF-13, RF-16 y RF-18

4.4.10. CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados

Permite conservar los resultados de un caso mediante un reporte PDF explicativo o un paquete con los archivos generados.

Diagrama Caso de Uso 10

CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados



Caso de Uso 10**Descripción del caso de uso CU-10: Descarga de reporte y paquete de resultados**

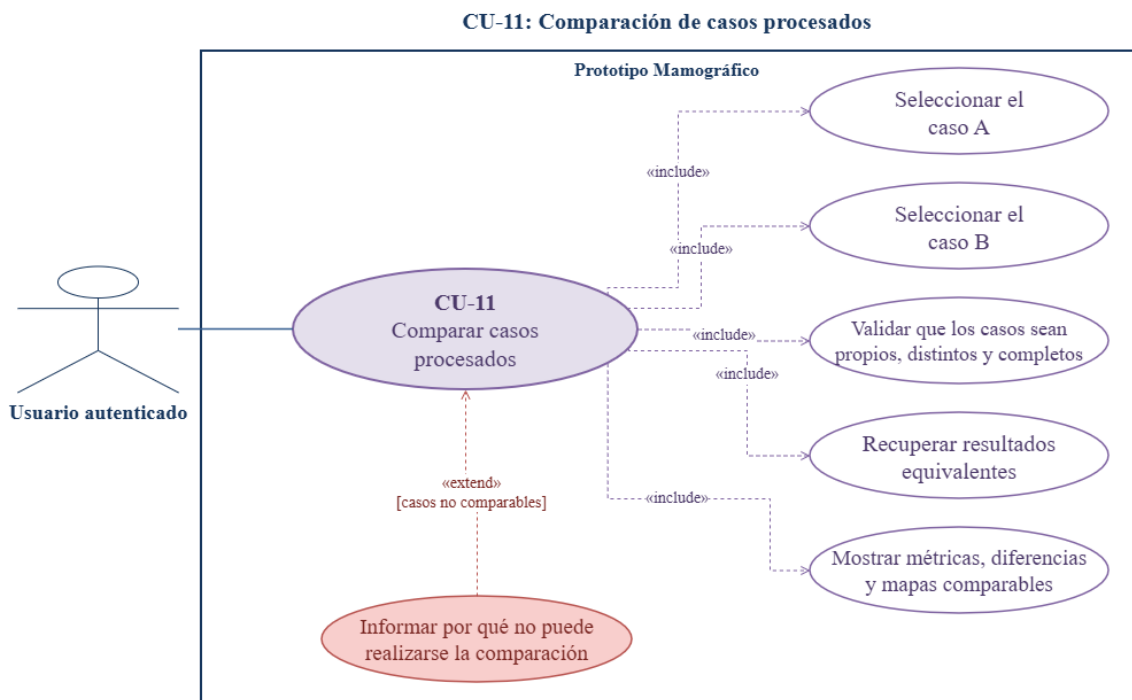
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-10
Nombre	Descarga de reporte y paquete de resultados
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Descargar una representación explicativa o el conjunto de resultados de un caso propio.
Precondiciones	El caso pertenece al usuario y cuenta con resultados completos.
Flujo principal	1. El usuario abre un caso que ha finalizado su procesamiento. 2. Selecciona la opción de descargar el reporte PDF o el paquete de resultados. 3. El sistema comprueba que los resultados estén completos. 4. El sistema genera o recupera el archivo solicitado. 5. El sistema inicia la descarga en el dispositivo del usuario.
Flujos alternos o excepciones	Si el caso no ha finalizado, no pertenece al usuario o los archivos no están disponibles, el sistema no genera la descarga y muestra el estado correspondiente.
Postcondiciones	El usuario obtiene el PDF o el paquete solicitado; los objetos originales permanecen en almacenamiento privado.
Requisitos relacionados	RF-13, RF-14 y RF-18

4.4.11. CU-11: Comparación de casos procesados

Permite contrastar dos casos propios completados mediante métricas y mapas equivalentes, sin emitir una interpretación clínica.

Diagrama Caso de Uso 11

CU-11: Comparación de casos procesados



Caso de Uso 11

Descripción del caso de uso CU-11: Comparación de casos procesados

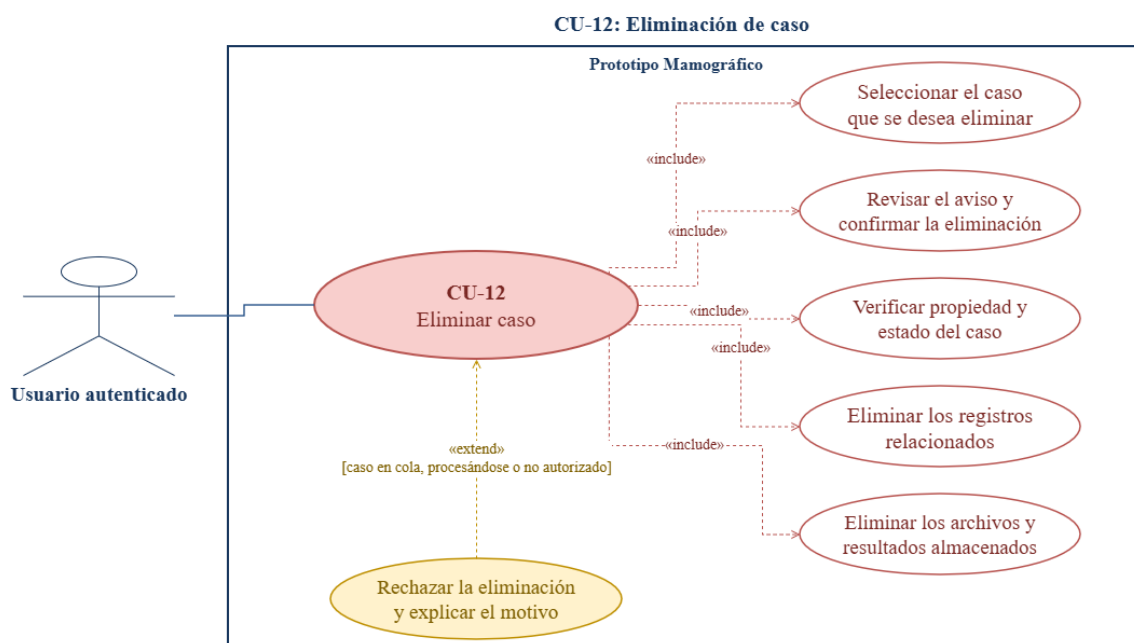
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-11
Nombre	Comparación de casos procesados
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Comparar los resultados de dos casos propios procesados.
Precondiciones	El usuario posee al menos dos casos distintos, completados y con resultados comparables.
Flujo principal	1. El usuario accede a la opción de comparación. 2. El sistema presenta los casos completados pertenecientes al usuario. 3. El usuario selecciona dos casos diferentes.

	4. El sistema verifica que ambos casos tengan resultados comparables. 5. El sistema calcula las diferencias entre las métricas de los casos. 6. El sistema presenta las métricas y visualizaciones de ambos casos. 7. El usuario consulta las diferencias obtenidas.
Flujos alternos o excepciones	Si se selecciona el mismo caso, faltan resultados o no existen dos casos comparables, el sistema explica por qué no puede realizarse la comparación.
Postcondiciones	El usuario visualiza una comparación académica entre los casos seleccionados.
Requisitos relacionados	RF-15 y RF-18

4.4.12. CU-12: Eliminación de caso

Permite retirar un caso propio que ya no sea necesario, previa confirmación y siempre que no se encuentre en cola o procesamiento.

Diagrama Caso de Uso 12 CU-12: Eliminación de caso



Caso de Uso 12**Descripción del caso de uso CU-12: Eliminación de caso**

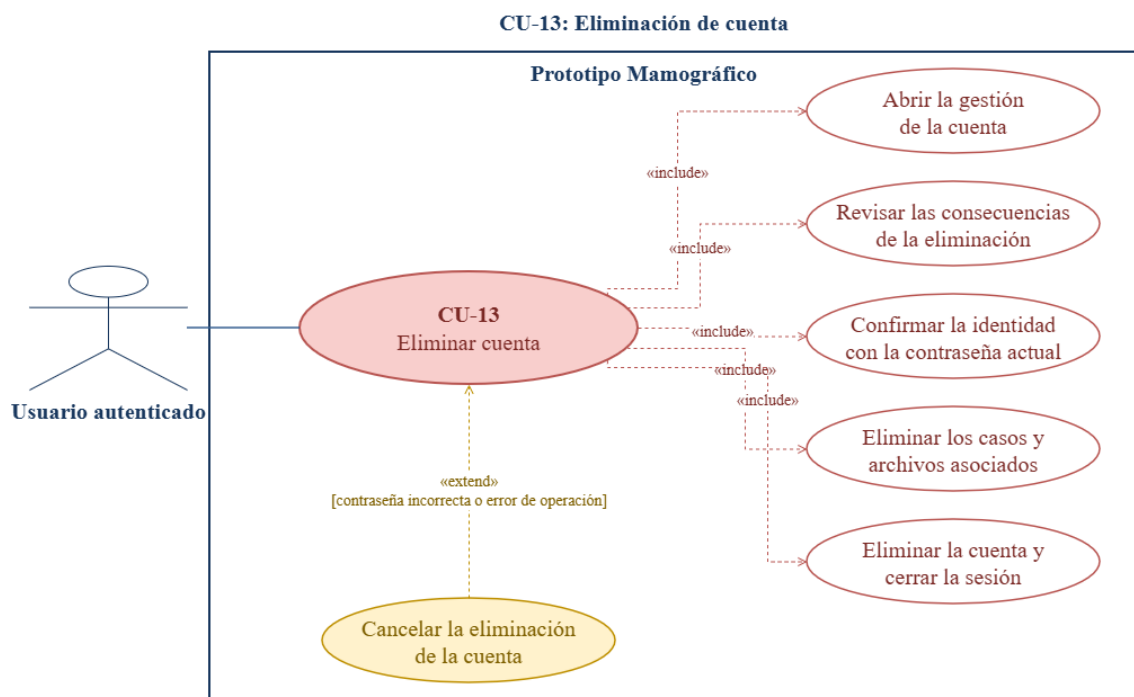
CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-12
Nombre	Eliminación de caso
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Eliminar de manera definitiva un caso propio junto con sus archivos y resultados.
Precondiciones	El caso pertenece al usuario y no se encuentra en cola ni en procesamiento activo.
Flujo principal	1. El usuario accede al listado de sus casos. 2. Selecciona la opción de eliminar en el caso correspondiente. 3. El sistema muestra una ventana de confirmación y advierte las consecuencias. 4. El usuario confirma la eliminación. 5. El sistema verifica que el caso no se encuentre en cola o en procesamiento. 6. El sistema elimina el registro y los archivos asociados al caso. 7. El sistema actualiza el listado y confirma la eliminación.
Flujos alternos o excepciones	Si el caso está pendiente o procesándose, la eliminación se rechaza. Si la limpieza de algún archivo falla después de eliminar los registros, el sistema informa la situación y la registra para revisión.
Postcondiciones	El caso deja de aparecer en la cuenta y sus archivos asociados son eliminados del almacenamiento.
Requisitos relacionados	RF-18 y RF-19

4.4.13. CU-13: Eliminación de cuenta

Permite que el usuario retire definitivamente su cuenta y los casos asociados después de confirmar su identidad mediante la contraseña actual.

Diagrama Caso de Uso 13

CU-13: Eliminación de cuenta



Caso de Uso 13

Descripción del caso de uso CU-13: Eliminación de cuenta

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Código	CU-13
Nombre	Eliminación de cuenta
Actor principal	Usuario autenticado
Objetivo	Eliminar de forma permanente la cuenta, sus casos y los archivos asociados.
Precondiciones	El usuario mantiene una sesión activa y conoce su contraseña actual.
Flujo principal	1. El usuario accede a la gestión de su cuenta. 2. Selecciona la opción de eliminar cuenta. 3. El sistema informa que la acción eliminará permanentemente la cuenta y sus casos.

	4. El usuario ingresa su contraseña actual. 5. El usuario confirma la eliminación definitiva. 6. El sistema verifica la contraseña ingresada. 7. El sistema elimina la cuenta, los casos y los archivos asociados. 8. El sistema finaliza la sesión y dirige al usuario a la página de inicio.
Flujos alternos o excepciones	Si la contraseña es incorrecta, la cuenta no se elimina. Si ocurre un error de base de datos, la transacción se revierte. Los problemas de limpieza de archivos se registran para su revisión sin exponer información técnica al usuario.
Postcondiciones	La cuenta y sus casos dejan de estar disponibles y la sesión queda finalizada.
Requisitos relacionados	RF-17, RF-18 y RNF-10

Capítulo 5

Diagramas de diseño del prototipo

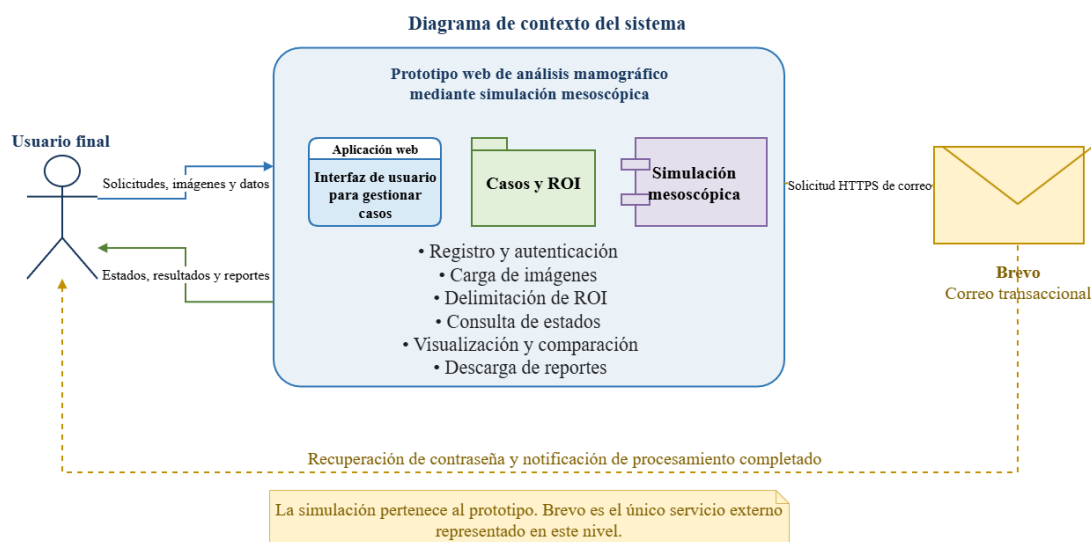
Este capítulo reúne las representaciones de diseño que documentan el funcionamiento, la estructura interna y el despliegue final del prototipo. Los diagramas abarcan el contexto, la arquitectura, los módulos, el ciclo de vida del caso, el modelo de datos, las interacciones principales, el simulador Julia y la distribución de los componentes en producción.

5.1. Diagrama de contexto del sistema

El diagrama de contexto del sistema presenta una visión general de la relación entre la persona usuaria, el prototipo web de análisis mamográfico y el servicio externo de correo transaccional. Esta representación delimita el sistema desde una perspectiva funcional y evita detallar sus componentes internos o la infraestructura utilizada para desplegarlo.

La persona usuaria puede registrarse, iniciar sesión, cargar una mamografía o una ROI recortada, delimitar y confirmar la región de interés, consultar el estado de sus casos, visualizar resultados, comparar casos procesados y descargar reportes. Después de confirmar la ROI, el prototipo prepara la entrada PGM y solicita automáticamente el procesamiento en segundo plano.

Diagrama 1
Diagrama de contexto del sistema



El prototipo constituye el punto central de interacción y entrega estados, mapas, métricas y reportes asociados únicamente a los casos del usuario autenticado. Brevo se representa como un servicio externo porque recibe solicitudes HTTPS para enviar enlaces de recuperación de contraseña y notificaciones de procesamiento completado. La simulación mesoscópica forma parte de la solución y no se modela como un actor independiente.

5.2. Diagrama de arquitectura general

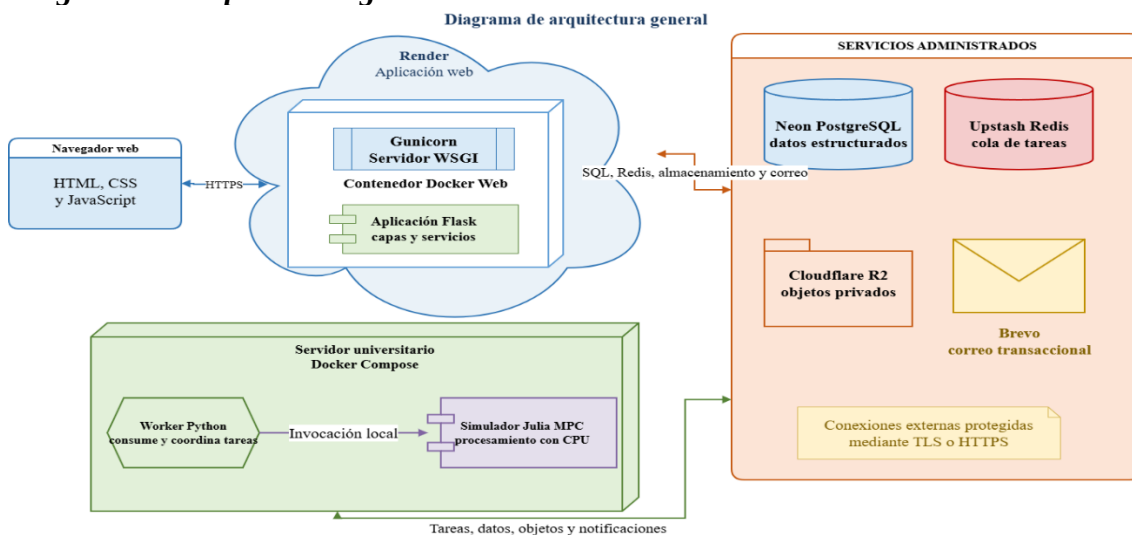
El diagrama de arquitectura general representa la organización lógica y distribuida del prototipo. La solución combina una aplicación web monolítica organizada en capas, servicios administrados para persistencia y mensajería, almacenamiento privado de objetos y un worker de procesamiento desplegado en el servidor universitario.

La interfaz y el backend Flask se ejecutan en Render mediante Gunicorn y un contenedor Docker. El navegador se comunica con esta aplicación a través de HTTPS. Aunque la aplicación reúne presentación, lógica de negocio y acceso a datos en un mismo despliegue, el procesamiento de simulaciones se desacopla mediante el patrón productor-consumidor.

La aplicación web registra usuarios, casos, estados y métricas en PostgreSQL administrado por Neon; publica tareas en Upstash Redis; almacena imágenes, ROI, archivos PGM, mapas y reportes en Cloudflare R2; y utiliza la API HTTPS de Brevo para los correos transaccionales. Las conexiones externas emplean TLS o HTTPS y las credenciales se proporcionan mediante variables protegidas del entorno.

Diagrama 2

Diagrama de arquitectura general



El worker Python se ejecuta dentro de Docker Compose en el servidor universitario. Este componente consume de forma bloqueante las tareas de Upstash Redis, recupera desde R2 la entrada del caso, invoca al simulador Julia y publica nuevamente los archivos generados. Al terminar, actualiza en Neon las métricas y el estado del caso.

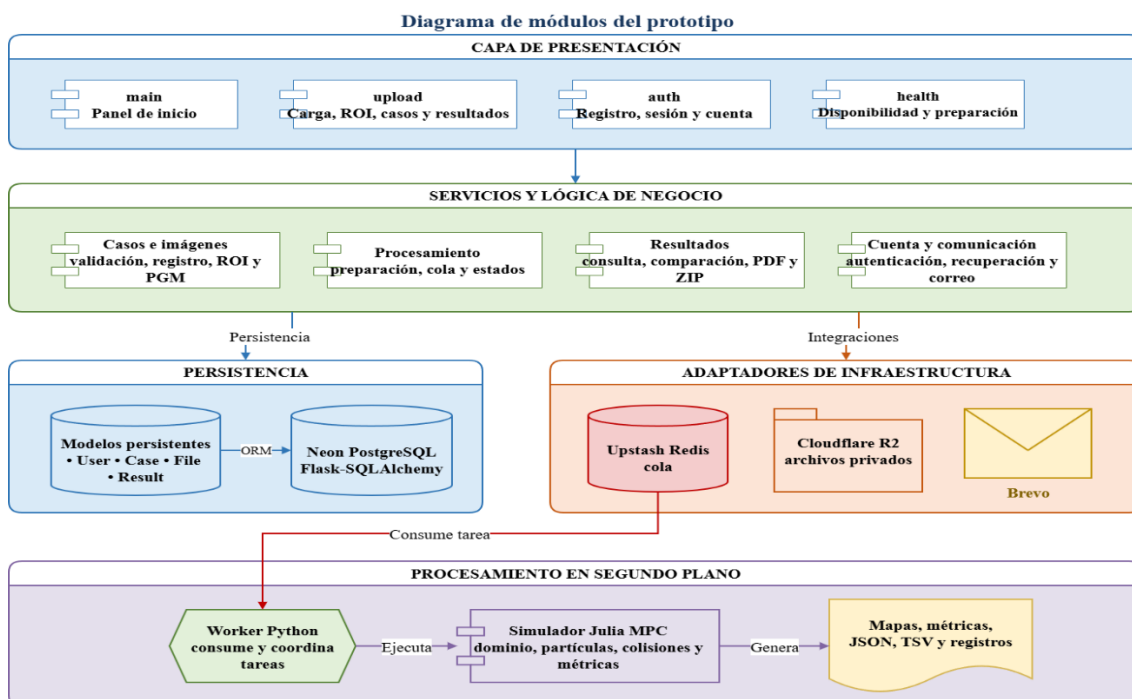
El simulador Julia se encuentra incluido en la imagen del worker y utiliza los recursos de CPU asignados al contenedor. Los archivos locales del worker se consideran temporales, mientras que Neon y R2 constituyen las fuentes persistentes de datos estructurados y objetos, respectivamente.

Esta arquitectura mantiene la sencillez de un backend monolítico, separa el procesamiento prolongado de las solicitudes web y permite aprovechar la capacidad del servidor universitario sin exponerlo directamente a Internet. También facilita la trazabilidad, el despliegue reproducible y la sustitución independiente de los servicios administrados.

5.3. Diagrama de módulos del prototipo

El diagrama de módulos presenta la organización interna del prototipo según sus responsabilidades. Se distinguen la capa de presentación, la capa de servicios, la capa de datos, los adaptadores de infraestructura y el procesamiento en segundo plano.

Diagrama 3
Diagrama de módulos del prototipo



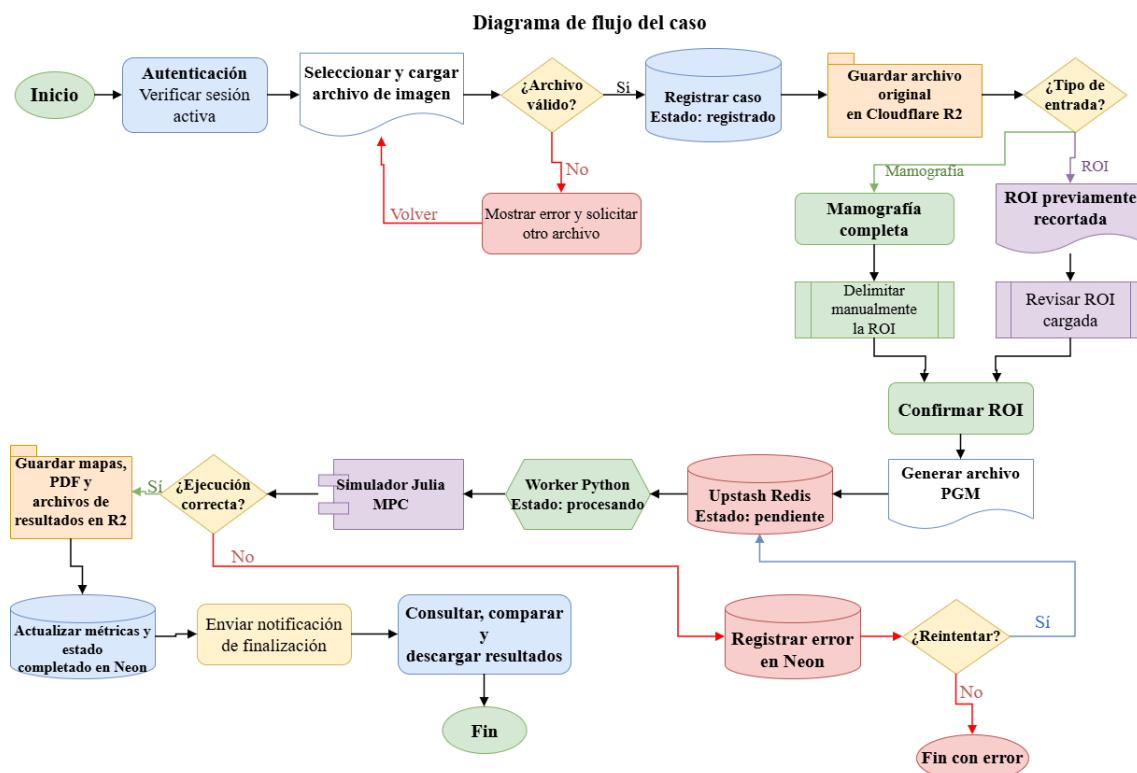
La capa de presentación contiene las rutas y plantillas de Flask. El módulo main gestiona el panel de inicio; upload reúne la carga, ROI, preparación PGM, listado, detalle, resultados, comparación y exportación; auth concentra el registro, inicio de sesión, recuperación de contraseña y gestión de cuenta; y health expone verificaciones de disponibilidad y preparación.

La capa de servicios implementa la validación, registro y eliminación de casos, procesamiento de ROI, preparación de simulación, cola Redis, resultados, comparación, reportes, almacenamiento, autenticación y notificaciones. La capa de datos está formada por los modelos User, Case, File y Result. Los adaptadores conectan estas responsabilidades con Neon, Upstash, R2 y Brevo, mientras que el worker Python y el simulador Julia realizan el procesamiento en segundo plano.

5.4. Diagrama de flujo del caso

El diagrama de flujo del caso representa el recorrido funcional desde la selección de la imagen hasta la consulta de resultados. Incluye las decisiones relacionadas con el tipo de entrada, la confirmación de la ROI, la preparación automática, el procesamiento asíncrono y el tratamiento de errores.

Diagrama 4
Diagrama de flujo del caso



El flujo comienza cuando el usuario carga una mamografía completa o una ROI recortada. El sistema valida el archivo, crea el caso y almacena el original. Si se cargó una mamografía completa, el usuario delimita la ROI; si la imagen ya corresponde a una ROI, únicamente la revisa. Al confirmarla, el sistema genera el PGM, cambia el estado del caso y coloca automáticamente su identificador en la cola.

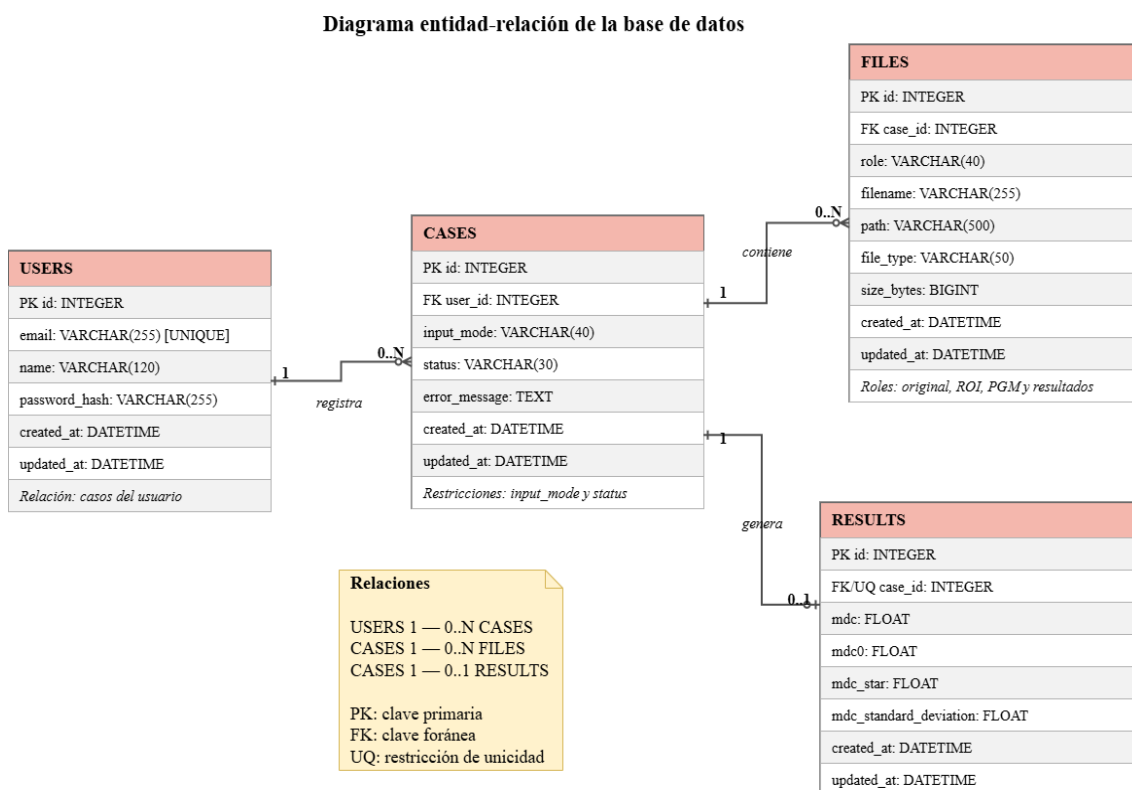
El worker consume la tarea, marca el caso como procesando y ejecuta el simulador Julia. Si el proceso concluye correctamente, guarda mapas y métricas, establece el estado completado y envía una notificación por correo. Si ocurre un fallo durante la preparación, el encolado o la simulación, el caso queda en estado error y puede volver a enviarse. El usuario consulta el avance y los resultados desde la aplicación web.

5.5. Diagrama entidad-relación de la base de datos

El diagrama entidad-relación describe la estructura persistente del prototipo. El modelo se compone de las tablas users, cases, files y results, almacenadas en PostgreSQL administrado por Neon.

Diagrama 5

Diagrama entidad-relación de la base de datos



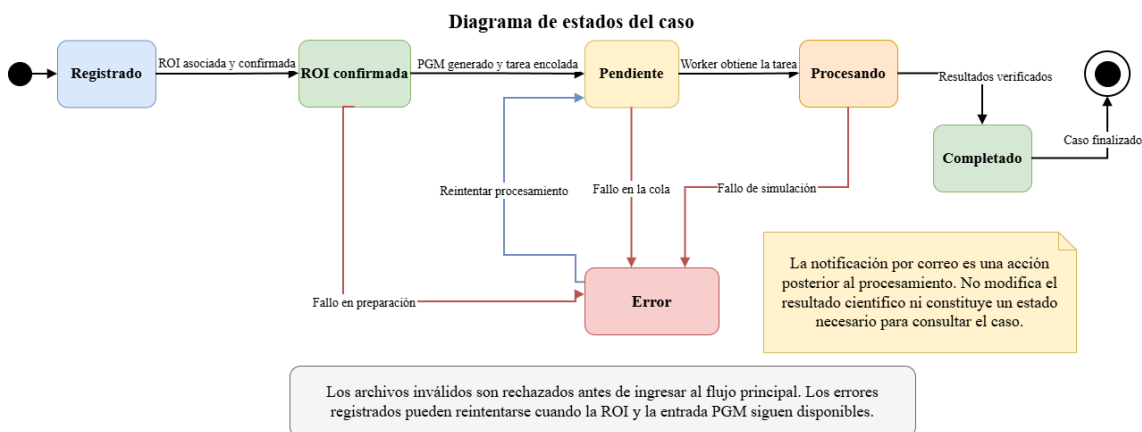
La tabla `users` conserva la identidad y las credenciales cifradas de cada cuenta. La tabla `cases` registra la modalidad de entrada, el estado, los tiempos de creación y actualización, el mensaje de error y el usuario propietario. La tabla `files` almacena una fila por objeto asociado al caso, identificado por su rol, nombre, referencia privada, tipo y tamaño. La tabla `results` conserva MDC, MDC0, MDC normalizado y la desviación estándar calculada entre realizaciones.

Un usuario puede poseer varios casos y cada caso pertenece a un usuario. Un caso puede contener múltiples archivos y disponer de cero o un resultado persistente. Las claves foráneas y las reglas de eliminación en cascada mantienen la integridad entre las entidades cuando se elimina un caso o una cuenta.

5.6. Diagrama de estados del caso

El diagrama de estados representa la evolución persistente de un caso y los eventos que producen cada transición. Esta perspectiva complementa el flujo funcional porque se concentra exclusivamente en los valores almacenados en el campo `status`.

Diagrama 6
Diagrama de estados del caso



Después de la carga, el caso permanece registrado. La confirmación de la ROI lo cambia a `roi_confirmada`; la preparación del PGM y el encolado automático lo llevan a `pendiente`; y el consumo de la tarea por parte del worker establece el estado `procesando`.

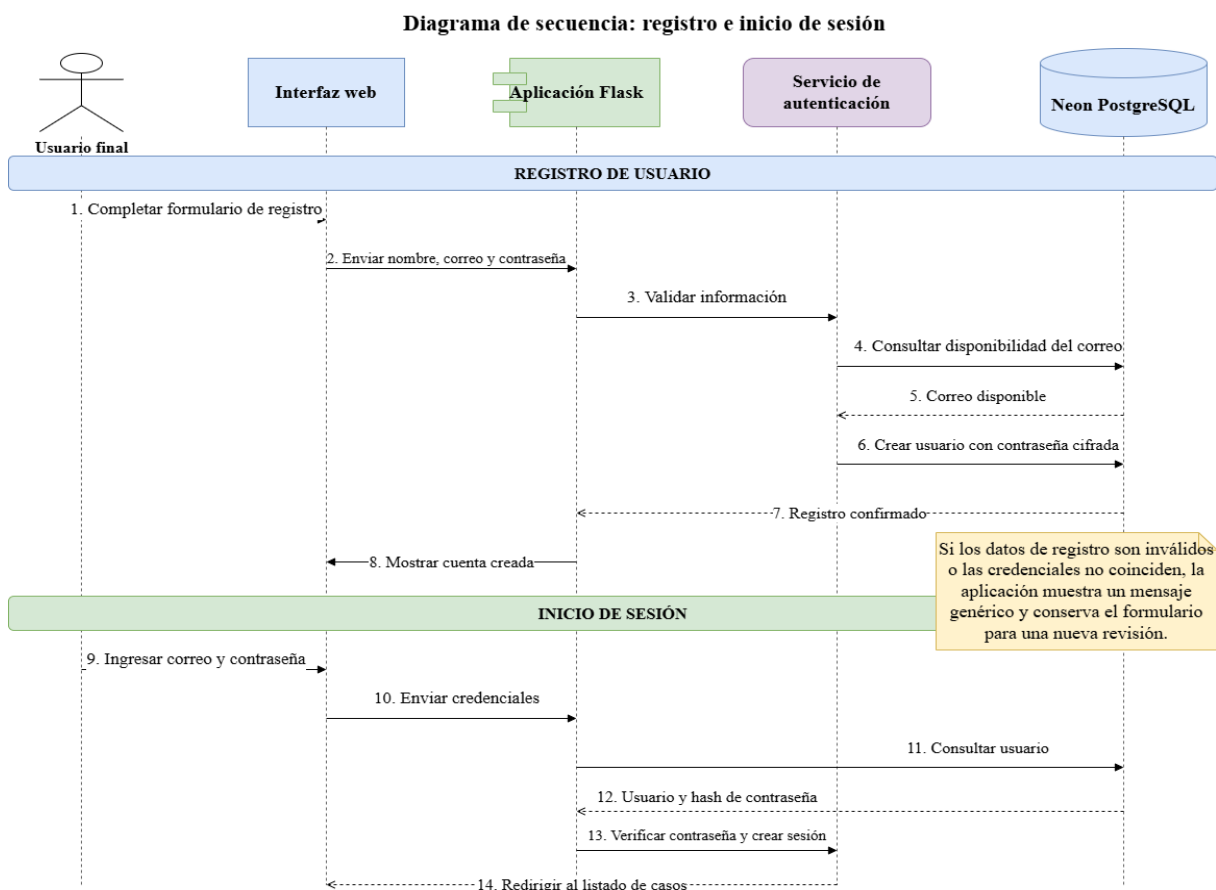
Una ejecución satisfactoria finaliza en `completado`. Los fallos de preparación, cola o simulación llevan el caso a `error`, desde donde puede reintentarse y volver a `pendiente`. La notificación por correo es una operación auxiliar y no modifica el estado `completado`. La eliminación retira el registro y sus objetos relacionados, por lo que no se representa como un estado adicional.

5.7. Diagrama de secuencia: registro e inicio de sesión

El diagrama de secuencia de registro e inicio de sesión muestra el orden de las interacciones entre la persona usuaria, la aplicación web, los servicios de registro y autenticación y la base de datos PostgreSQL administrada.

Diagrama 7

Diagrama de secuencia: registro e inicio de sesión



Durante el registro, el usuario envía su nombre, correo y contraseña. El servicio de registro normaliza y valida la información, consulta que el correo no se encuentre ocupado y almacena el usuario con la contraseña transformada mediante un hash seguro. La aplicación confirma la creación de la cuenta sin exponer la credencial original.

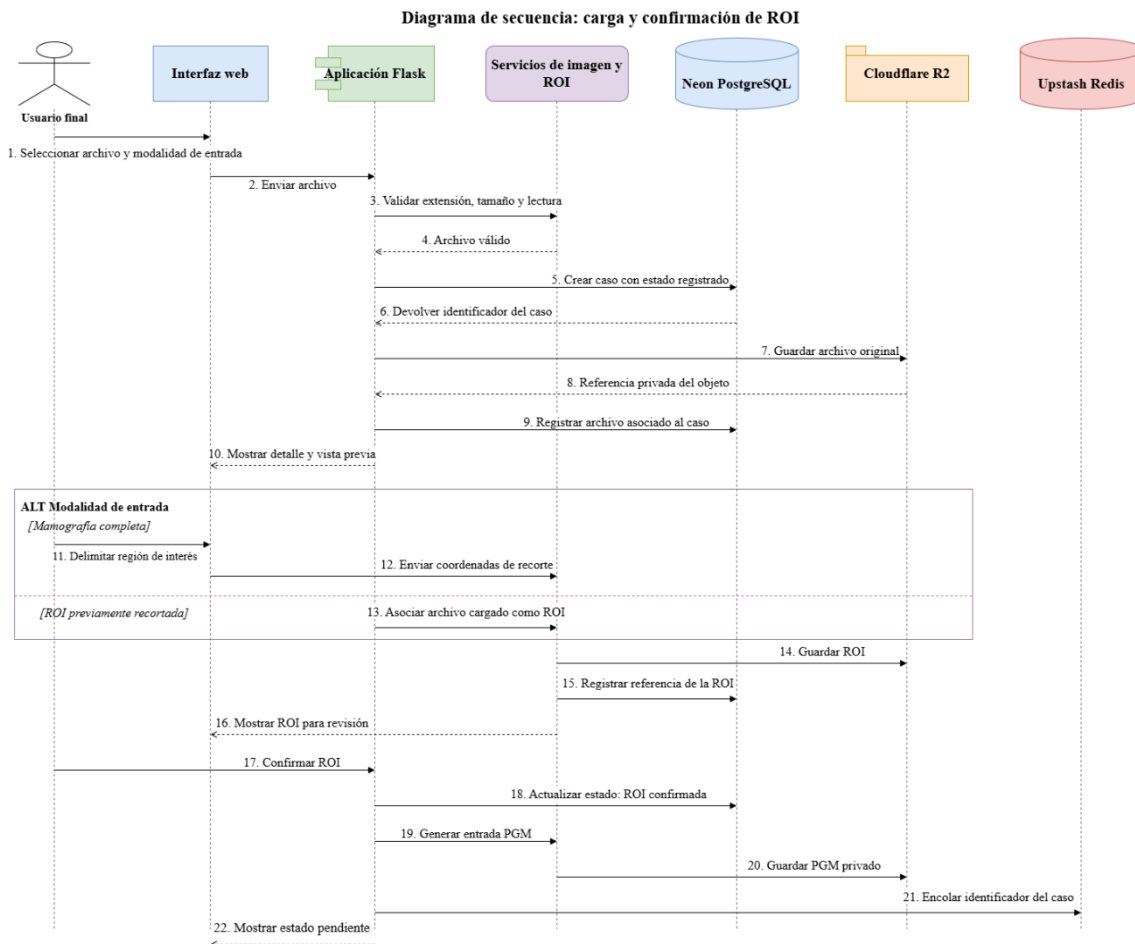
Durante el inicio de sesión, el servicio de autenticación recupera la cuenta por correo y verifica el hash de la contraseña. Si las credenciales son correctas, Flask crea la sesión y redirige al panel de trabajo; en caso contrario, presenta un mensaje controlado. El acceso posterior a casos y resultados se restringe mediante la identidad guardada en la sesión.

5.8. Diagrama de secuencia: carga y confirmación de ROI

El diagrama de secuencia de carga y confirmación de ROI describe la interacción entre el usuario, la aplicación web, los servicios de validación y ROI, Neon, Cloudflare R2 y la cola administrada durante la creación y preparación de un caso.

Diagrama 8

Diagrama de secuencia: carga y confirmación de ROI



Al cargar la imagen, la aplicación valida extensión, tamaño y legibilidad. Luego crea el caso y sus referencias de archivo en Neon y almacena el objeto original de manera privada en R2. Según la modalidad seleccionada, la aplicación presenta la herramienta de recorte o la vista para revisar la ROI previamente delimitada.

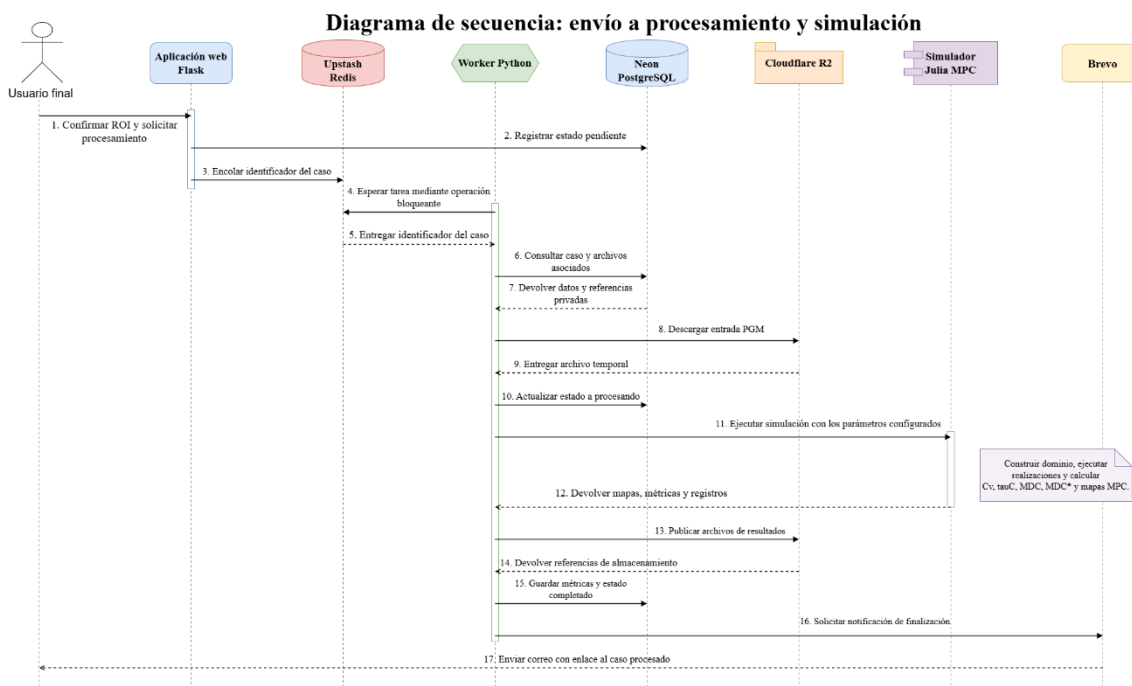
Cuando el usuario confirma la región, el servicio guarda la ROI en R2, genera una representación en escala de grises y el archivo PGM, y registra sus referencias en la tabla files. A continuación cambia el caso a `roi_confirmada`, prepara la tarea, la publica en Upstash Redis y deja el caso pendiente. La respuesta web informa que el procesamiento continuará en segundo plano.

5.9. Diagrama de secuencia: envío a procesamiento y simulación

El diagrama de secuencia de procesamiento y simulación representa la comunicación entre la aplicación web desplegada en Render, Upstash Redis, el worker del servidor universitario, el simulador Julia, Neon, Cloudflare R2 y Brevo. La secuencia comienza con una tarea ya preparada y finaliza con resultados disponibles o con un error controlado.

Diagrama 9

Diagrama de secuencia: envío a procesamiento y simulación



El worker espera nuevas tareas mediante una operación bloqueante sobre Redis. Al recibir el identificador del caso, consulta sus datos en Neon, establece el estado procesando y descarga desde R2 la entrada PGM requerida. Los archivos de trabajo se mantienen temporalmente dentro del directorio de ejecución del contenedor.

El worker invoca al simulador Julia con los parámetros configurados. Julia construye el dominio y los obstáculos, ejecuta las realizaciones MPC y genera mapas, series y métricas. Después, el worker valida las salidas, publica los objetos en R2 y persiste en Neon los valores MDC, MDC0, MDC normalizado y su variación entre realizaciones.

Si el proceso finaliza correctamente, el caso queda completado y el worker solicita a Brevo una notificación con el enlace HTTPS al detalle. Si ocurre un error, registra una descripción controlada y conserva el estado error. Cuando el usuario consulta el caso,

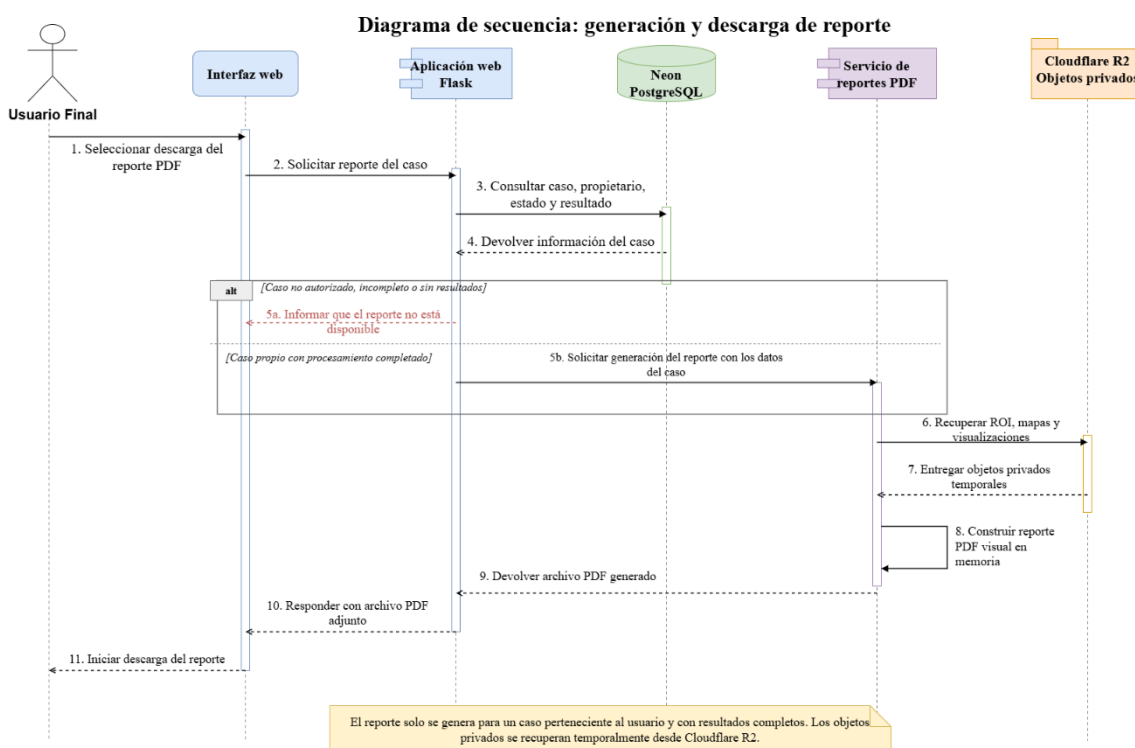
Render obtiene los datos de Neon y presenta los recursos privados recuperados desde R2 con autorización temporal.

5.10. Diagrama de secuencia: generación y descarga de reporte

El diagrama de secuencia de generación y descarga de reportes muestra la interacción entre el usuario, la aplicación web, el servicio de exportación, Neon y Cloudflare R2. La aplicación verifica primero que el caso pertenezca al usuario autenticado y que disponga de resultados completos.

Diagrama 10

Diagrama de secuencia: generación y descarga de reporte



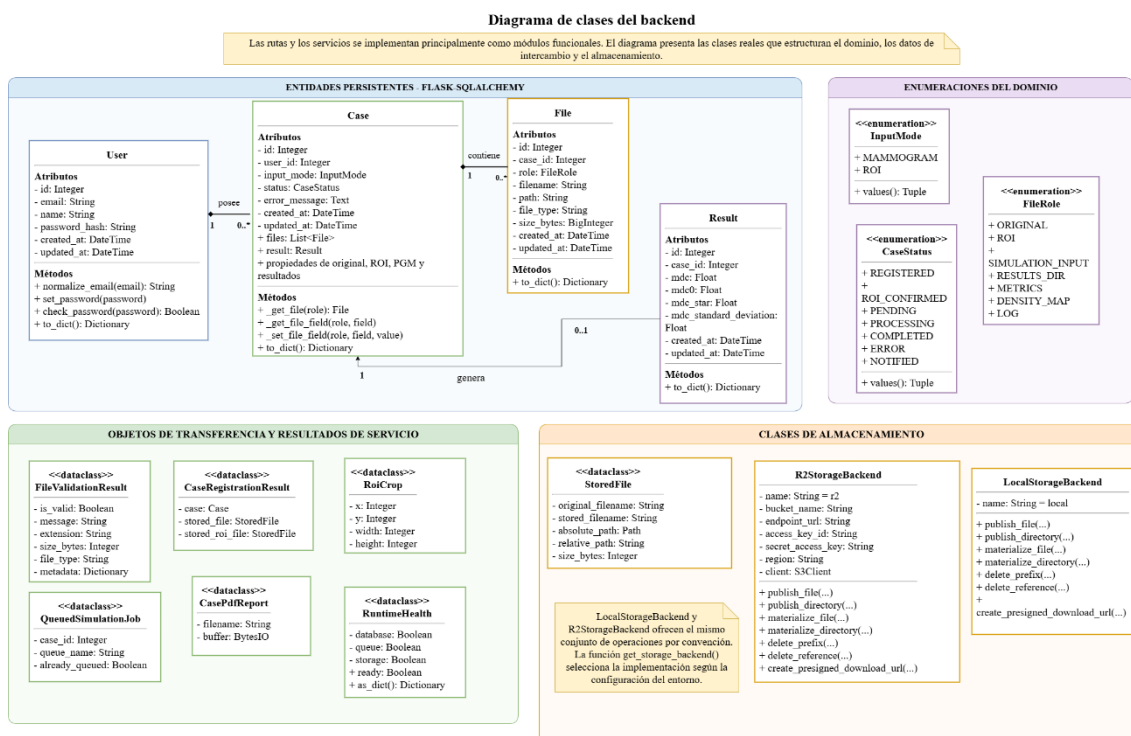
Para generar el PDF, el servicio recupera de Neon los datos y métricas del caso y obtiene desde R2 las imágenes principales. Con esta información construye en memoria un reporte visual y explicativo, que la aplicación devuelve como descarga sin publicar permanentemente los objetos privados.

Para generar el paquete de resultados, el servicio reúne los archivos autorizados del caso, crea el manifiesto y organiza las evidencias dentro de un ZIP. Tanto el PDF como el paquete se producen bajo demanda y mantienen la separación entre los datos estructurados almacenados en Neon y los archivos conservados en R2.

5.11. Diagrama de clases del backend

El diagrama de clases del backend presenta las entidades persistentes y las enumeraciones que restringen sus valores. Incluye User, Case, File y Result, junto con CaseStatus, InputMode y FileRole.

Diagrama 11
Diagrama de clases del backend



User representa la cuenta e incorpora operaciones para normalizar el correo, establecer y verificar la contraseña y exponer datos no sensibles. Case mantiene el propietario, la modalidad, el estado y el mensaje de error; además, ofrece propiedades derivadas para localizar archivos por rol. File registra los metadatos y la referencia de cada objeto. Result almacena las métricas de difusión de un caso.

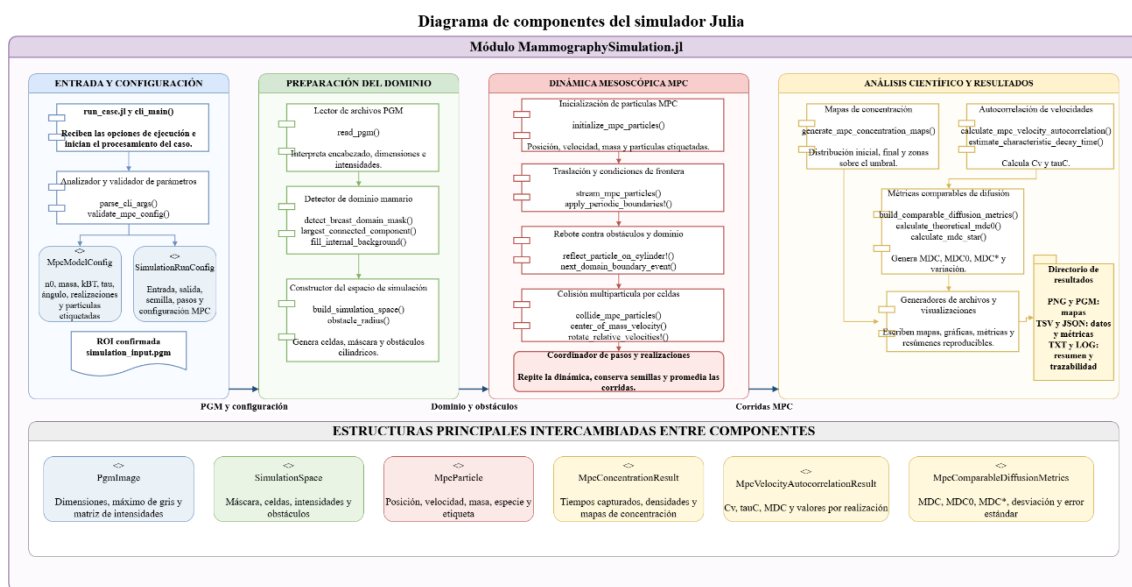
La relación entre User y Case es de uno a muchos; entre Case y File también es de uno a muchos; y entre Case y Result es de uno a cero o uno. Las composiciones aplican eliminación en cascada. Las enumeraciones limitan los estados, modalidades y roles admitidos, lo que reduce inconsistencias y centraliza las reglas del modelo.

5.12. Diagrama de componentes del simulador Julia

El diagrama de componentes del simulador Julia presenta la descomposición funcional del módulo científico y las dependencias que conducen desde la lectura del PGM hasta la escritura de mapas y métricas reproducibles.

Diagrama 12

Diagrama de componentes del simulador Julia



El script run_case.jl actúa como punto de entrada. Este valida la configuración, carga el PGM como matriz de intensidades, detecta el dominio mamario y construye una caja plana dividida en celdas con obstáculos cilíndricos cuyos radios se derivan de la imagen. A continuación inicializa partículas continuas y las condiciones de cada realización.

El motor MPC ejecuta translación libre, tratamiento de fronteras, rebotes contra obstáculos y colisiones multipartícula. Los componentes de medición registran concentración, distribución espacial y autocorrelación de velocidades; con esta información se estiman tauC, MDC, MDC0 y MDC normalizado. Finalmente, el módulo de salida genera mapas PGM/PNG, archivos JSON y TSV, registros de ejecución y visualizaciones destinadas a la aplicación y al reporte.

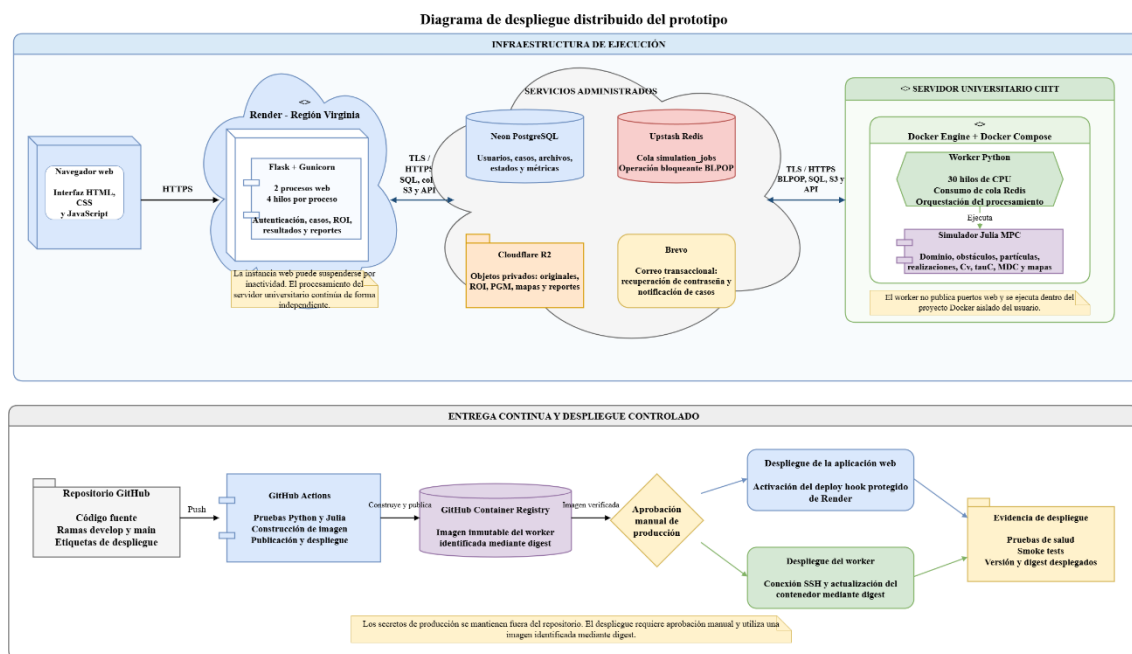
5.13. Diagrama de despliegue distribuido del prototipo

El diagrama de despliegue distribuido muestra la ubicación física de los componentes de producción, sus canales de comunicación y el mecanismo utilizado para publicar

nuevas versiones. A diferencia del entorno local, la solución no concentra todos los servicios en un único host.

Diagrama 13

Diagrama de despliegue distribuido del prototipo



El navegador accede por HTTPS a la aplicación Flask/Gunicorn ejecutada en un contenedor Docker de Render. La aplicación utiliza Neon PostgreSQL para datos estructurados, Upstash Redis para la cola, Cloudflare R2 para objetos privados y Brevo para correo transaccional. El worker Python y el simulador Julia se ejecutan dentro de un contenedor Docker Compose aislado en el servidor universitario, sin publicar puertos hacia Internet.

GitHub Actions valida las pruebas de Python y Julia, construye una imagen inmutable del worker y la publica en GitHub Container Registry. Tras una aprobación manual del entorno de producción, el flujo se conecta por SSH al servidor, despliega la imagen fijada por su digest y ejecuta comprobaciones de salud. Render recibe su despliegue mediante un enlace protegido. Las comunicaciones con Neon, Upstash, R2 y Brevo emplean TLS o HTTPS, y los secretos permanecen fuera del repositorio.

Capítulo 6

Implementación del prototipo y gestión del desarrollo

6.1. Organización del desarrollo con Kanban

El desarrollo del prototipo se organizó mediante la metodología Kanban, debido a que permite gestionar el trabajo de forma visual, incremental y flexible. Este enfoque resultó adecuado porque el aplicativo fue construido por módulos funcionales, entre ellos carga de imágenes, gestión de ROI, autenticación, procesamiento en segundo plano, simulación mesoscópica, resultados y reportes.

El trabajo se descompuso en épicas, historias de usuario y actividades técnicas verificables. Las épicas agruparon objetivos amplios del producto, las historias expresaron necesidades observables de los usuarios, y las actividades desarrolladas reunieron las tareas internas necesarias para cumplir cada historia, como validaciones, persistencia, almacenamiento, integración de servicios y pruebas.

Esta organización permitió incorporar cambios durante la construcción del prototipo sin perder trazabilidad. Las nuevas necesidades se ubicaron dentro de la épica correspondiente y se evaluaron de acuerdo con su valor, dependencia y prioridad, manteniendo un avance continuo desde la base técnica hasta el despliegue distribuido.

6.2. Gestión del proyecto en Linear

Para apoyar la aplicación de Kanban se utilizó Linear. En esta plataforma se registró el trabajo operativo, se organizaron las actividades por estado y etiqueta, y se relacionaron con las épicas funcionales del prototipo. Esto permitió conocer qué tareas se encontraban pendientes, en desarrollo, en revisión o completadas.

El desarrollo se realizó mediante ramas independientes con la convención feature/pro-X-descripción. Después de implementar y verificar cada cambio, se creó un Pull Request hacia la rama develop. La rama main se conservó como referencia estable, separada del trabajo incremental y de los ajustes todavía sujetos a revisión.

Linear se utilizó como evidencia de la gestión del proyecto, mientras que las historias de usuario presentadas en este capítulo resumen el valor funcional obtenido. Por esta razón, la exposición académica se organiza por épicas e historias y no reproduce el orden ni la numeración interna de las tareas técnicas.

6.2.1. Estados del tablero

El tablero Kanban se organizó mediante estados que representan el ciclo de vida de cada actividad. Estos estados permitieron identificar si el trabajo estaba pendiente, listo para iniciar, en desarrollo, en revisión o finalizado.

Tabla 13
Estados utilizados en el tablero Kanban

ESTADO	DESCRIPCIÓN
Backlog	Contiene tareas identificadas para el proyecto, pero que aún no han sido priorizadas para su desarrollo inmediato.
Por hacer	Agrupar tareas listas para ser implementadas, con alcance definido y pendientes de iniciar.
En progreso	Representa tareas que se encuentran en desarrollo activo dentro de una rama de trabajo.
En revisión	Incluye tareas implementadas que requieren revisión, verificación o integración mediante Pull Request.
Completado	Contiene tareas finalizadas, verificadas e integradas al flujo principal de desarrollo.

El uso de estos estados facilitó la observación del avance y la detección de tareas que requerían ajustes o dependían de otros trabajos antes de considerarse completadas.

6.2.2. Etiquetas utilizadas

Las etiquetas se utilizaron para clasificar las actividades según el tipo de trabajo o módulo afectado. Esta clasificación permitió reconocer rápidamente si una tarea correspondía a requerimientos, diseño técnico, frontend, backend, base de datos, autenticación, ROI, simulación, procesamiento, resultados, reportes, pruebas o documentación.

Tabla 14
Etiquetas utilizadas en Linear

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
----------	-------------

Requerimientos	Identifica tareas relacionadas con la definición, ajuste o validación de requisitos funcionales y no funcionales.
Diseño técnico	Agrupar tareas vinculadas con arquitectura, flujo del sistema, modelo de datos, diagramas y decisiones técnicas.
Frontend	Corresponde a tareas relacionadas con la interfaz web, plantillas, estilos, vistas, formularios y experiencia de usuario.
Backend	Agrupar tareas relacionadas con rutas, servicios, lógica de negocio, validaciones e integración entre módulos.
Base de datos	Identifica tareas asociadas con modelos, tablas, relaciones, persistencia y consultas en PostgreSQL.
Autenticación	Agrupar tareas relacionadas con registro de usuarios, inicio de sesión, cierre de sesión, recuperación de contraseña y control de acceso.
ROI	Corresponde a tareas relacionadas con carga, recorte, confirmación, almacenamiento y preparación de la región de interés.
Simulación	Identifica tareas del simulador mesoscópico, implementación MPC, cálculo científico y parámetros del modelo.
Procesamiento	Agrupar tareas relacionadas con worker, procesamiento en segundo plano, estados, errores y reintentos.
Resultados	Corresponde a tareas de generación, visualización, comparación e interpretación de salidas del procesamiento.
Reportes	Identifica tareas relacionadas con generación de reportes PDF, paquetes de resultados y evidencia descargable.
Pruebas	Agrupar tareas de validación funcional, pruebas técnicas, flujo completo y comprobación de errores.
Documentación	Corresponde a tareas de actualización de documentos, matriz de requisitos, evidencias y soporte para la tesis.

6.3. Backlog general del proyecto

El backlog general se mantuvo como un inventario evolutivo del trabajo necesario para construir el prototipo. Para su presentación en esta investigación se organizó en siete épicas, cada una asociada con un objetivo funcional o técnico. Las historias de usuario

describen el valor esperado por los actores, mientras que las actividades internas se resumen dentro de cada historia o en la épica técnica correspondiente.

Esta estructura evitó que la documentación dependiera del orden de creación de las tareas operativas. Cuando surgieron correcciones o nuevas necesidades, estas se incorporaron a la épica relacionada sin alterar el propósito de las historias ya definidas.

Tabla 15
Backlog general organizado por épicas

ÉPICA	PROPÓSITO GENERAL
Épica 1: Diseño técnico y arquitectura	Definir la estructura del proyecto, el modelo de datos, el flujo del caso, la arquitectura distribuida y las decisiones técnicas base.
Épica 2: Carga de imágenes y registro de casos	Permitir la carga de mamografías o ROI, registrar los casos, conservar sus archivos y gestionar su eliminación autorizada.
Épica 3: Delimitación y confirmación de ROI	Permitir recortar, revisar y confirmar la región que será preparada automáticamente para el análisis.
Épica 4: Gestión de usuarios y privacidad de casos	Incorporar cuentas, sesiones, recuperación de contraseña, acceso privado a casos y eliminación de cuenta.
Épica 5: Procesamiento en segundo plano	Permitir el seguimiento del procesamiento, el reintento ante errores y la notificación de finalización.
Épica 6: Simulación y cálculo de métricas	Ejecutar el modelo Julia/MPC sobre la ROI, generar métricas y conservar condiciones reproducibles.
Épica 7: Resultados, comparación y reportes	Presentar mapas y métricas, comparar casos propios y exportar resultados comprensibles.

El backlog permitió mantener una visión conjunta del producto sin convertir el capítulo en un listado de tareas. La relación entre planificación e implementación se evidencia mediante las actividades desarrolladas y los criterios de aceptación de cada historia.

6.4. Historias de usuario organizadas por épicas

Las historias de usuario se redactaron desde la perspectiva de actores que reciben un valor observable del prototipo. Se procuró que fueran independientes, negociables,

valiosas, estimables, pequeñas y comprobables, de acuerdo con los principios INVEST [54]. Cada tabla incluye las actividades desarrolladas para cumplir la historia, sus criterios de aceptación y el resultado obtenido.

Las validaciones, conversiones, servicios, colas, almacenamiento y demás responsabilidades internas no se formularon como historias del sistema. Estas tareas técnicas se incorporaron dentro de las actividades desarrolladas de la historia a la que dan soporte.

6.4.1. Épica 1: Diseño técnico y arquitectura

La primera épica reunió la base técnica requerida para construir el producto: estructura modular del repositorio, aplicación Flask, modelo relacional, flujo de estados del caso, almacenamiento privado, servicios administrados, contenedores y despliegue distribuido. Estas actividades no se redactaron como historias de usuario porque describen decisiones internas de ingeniería y no una necesidad directa de un actor final.

Su resultado fue una arquitectura cliente-servidor distribuida, con la aplicación web separada del worker de procesamiento, persistencia en PostgreSQL, cola Redis, almacenamiento de objetos, correo transaccional y ejecución reproducible mediante Docker. Esta base permitió desarrollar las historias funcionales de las épicas posteriores.

6.4.2. Épica 2: Carga de imágenes y registro de casos

Esta épica representa el punto de entrada del flujo. Agrupó las funciones que permiten incorporar una mamografía completa o una ROI recortada, validar la entrada, registrar un caso consultable y gestionar su eliminación cuando pertenece al usuario autenticado.

6.4.2.1. Historia de usuario 1: Carga de mamografía completa

Historia de Usuario 1

HU-01: Carga de mamografía completa

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-01
Nombre	Carga de mamografía completa
Actor	Usuario final

Historia de usuario	Como usuario final, quiero cargar una mamografía completa, para seleccionar posteriormente la región que deseo analizar.
Actividades desarrolladas	Se implementó una interfaz de selección, validación de formatos compatibles, registro de metadatos y almacenamiento privado del archivo original.
Criterios de aceptación	El usuario puede seleccionar un archivo válido; los archivos incompatibles se rechazan con un mensaje claro; la imagen queda vinculada con un caso propio.
Resultado obtenido	El prototipo admite mamografías completas como entrada inicial del flujo.

6.4.2.2. Historia de usuario 2: Carga de ROI recortada

Historia de Usuario 2

HU-02: Carga de ROI recortada

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-02
Nombre	Carga de ROI recortada
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero cargar una ROI previamente recortada, para analizar directamente la región seleccionada.
Actividades desarrolladas	Se incorporó una modalidad de entrada directa, validación del archivo, vista previa y asociación de la ROI con el caso.
Criterios de aceptación	La ROI válida queda registrada; puede revisarse antes de confirmarla; el flujo continúa sin requerir un recorte adicional.
Resultado obtenido	El usuario puede iniciar el análisis con una región de interés preparada previamente.

6.4.2.3. Historia de usuario 3: Registro del caso

Historia de Usuario 3

HU-03: Registro del caso

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-03
Nombre	Registro del caso
Actor	Usuario final

Historia de usuario	Como usuario final, quiero que cada imagen cargada se registre como un caso, para consultar posteriormente su estado y sus resultados.
Actividades desarrolladas	Se creó el registro con identificador, fecha, modalidad, tipo, tamaño, estado, propietario y referencias privadas de archivos.
Criterios de aceptación	Cada carga válida genera un caso identificable; la información coincide con el archivo almacenado; el caso aparece en el listado del propietario.
Resultado obtenido	Las entradas quedan organizadas como casos trazables y consultables.

6.4.2.4. Historia de usuario 4: Eliminación de caso

Historia de Usuario 4

HU-04: Eliminación de caso

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-04
Nombre	Eliminación de caso
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero eliminar un caso propio con confirmación previa, para retirar registros que ya no necesito.
Actividades desarrolladas	Se agregó una acción de eliminación con confirmación, validación de propiedad y retiro de registros y objetos privados asociados.
Criterios de aceptación	Solo el propietario puede eliminar el caso; la interfaz solicita confirmación; el caso eliminado deja de aparecer en su listado.
Resultado obtenido	El usuario puede gestionar y depurar sus casos sin afectar información ajena.

6.4.3. Épica 3: Delimitación y confirmación de ROI

Esta épica agrupó las funciones con las que el usuario define la región que será analizada. El sistema permite recortar una mamografía, revisar la ROI y confirmarla; la conversión a PGM y la preparación técnica se ejecutan de forma automática.

6.4.3.1. Historia de usuario 5: Recorte manual de ROI

Historia de Usuario 5

HU-05: Recorte manual de ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-05
Nombre	Recorte manual de ROI
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero delimitar una región sobre la mamografía, para concentrar el análisis en la zona seleccionada.
Actividades desarrolladas	Se implementó una herramienta visual de recorte, captura de coordenadas y generación del archivo ROI asociado al caso.
Criterios de aceptación	El usuario puede seleccionar una zona válida; el recorte corresponde a la selección; puede repetirlo antes de confirmar.
Resultado obtenido	El prototipo permite obtener una ROI a partir de una mamografía completa.

6.4.3.2. Historia de usuario 6: Vista previa de ROI

Historia de Usuario 6

HU-06: Vista previa de ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-06
Nombre	Vista previa de ROI
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero revisar la ROI asociada al caso, para comprobar visualmente la región antes de procesarla.
Actividades desarrolladas	Se generaron vistas previas para imágenes comunes, DICOM y PGM, respetando el acceso del propietario.
Criterios de aceptación	La ROI se muestra antes de la confirmación; la vista pertenece al caso; el usuario puede volver a recortar cuando corresponda.
Resultado obtenido	La región seleccionada puede verificarse visualmente antes del análisis.

6.4.3.3. Historia de usuario 7: Confirmación de ROI

Historia de Usuario 7

HU-07: Confirmación de ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
-------	-------------

Identificador	HU-07
Nombre	Confirmación de ROI
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero confirmar la ROI revisada, para iniciar el procesamiento de la región seleccionada.
Actividades desarrolladas	Se implementó la confirmación, conversión automática a escala de grises y PGM, almacenamiento de la entrada y envío del caso a procesamiento.
Criterios de aceptación	Solo una ROI válida puede confirmarse; la entrada PGM queda asociada; el caso cambia a un estado de procesamiento consultable.
Resultado obtenido	La confirmación conecta la selección visual con el análisis automático del caso.

6.4.4. Épica 4: Gestión de usuarios y privacidad de casos

Esta épica agrupó las funciones de cuenta y control de acceso. Su propósito fue identificar al usuario, proteger sus casos, permitir la recuperación de contraseña y ofrecer una forma controlada de eliminar la cuenta.

6.4.4.1. Historia de usuario 8: Registro de usuario

Historia de Usuario 8

HU-08: Registro de usuario

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-08
Nombre	Registro de usuario
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero crear una cuenta, para acceder al prototipo y gestionar mis propios casos.
Actividades desarrolladas	Se implementó el formulario de registro, validación de datos, unicidad del correo y almacenamiento seguro de la contraseña.
Criterios de aceptación	Los datos obligatorios se validan; no se permiten correos duplicados; la contraseña no se guarda en texto plano.
Resultado obtenido	El visitante puede crear una cuenta personal para utilizar el prototipo.

6.4.4.2. Historia de usuario 9: Inicio y cierre de sesión

Historia de Usuario 9

HU-09: Inicio y cierre de sesión

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-09
Nombre	Inicio y cierre de sesión
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero iniciar y cerrar sesión, para acceder de forma segura a mi cuenta y finalizar el acceso cuando lo decida.
Actividades desarrolladas	Se implementó la validación de credenciales, gestión de sesión, protección de rutas y cierre de sesión.
Criterios de aceptación	Las credenciales válidas permiten el acceso; las inválidas se rechazan; las rutas privadas exigen sesión; el cierre elimina la sesión activa.
Resultado obtenido	El acceso a las funciones privadas se controla mediante autenticación.

6.4.4.3. Historia de usuario 10: Recuperación de contraseña

Historia de Usuario 10

HU-10: Recuperación de contraseña

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-10
Nombre	Recuperación de contraseña
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero recuperar mi contraseña mediante correo, para restablecer el acceso si la olvido.
Actividades desarrolladas	Se implementó la solicitud de recuperación, generación de un enlace temporal y envío mediante correo transaccional.
Criterios de aceptación	El enlace se envía al correo registrado; tiene vigencia limitada; permite definir una contraseña nueva sin exponer la anterior.
Resultado obtenido	El usuario puede recuperar el acceso a su cuenta de forma controlada.

6.4.4.4. Historia de usuario 11: Consulta privada de casos

Historia de Usuario 11

HU-11: Consulta privada de casos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-11
Nombre	Consulta privada de casos
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero consultar únicamente los casos asociados a mi cuenta, para mantener separada y privada mi información.
Actividades desarrolladas	Se vinculó cada caso con su propietario y se filtraron el listado, detalle, archivos, resultados, comparación y acciones autorizadas.
Criterios de aceptación	El usuario solo visualiza sus casos; no puede acceder a casos ajenos mediante URL directa; todas las acciones validan propiedad.
Resultado obtenido	Los casos quedan separados por cuenta y protegidos frente a accesos no autorizados.

6.4.4.5. Historia de usuario 12: Eliminación de cuenta

Historia de Usuario 12

HU-12: Eliminación de cuenta

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-12
Nombre	Eliminación de cuenta
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero eliminar mi cuenta mediante una confirmación explícita, para dejar de utilizar el prototipo y retirar mi información asociada.
Actividades desarrolladas	Se incorporó una acción protegida de eliminación, verificación de sesión y limpieza controlada de los datos vinculados.
Criterios de aceptación	La eliminación requiere confirmación; solo afecta a la cuenta autenticada; la sesión termina después de completar la operación.
Resultado obtenido	El usuario dispone de una opción para cerrar definitivamente su cuenta.

6.4.5. Épica 5: Procesamiento en segundo plano

Esta épica reunió las funciones visibles que acompañan la ejecución prolongada del análisis. Redis, el worker Python y el simulador Julia operan internamente; para el usuario, el valor se expresa mediante estados claros, recuperación ante errores y notificación al finalizar.

6.4.5.1. Historia de usuario 13: Consulta del estado del procesamiento

Historia de Usuario 13

HU-13: Consulta del estado del procesamiento

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-13
Nombre	Consulta del estado del procesamiento
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero conocer el estado de mi caso, para saber si está pendiente, procesándose, completado o con error.
Actividades desarrolladas	Se incorporaron estados persistentes, actualización automática desde el worker y presentación del estado en el listado y detalle.
Criterios de aceptación	El estado refleja la etapa actual; puede consultarse sin bloquear la interfaz; los resultados aparecen al completarse el caso.
Resultado obtenido	El usuario puede seguir la evolución del análisis desde la aplicación web.

6.4.5.2. Historia de usuario 14: Reintento ante errores

Historia de Usuario 14

HU-14: Reintento ante errores

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-14
Nombre	Reintento ante errores
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero reintentar un caso que terminó con error, para completar el análisis sin cargar nuevamente la imagen.
Actividades desarrolladas	Se registraron errores controlados, mensajes comprensibles y una acción autorizada para volver a encolar el caso.
Criterios de aceptación	El usuario identifica que ocurrió un error; puede solicitar el reintento; el sistema conserva la trazabilidad y evita duplicar ejecuciones activas.

Resultado obtenido	Los casos fallidos pueden recuperarse mediante un nuevo intento controlado.
---------------------------	---

6.4.5.3. Historia de usuario 15: Notificación de procesamiento completado

Historia de Usuario 15

HU-15: Notificación de procesamiento completado

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-15
Nombre	Notificación de procesamiento completado
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero recibir un correo cuando mi caso termine, para consultar los resultados sin mantener abierta la página.
Actividades desarrolladas	Se integró el envío transaccional al finalizar correctamente el procesamiento, incluyendo un enlace autorizado al caso.
Criterios de aceptación	El correo se dirige al propietario; se envía solo al completarse el caso; un fallo del proveedor no elimina los resultados obtenidos.
Resultado obtenido	El usuario recibe una notificación cuando los resultados están disponibles.

6.4.6. Épica 6: Simulación y cálculo de métricas

Esta épica agrupó el análisis mesoscópico de la ROI confirmada. Internamente comprende la preparación de la imagen, construcción del dominio, generación de obstáculos, dinámica MPC, múltiples realizaciones y cálculo de métricas; para el investigador, el valor está en obtener resultados reproducibles y comparables.

6.4.6.1. Historia de usuario 16: Análisis simulado de la ROI

Historia de Usuario 16

HU-16: Análisis simulado de la ROI

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-16
Nombre	Análisis simulado de la ROI
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero procesar la ROI confirmada, para obtener una representación computacional de la difusión en la región seleccionada.
Actividades desarrolladas	Se normalizó la entrada, se delimitó el dominio mamario, se generaron obstáculos por intensidad y se ejecutó el simulador Julia/MPC.
Criterios de aceptación	La simulación utiliza la ROI confirmada; excluye el fondo externo; genera archivos y registros asociados al mismo caso.
Resultado obtenido	El prototipo ejecuta una simulación mesoscópica sobre el dominio derivado de la ROI.

6.4.6.2. Historia de usuario 17: Obtención de métricas de difusión

Historia de Usuario 17

HU-17: Obtención de métricas de difusión

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-17
Nombre	Obtención de métricas de difusión
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero obtener métricas del caso procesado, para describir el comportamiento relativo del modelo.
Actividades desarrolladas	Se calcularon C_v , tiempo característico τ_C , MDC, MDC0, MDC normalizado y variación entre realizaciones.
Criterios de aceptación	El caso completado conserva métricas numéricas; los valores proceden de la simulación; pueden consultarse y compararse posteriormente.
Resultado obtenido	El prototipo genera indicadores computacionales de difusión asociados al caso.

6.4.6.3. Historia de usuario 18: Reproducibilidad del análisis

Historia de Usuario 18

HU-18: Reproducibilidad del análisis

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-18
Nombre	Reproducibilidad del análisis
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero conservar las condiciones de la simulación, para revisar y repetir análisis comparables.
Actividades desarrolladas	Se registraron semilla, pasos, realizaciones, partículas etiquetadas, parámetros MPC, versión ejecutada y archivos generados.
Criterios de aceptación	Los parámetros quedan asociados al resultado; la misma configuración puede identificarse; los archivos mantienen referencias trazables.
Resultado obtenido	Cada resultado conserva información suficiente para respaldar su repetición y revisión académica.

6.4.7. Épica 7: Resultados, comparación y reportes

Esta épica agrupó la presentación de las salidas del procesamiento. Su propósito fue transformar archivos y valores técnicos en mapas, métricas explicadas, comparaciones y documentos que el usuario pueda consultar sin confundirlos con un diagnóstico clínico.

6.4.7.1. Historia de usuario 19: Visualización de resultados

Historia de Usuario 19

HU-19: Visualización de resultados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-19
Nombre	Visualización de resultados
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero visualizar los resultados de mi caso, para revisar de forma clara las salidas generadas por el procesamiento.

Actividades desarrolladas	Se diseñó una vista con región utilizada, obstáculos, caja de simulación, mapas, curva Cv y resumen de métricas.
Criterios de aceptación	Los resultados pertenecen al caso seleccionado; las imágenes se muestran de forma legible; la vista solo aparece cuando existen salidas válidas.
Resultado obtenido	El usuario consulta los resultados principales dentro del detalle del caso.

6.4.7.2. Historia de usuario 20: Consulta de métricas explicadas

Historia de Usuario 20

HU-20: Consulta de métricas explicadas

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-20
Nombre	Consulta de métricas explicadas
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero consultar las métricas con explicaciones sencillas, para comprender qué representa cada valor.
Actividades desarrolladas	Se incorporaron nombres descriptivos, definiciones breves, ayudas contextuales y advertencias sobre el alcance académico.
Criterios de aceptación	Cada métrica principal incluye una explicación; se diferencia el resultado computacional de una interpretación clínica; la información es legible.
Resultado obtenido	Las métricas pueden interpretarse desde la interfaz sin depender de archivos técnicos.

6.4.7.3. Historia de usuario 21: Comparación de casos procesados

Historia de Usuario 21

HU-21: Comparación de casos procesados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-21
Nombre	Comparación de casos procesados
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero comparar casos propios procesados con condiciones compatibles, para observar diferencias entre sus métricas principales.
Actividades desarrolladas	Se implementó la selección de casos completados, validación de propiedad y presentación de valores y diferencias en una vista comparativa.
Criterios de aceptación	Solo se comparan casos autorizados y completados; se muestran métricas equivalentes; la comparación no se presenta como conclusión clínica.
Resultado obtenido	El prototipo permite contrastar resultados computacionales entre casos del mismo usuario.

6.4.7.4. Historia de usuario 22: Descarga de reporte y resultados

Historia de Usuario 22

HU-22: Descarga de reporte y resultados

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Identificador	HU-22
Nombre	Descarga de reporte y resultados
Actor	Usuario final
Historia de usuario	Como usuario final, quiero descargar un reporte comprensible y los resultados autorizados, para conservar la evidencia del caso procesado.
Actividades desarrolladas	Se generó un PDF con datos, imágenes, métricas y explicaciones, además de un paquete de resultados protegido mediante acceso temporal.
Criterios de aceptación	La descarga solo está disponible para casos propios completados; el PDF contiene las salidas principales; los archivos privados no se exponen públicamente.

Resultado obtenido	El usuario puede conservar un reporte visual y un paquete asociado al caso.
---------------------------	---

6.5. Relación entre épicas y módulos implementados

Las épicas permitieron relacionar las necesidades del producto con módulos concretos del prototipo. Las actividades desarrolladas dentro de las historias reunieron el trabajo técnico necesario para que cada capacidad pudiera utilizarse y verificarse desde la perspectiva del actor correspondiente.

Tabla 16
Relación entre épicas y módulos implementados

Épica	Actividades desarrolladas	Resultado dentro del prototipo
Diseño técnico y arquitectura	Estructura modular, modelo relacional, almacenamiento privado, contenedores y despliegue distribuido.	Base técnica separada en aplicación web, servicios administrados y worker de simulación.
Carga de imágenes y registro de casos	Interfaz de carga, validación, persistencia, propiedad, almacenamiento y eliminación autorizada.	Casos trazables creados desde mamografías completas o ROI recortadas.
Delimitación y confirmación de ROI	Recorte visual, vista previa, confirmación, conversión a PGM y envío automático.	ROI preparada como entrada reproducible del procesamiento.
Gestión de usuarios y privacidad	Registro, sesiones, recuperación de contraseña, autorización por propietario y eliminación de cuenta.	Acceso personal y separación de casos por usuario.
Procesamiento en segundo plano	Cola Redis, worker, estados, reintentos y correo de finalización.	Simulación prolongada sin bloquear la aplicación web.
Simulación y cálculo de métricas	Dominio mamario, obstáculos, partículas MPC, realizaciones, Cv, tauC, MDC y MDC*.	Resultados numéricos y visuales derivados de la ROI.

Resultados, comparación y reportes	Vista de resultados, ayudas contextuales, comparación, PDF y paquete descargable.	Información organizada y comprensible para consulta académica.
---	---	--

6.6. Resumen de la implementación

La implementación se desarrolló de forma modular a partir de las siete épicas definidas. La base técnica permitió incorporar progresivamente la carga de imágenes, el registro de casos, la delimitación de ROI, la gestión de usuarios, el procesamiento en segundo plano, la simulación mesoscópica y la presentación de resultados.

Desde la perspectiva del usuario, el prototipo permite crear una cuenta, cargar una mamografía o ROI, revisar y confirmar la región de interés, consultar el estado del procesamiento, recibir una notificación al finalizar y acceder a mapas, métricas, comparaciones y reportes de sus propios casos.

La solución se desplegó de forma distribuida. La aplicación Flask y Gunicorn se ejecuta en Render; PostgreSQL se administra mediante Neon; la cola utiliza Upstash Redis; los archivos privados se almacenan en Cloudflare R2; Brevo gestiona el correo transaccional; y el worker Python con el simulador Julia/MPC se ejecuta en Docker dentro del servidor universitario. GitHub Actions valida y publica imágenes inmutables para realizar despliegues controlados.

El desarrollo mantuvo un alcance académico e investigativo. Por ello, las salidas se presentan como resultados computacionales del modelo y no como diagnósticos clínicos. Esta distinción se conserva en la interfaz, las comparaciones y los reportes generados.

Capítulo 7

Validación, pruebas y resultados del prototipo

7.1. Estrategia de validación

7.1.1. Objetivo y alcance de las pruebas

La validación tuvo como objetivo comprobar que el prototipo cumpliera las funciones definidas en la especificación de requisitos y que sus componentes pudieran operar de manera conjunta. Se evaluaron la autenticación, la gestión privada de casos, la carga y preparación de imágenes, la delimitación de la ROI, el procesamiento en segundo plano, la simulación MPC, la consulta de métricas, la comparación de casos, la generación de reportes y el envío de correos transaccionales. También se incorporó un plan de pruebas de rendimiento para medir el comportamiento de la aplicación web bajo escenarios controlados y una comparación del tiempo de simulación entre el entorno local y el servidor universitario.

El alcance de estas pruebas es técnico y funcional. Por tanto, se verifica que el software reciba, procese, almacene y presente información de manera consistente, pero no se evalúan sensibilidad, especificidad, capacidad diagnóstica ni utilidad clínica. Los resultados numéricos describen el comportamiento del modelo computacional construido a partir de una ROI y deben interpretarse dentro del carácter académico del prototipo.

7.1.2. Entornos y datos de prueba

La validación se apoyó en tres entornos complementarios. El entorno local se utilizó durante el desarrollo y para obtener una referencia inicial del tiempo de simulación. GitHub Actions proporcionó un mecanismo reproducible para revisar la entrega versionada, comprobar que no se publicaran secretos, construir las imágenes Docker y desplegar una versión identificable. Finalmente, el entorno de producción permitió validar la aplicación web en Render, PostgreSQL en Neon, la cola Redis en Upstash, el almacenamiento privado en Cloudflare R2, el correo transaccional mediante Brevo y el worker Python/Julia ejecutado en el servidor universitario CIITT.

Como entradas se emplearon imágenes en formatos admitidos por el sistema y archivos PGM derivados de ROI. Para la comprobación operativa en producción se utilizaron imágenes de ejemplo sin datos personales identificables. La ROI benigna

empleada como referencia se procesó correctamente, mientras que la ejecución asociada a la ROI maligna finalizó con error. Ambos resultados permitieron documentar la ruta satisfactoria y la respuesta del sistema ante una ejecución no satisfactoria.

7.1.3. Criterios de aceptación y evidencias

Cada prueba se consideró conforme cuando el resultado observado coincidió con el comportamiento esperado, el estado del caso se mantuvo consistente durante el flujo y la información permaneció asociada únicamente al usuario propietario. También se verificó que no se expusieran credenciales, rutas internas ni archivos privados durante la interacción con el prototipo.

Las evidencias se obtuvieron mediante capturas de las interfaces, estados registrados en PostgreSQL, tareas administradas mediante Redis, objetos privados almacenados en Cloudflare R2, registros del worker, mensajes de correo transaccional, respuestas de los endpoints de salud y ejecuciones controladas del flujo de despliegue.

Las pruebas realizadas permitieron comprobar el funcionamiento de los módulos principales, la comunicación entre los servicios distribuidos, el procesamiento en segundo plano y la disponibilidad de la aplicación desplegada. Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de la capa web mediante escenarios de rendimiento ejecutados con k6 y auditorías de calidad realizadas con Lighthouse. Los valores presentados en este capítulo corresponden a resultados observados durante las ejecuciones efectuadas.

Tabla 17
Niveles de validación aplicados al prototipo

NIVEL	PROPÓSITO	EVIDENCIA PRINCIPAL
Validación funcional	Comprobar el flujo observable por el usuario, desde la autenticación y carga de imágenes hasta la consulta de resultados y reportes.	Capturas de autenticación, carga, ROI, casos, resultados, comparación y reportes.
Pruebas de integración	Confirmar la comunicación entre la aplicación web, los servicios administrados y el worker de procesamiento.	Estados en PostgreSQL, tareas en Redis, objetos privados en R2, correos enviados y registros del worker.

Validación del procesamiento	Verificar la ejecución del simulador Julia, la actualización de estados y la generación de métricas, mapas y archivos de resultados.	Registros de ejecución, estado final del caso, métricas calculadas y archivos generados.
Validación del despliegue	Comprobar la versión publicada y la disponibilidad de la aplicación web y del worker en sus respectivos entornos.	Ejecución controlada de GitHub Actions, contenedor del worker, despliegue en Render y endpoints de salud.
Rendimiento y calidad web	Evaluar la respuesta de la aplicación bajo distintos niveles de concurrencia y revisar la calidad técnica de sus interfaces principales.	Reportes de k6, capturas de Lighthouse y tablas de resultados obtenidos.

7.2. Validación funcional

La validación funcional se realizó desde el navegador y se orientó a las acciones visibles para el usuario. Se revisaron tanto recorridos satisfactorios como respuestas ante datos incompletos o estados que todavía no permiten descargar resultados.

Tabla 18
Resumen de la validación funcional

ÁREA	COMPROBACIÓN REALIZADA	RESULTADO OBSERVADO
Cuenta y sesión	Registro, inicio, cierre de sesión y protección de páginas privadas.	El usuario accede a sus funciones únicamente con una sesión válida.
Recuperación de contraseña	Solicitud de enlace temporal y definición de una nueva contraseña.	El flujo está implementado. Se solicitó la recuperación de contraseña, se recibió el correo con el enlace temporal, se definió una nueva contraseña y se verificó

		posteriormente el inicio de sesión con las nuevas credenciales.
Carga y validación	Selección de imagen, retiro del archivo elegido, formatos válidos y rechazo de entradas incorrectas.	Los archivos admitidos continúan el flujo y los errores se presentan de forma controlada.
Registro de caso	Creación del caso y asociación con la cuenta autenticada.	El caso recibe un identificador y aparece únicamente en la lista de su propietario.
ROI	Carga directa, delimitación manual, revisión y confirmación.	La ROI confirmada genera la entrada PGM y habilita el procesamiento.
Gestión de casos	Consulta de estados, acceso al detalle y eliminación con confirmación.	Las acciones respetan el propietario y el estado actual del caso.
Resultados	Consulta de mapas, métricas, Cv y estado final.	Los resultados se muestran cuando el procesamiento ha concluido.
Comparación	Selección de dos casos procesados con parámetros equivalentes.	La vista calcula diferencias y rechaza comparaciones no equivalentes.
Exportación	Descarga de PDF y paquete de resultados.	Los enlaces solo están disponibles para casos completados.
Notificación	Recepción del correo al completar el caso.	El mensaje llegó al destinatario e incluyó un enlace al caso.

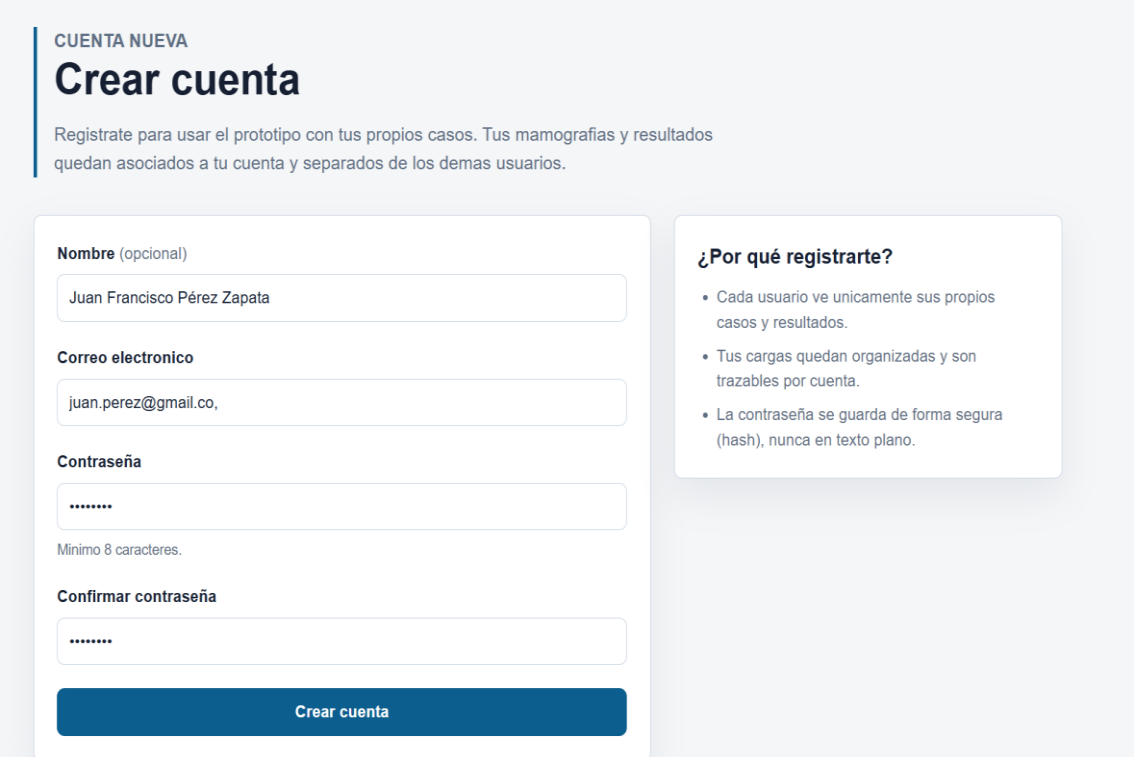
7.2.1. Autenticación y control de acceso

El registro crea una cuenta a partir del nombre, correo y contraseña proporcionados. Después del inicio de sesión, la aplicación conserva la identidad del usuario para asociar los casos y filtrar las consultas. Al cerrar la sesión, las rutas privadas vuelven a requerir autenticación. Esta separación evita que una persona consulte casos ajenos mediante el listado o ingresando directamente una dirección de detalle.

El proceso de autenticación comienza con el registro de una cuenta personal. El formulario solicita el nombre, correo electrónico, contraseña y confirmación de contraseña. El sistema valida el formato de los datos, evita correos duplicados y almacena la contraseña mediante un hash seguro, sin conservarla como texto legible.

Ilustración 5

Interfaz de registro de una nueva cuenta de usuario.



CUENTA NUEVA

Crear cuenta

Regístrate para usar el prototipo con tus propios casos. Tus mamografías y resultados quedan asociados a tu cuenta y separados de los demás usuarios.

Nombre (opcional)

Juan Francisco Pérez Zapata

Correo electrónico

juan.perez@gmail.co,

Contraseña

.....

Minimo 8 caracteres.

Confirmar contraseña

.....

Crear cuenta

¿Por qué registrarte?

- Cada usuario ve únicamente sus propios casos y resultados.
- Tus cargas quedan organizadas y son trazables por cuenta.
- La contraseña se guarda de forma segura (hash), nunca en texto plano.

Una vez registrada la cuenta, el usuario puede iniciar sesión mediante su correo electrónico y contraseña. Si las credenciales son correctas, el sistema crea una sesión y habilita el acceso a las funciones privadas. Los mensajes de error son genéricos para no revelar si una dirección de correo se encuentra registrada.

Ilustración 6

Interfaz de inicio de sesión del prototipo.

ACCESO

Iniciar sesion

Ingresar con tu cuenta para acceder a tus casos y resultados. Solo vos podes ver las mamografías y simulaciones asociadas a tu cuenta.

Correo electronico

matiasvel2003@gmail.com

Contraseña

.....

Iniciar sesion

Olvidaste tu contraseña?

Aun no tienes cuenta? Crear cuenta

Tu sesión

- Accedes unicamente a tus propios casos y resultados.
- Podes cerrar sesion en cualquier momento desde el menu.
- Tus credenciales se validan de forma segura.

La sección de cuenta presenta los datos básicos del usuario, la fecha de registro y la cantidad de casos asociados. Desde esta pantalla se puede acceder a los casos propios, iniciar una nueva carga o solicitar la eliminación permanente de la cuenta. Esta última operación requiere una confirmación adicional mediante la contraseña del usuario.

Ilustración 7

Panel de gestión de cuenta y eliminación del usuario.

CUENTA

Mi cuenta

Revisa los datos de tu cuenta y gestiona tu acceso al prototipo. Solo tú ves esta informacion y los casos asociados a tu cuenta.

Datos de la cuenta

Correo	matiasvel2003@gmail.com
Nombre	Justin Matías Velásquez Chávez
Miembro desde	16/07/2026
Casos registrados	3

Ver mis casos **Cargar nueva imagen**

Zona sensible

Eliminar tu cuenta borra de forma permanente todos tus casos, archivos y resultados. Esta accion no se puede deshacer.

Eliminar cuenta

Cuando el usuario no recuerda su contraseña, puede solicitar su restablecimiento mediante el correo asociado a la cuenta. Como medida contra la enumeración de usuarios, la aplicación muestra una respuesta general sin confirmar públicamente si la dirección ingresada está registrada.

Ilustración 8

Formulario para solicitar la recuperación de contraseña.

RECUPERAR ACCESO

Recuperar contraseña

Ingresar el correo de tu cuenta y te enviaremos un enlace para definir una contraseña nueva.

El enlace caduca por seguridad.

Correo electrónico

matiasvel2003@gmail.com

Enviar enlace

Recordaste tu contraseña? [Iniciar sesión](#)

¿Cómo funciona?

- Te enviamos un enlace unico al correo de tu cuenta.
- El enlace caduca y solo puede usarse una vez.
- Por seguridad, no revelamos si un correo esta registrado.

Si el correo corresponde a una cuenta existente, Brevo envía un mensaje transaccional con un enlace temporal de recuperación. El enlace contiene un token firmado, tiene una vigencia de 60 minutos y deja de ser válido cuando la contraseña cambia, evitando que pueda reutilizarse posteriormente.

Ilustración 9

Correo transaccional con el enlace temporal de recuperación de contraseña.



Al abrir un enlace válido, el usuario accede al formulario para establecer y confirmar una nueva contraseña. El sistema verifica la validez y vigencia del token, aplica las condiciones mínimas de la contraseña y actualiza el hash almacenado. Después del cambio, el usuario puede iniciar sesión con sus nuevas credenciales.

Ilustración 10**Formulario para definir una nueva contraseña de acceso.**

NUEVA CONTRASEÑA

Definir contraseña nueva

Elige una contraseña nueva para tu cuenta. Después podrás iniciar sesión con ella.

Contraseña nueva

Minimo 8 caracteres.

Confirmar contraseña

Guardar contraseña

Seguridad

- La contraseña se guarda cifrada (hash), nunca en texto plano.
- Este enlace deja de funcionar una vez que la cambias.
- Usa una contraseña que no reutilices en otros sitios.

7.2.2. Carga, registro y delimitación de ROI

El flujo de carga permite seleccionar una mamografía completa o una ROI previamente recortada. Si se elige una mamografía completa, el usuario delimita la región mediante la herramienta de recorte y revisa el resultado antes de confirmarlo. Cuando se carga una ROI, la revisión se realiza directamente. En ambos recorridos, la confirmación produce un archivo PGM de entrada y registra las referencias privadas de los archivos asociados al caso.

La validación de archivos se efectúa antes de registrar la carga como válida. Se comprueban la presencia del archivo, extensión, tamaño y capacidad de lectura. Las imágenes comunes se procesan con Pillow, los archivos DICOM con pydicom y los PGM conservan una conversión reproducible.

El flujo comienza con la selección del archivo. La interfaz informa los formatos admitidos y permite cargar la imagen mediante selección directa o arrastrándola desde el dispositivo.

Ilustración 11

Interfaz de selección y carga de imágenes compatibles.

Después de seleccionar el archivo, el usuario indica si corresponde a una mamografía completa o a una ROI previamente recortada.

Ilustración 12

Selección de la modalidad de entrada de la imagen.

Cuando se carga una mamografía completa, la herramienta permite delimitar manualmente una región rectangular sobre la zona que se desea analizar.

Ilustración 13

Delimitación manual de la región de interés.

SELECCION DE ROI

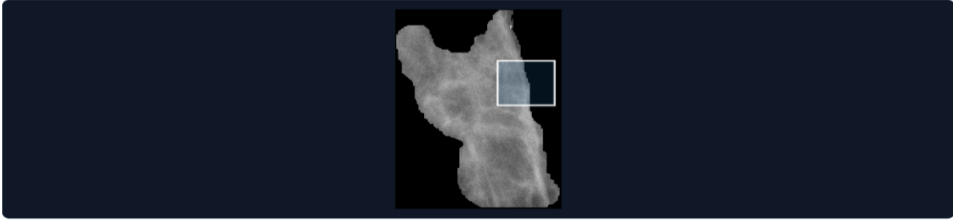
Recortar ROI del caso #7

Delimita una region rectangular sobre la mamografia cargada. La ROI recortada quedara asociada al caso y podrás confirmarla desde el detalle.

¿CÓMO RECORTAR?

1. Arrastra sobre la imagen para dibujar el rectangulo de la region.
2. Puedes volver a dibujar la seleccion las veces que necesites antes de guardar.
3. Guarda el recorte; luego lo confirmas y el PGM se prepara automaticamente.

La ROI debe concentrarse en la zona que quieres analizar. El fondo externo se descartara despues para que la simulacion trabaje sobre tejido valido.



ROI seleccionada: 61 x 59 px.

Guardar recorte
Cancelar

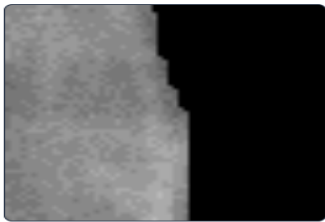
La ROI seleccionada se presenta en una vista previa antes de su confirmación. Al confirmar, el sistema prepara automáticamente la entrada PGM y envía el caso a procesamiento.

Ilustración 14

Vista previa y confirmación de la ROI para procesamiento.

VISTA PREVIA

ROI asociada



Revisa la ROI antes de confirmarla.

SIGUIENTE PASO

ROI cargada

La ROI ya esta asociada al caso. Al confirmarla se generara automaticamente el archivo PGM para la simulacion.

Confirmar y procesar

Ajustar recorte

ESTADO DE PREPARACIÓN

Entrada PGM pendiente

Al confirmar la ROI se generara automaticamente el archivo PGM.

Cargar otra imagen

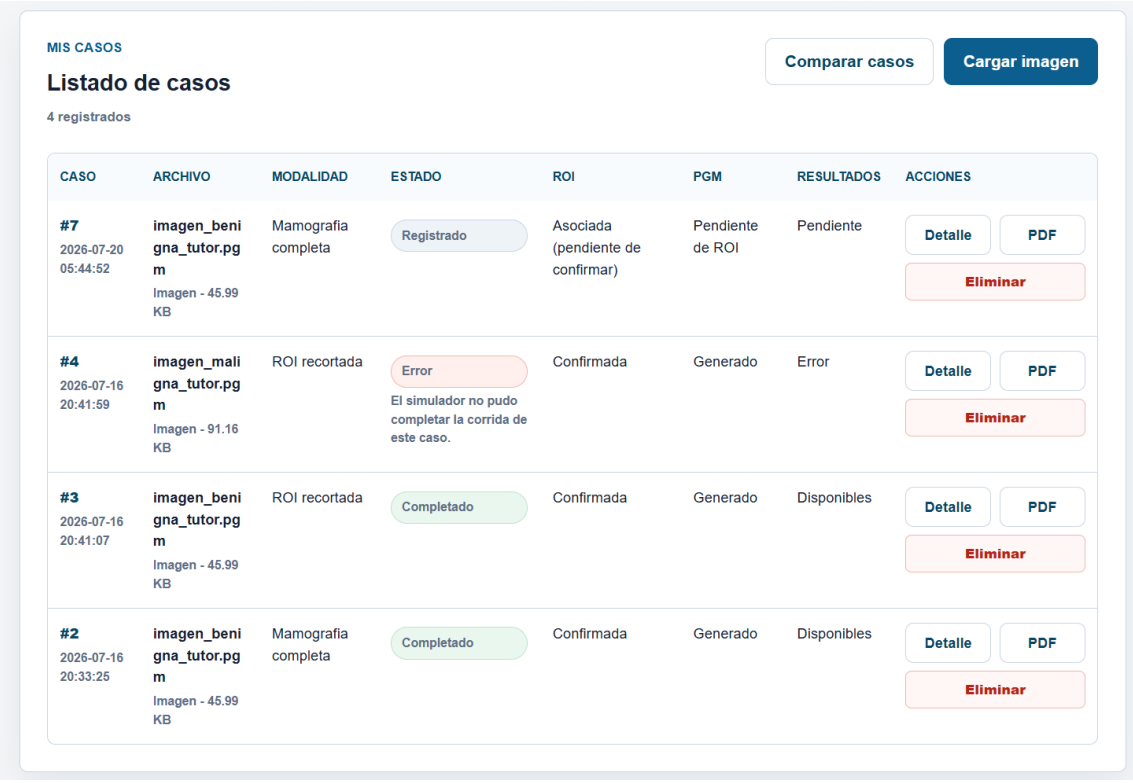
7.2.3. Consulta, privacidad y eliminación de casos

El listado presenta únicamente los casos asociados a la cuenta activa e informa su modalidad, estado de ROI, preparación PGM y disponibilidad de resultados. La interfaz adapta las acciones a la etapa alcanzada: un caso registrado puede requerir confirmación, uno pendiente queda a la espera del worker y uno completado permite consultar o exportar resultados. La eliminación exige una confirmación explícita y elimina tanto la información relacional como los objetos del prefijo privado correspondiente.

La vista de casos reúne las cargas pertenecientes al usuario autenticado y presenta su modalidad, estado de procesamiento, preparación de ROI y disponibilidad de resultados.

Ilustración 15

Listado de casos asociados al usuario autenticado.



MIS CASOS

Listado de casos

4 registrados

Comparar casos Cargar imagen

CASO	ARCHIVO	MODALIDAD	ESTADO	ROI	PGM	RESULTADOS	ACCIONES
#7 2026-07-20 05:44:52	imagen_benigna_tutor.png Imagen - 45.99 KB	Mamografía completa	Registrado	Asociada (pendiente de confirmar)	Pendiente de ROI	Pendiente	Detalle PDF Eliminar
#4 2026-07-16 20:41:59	imagen_maligna_tutor.png Imagen - 91.16 KB	ROI recortada	Error El simulador no pudo completar la corrida de este caso.	Confirmada	Generado	Error	Detalle PDF Eliminar
#3 2026-07-16 20:41:07	imagen_benigna_tutor.png Imagen - 45.99 KB	ROI recortada	Completado	Confirmada	Generado	Disponibles	Detalle PDF Eliminar
#2 2026-07-16 20:33:25	imagen_benigna_tutor.png Imagen - 45.99 KB	Mamografía completa	Completado	Confirmada	Generado	Disponibles	Detalle PDF Eliminar

Antes de eliminar un caso, la aplicación solicita una confirmación explícita e informa que la imagen, la ROI y los resultados asociados serán eliminados permanentemente.

Ilustración 16

Confirmación para la eliminación permanente de un caso.



7.2.4. Resultados, comparación y reportes

La vista de detalle muestra el avance del caso y, al finalizar, organiza las métricas, mapas y ayudas de interpretación. La comparación exige dos casos completados y una configuración compatible, con el fin de evitar diferencias producidas únicamente por parámetros distintos. El reporte PDF reúne la información principal y las imágenes generadas, mientras que el paquete de resultados conserva archivos adicionales para revisión académica.

Se verificó que los botones de descarga no aparezcan como disponibles antes de completar el procesamiento. Esta condición evita generar reportes vacíos o paquetes parciales y mantiene coherencia entre el estado registrado y las acciones ofrecidas al usuario.

Al finalizar el procesamiento, la vista de detalle presenta las etapas completadas, los datos principales, la ROI analizada y el acceso a las métricas y mapas generados.

Ilustración 17
Detalle y seguimiento de un caso procesado.

SEGUIMIENTO DEL CASO

Caso #3

Revisa el avance y consulta los resultados disponibles de esta imagen.

✓ Registro LISTO

ROI recortada

✓ ROI LISTO

ROI confirmada

✓ PGM LISTO

Entrada generada

✓ Resultados LISTO

Resultados disponibles

RESUMEN DEL CASO

Completado

Datos principales

ID DEL CASO

3

FECHA DE CARGA

2026-07-16 20:41:07

TIPO

Imagen

TAMAÑO

45.99 KB

MODALIDAD

ROI recortada

RESULTADOS MPC

Resultados disponibles

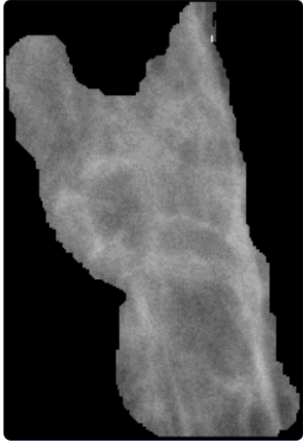
El caso tiene resultados MPC, mapas de concentracion y metricas relativas de difusion asociadas.

GUÍA DEL ANÁLISIS

De la ROI al resultado

VISTA PREVIA

ROI asociada



La función de comparación permite seleccionar dos casos completados para contrastar sus métricas relativas de difusión y resultados MPC.

Ilustración 18
Selección de casos procesados para su comparación.

COMPARACIÓN ACADÉMICA

Comparar casos procesados

Contrasta dos casos completados mediante sus métricas relativas de difusión y mapas MPC. Esta comparación es investigativa y no constituye una interpretación diagnóstica.

SELECCIÓN

Casos con resultados MPC

Caso A

Selecciona un caso

▼

Caso B

Selecciona un caso

▼

Comparar resultados

Cuando los resultados están disponibles, el usuario puede descargar un reporte PDF explicativo o conservar el paquete completo de archivos generados.

Ilustración 19**Opciones de descarga de resultados del caso.****7.2.5. Correo transaccional**

Brevo se empleó para el envío de mensajes transaccionales. En la prueba de producción, el correo de finalización llegó al destinatario e incluyó el enlace público del caso. La clave del proveedor permanece fuera del repositorio y los errores de entrega no muestran su contenido. El mismo mecanismo se utiliza para la recuperación de contraseña mediante un enlace temporal.

Ilustración 20**Correo transaccional de finalización del procesamiento.****7.3. Pruebas de integración y procesamiento en segundo plano****7.3.1. Integración entre la aplicación y los servicios administrados**

La aplicación web conserva datos estructurados en Neon, utiliza Upstash como cola Redis, almacena archivos privados en Cloudflare R2 y envía mensajes mediante Brevo. La validación de disponibilidad confirmó que la aplicación podía establecer las conexiones requeridas mediante canales cifrados. Los endpoints de salud separan la vida

del proceso web de la disponibilidad de sus dependencias, lo que facilita distinguir un servicio iniciado de uno realmente preparado para atender el flujo completo.

Tabla 19
Validación de integración y despliegue

INTEGRACIÓN	VERIFICACIÓN	RESULTADO
Web - Neon	Registro y consulta de usuarios, casos, archivos y resultados mediante conexión TLS.	Disponible.
Web - Upstash	Encolado de identificadores y comprobación de disponibilidad mediante Redis cifrado.	Disponible.
Web/worker - R2	Publicación, materialización y descarga temporal de objetos privados por usuario y caso.	Disponible.
Worker - Julia	Ejecución del simulador dentro de la misma imagen Docker del worker.	Disponible, se registró además un caso de error controlado.
Aplicación - Brevo	Envío de notificación de finalización con remitente verificado.	Correo recibido.
Web - endpoints de salud	Comprobación de vida, base de datos, cola y almacenamiento.	Estado ready con database, queue y storage en ok.
GitHub Actions - servidor	Transferencia de scripts, despliegue por digest y consulta del estado del contenedor.	Ejecución satisfactoria.

7.3.2. Cola Redis y ejecución del worker

Cuando el usuario confirma la ROI, la aplicación registra el caso como pendiente y coloca su identificador en Redis. El worker permanece a la espera mediante una operación bloqueante, por lo que no necesita consultar continuamente la base de datos. Al recibir una tarea, recupera el caso y sus archivos, cambia el estado a procesando, materializa la entrada PGM desde R2 y ejecuta Julia con los parámetros configurados.

Al concluir, el worker publica en R2 el directorio de resultados, guarda en Neon las métricas principales y actualiza el estado del caso. La aplicación web puede permanecer suspendida temporalmente por las condiciones del plan gratuito de Render sin detener el contenedor del worker alojado en el servidor universitario.

7.3.3. Estados, errores y reintentos

Los estados “registrado”, “ROI confirmada”, “pendiente”, “procesando”, “completado” y “error” permiten identificar la etapa alcanzada.. Si Julia finaliza con un código distinto de cero o falta una salida obligatoria, el worker registra el error y evita guardar métricas incompletas como si fueran válidas. La interfaz presenta un mensaje comprensible y permite volver a encolar el caso cuando corresponde.

Ilustración 21

Representación de un caso pendiente de confirmación de ROI.

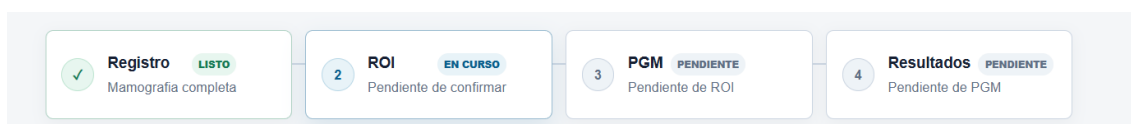


Ilustración 22

Representación de un caso con procesamiento completado.

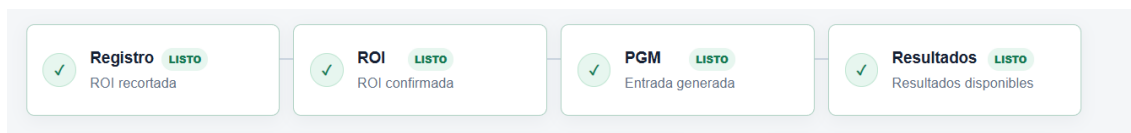
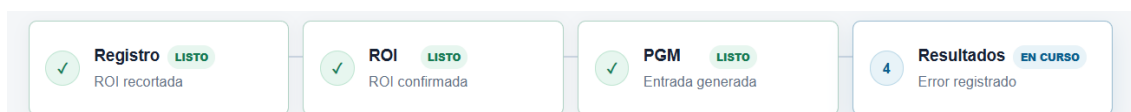


Ilustración 23

Representación de un error durante el procesamiento del caso.

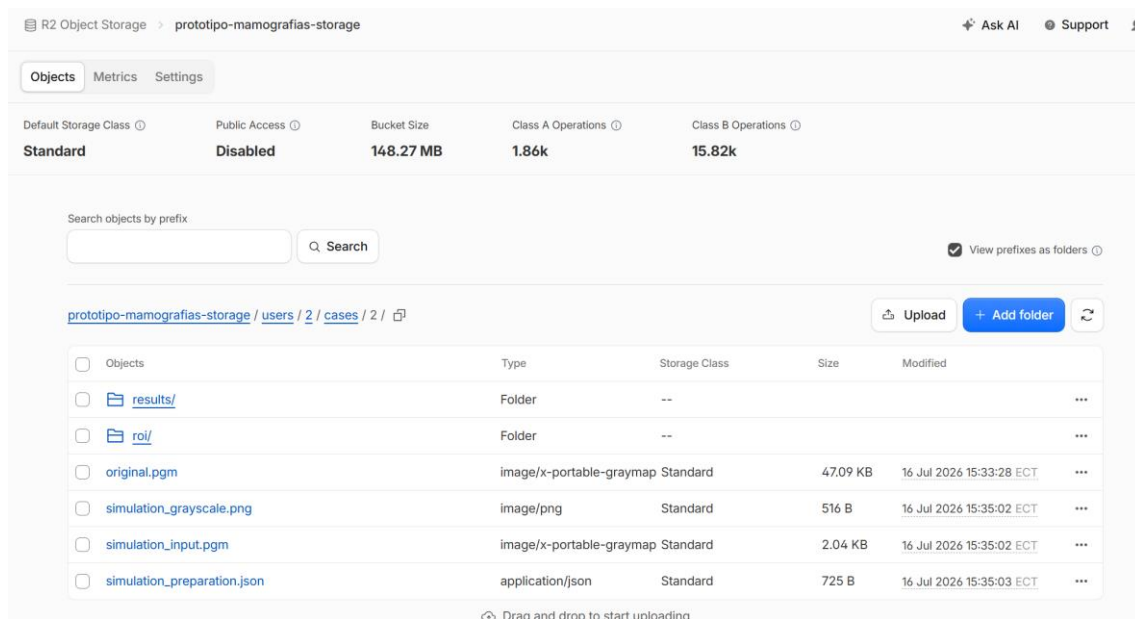


Como parte de la validación del manejo de fallos, el procesamiento de la ROI maligna concluyó con un error acompañado de un mensaje explicativo generado por Julia. Este resultado se utilizó para comprobar que el sistema conserva correctamente el estado de error, aísla la ejecución fallida y permite reencolar la tarea sin afectar los demás casos registrados.

Ilustración 24**Mensaje de error y opción de reintento del procesamiento.****7.3.4. Validación del flujo integral**

La prueba integral se realizó desde la aplicación publicada. Se inició sesión, se cargó una imagen, se confirmó la ROI y se esperó la ejecución en segundo plano. Al finalizar, el caso presentó resultados disponibles, los archivos aparecieron en el almacenamiento R2 y se recibió el correo con el enlace correspondiente. Esta prueba confirmó la colaboración entre la interfaz web, PostgreSQL, Redis, R2, el worker, Julia y el servicio de correo.

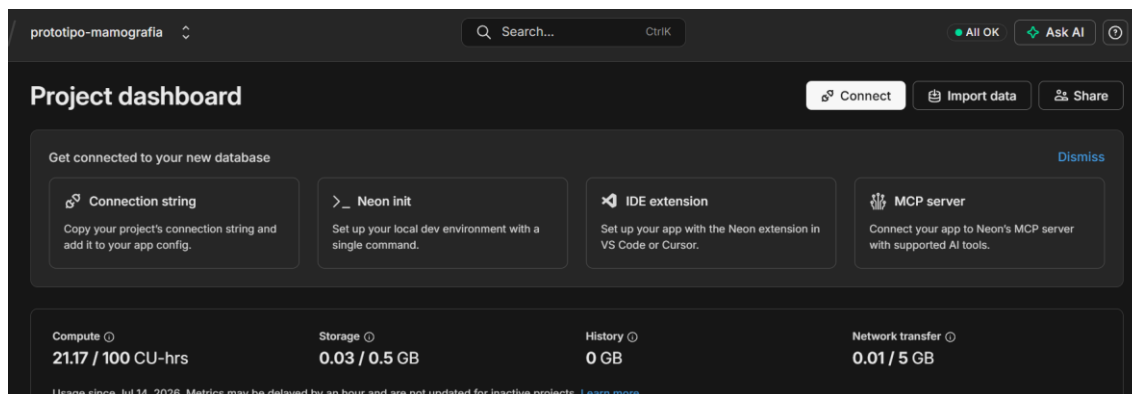
Cloudflare R2 conserva de forma privada los archivos asociados a cada caso, incluyendo la imagen original, la ROI, la entrada PGM y los resultados.

Ilustración 25**Archivos privados de un caso procesado almacenados en Cloudflare R2.**

Neon PostgreSQL proporciona la persistencia de usuarios, casos, estados, métricas y referencias de los archivos generados.

Ilustración 26

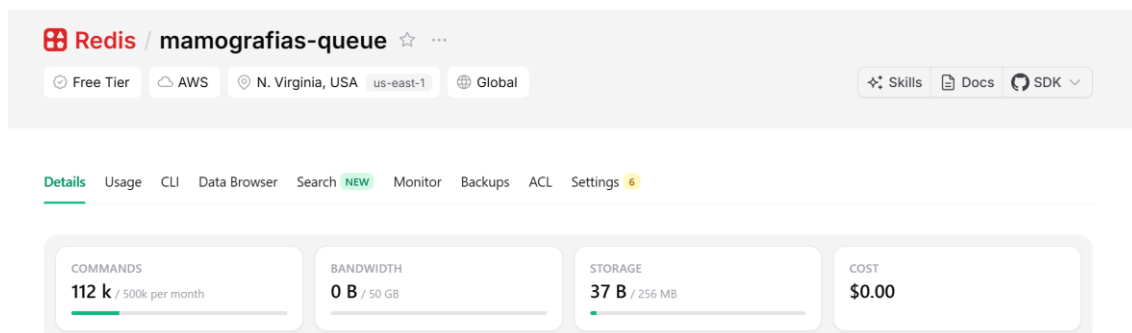
Servicio PostgreSQL administrado en Neon.



Upstash Redis actúa como cola de comunicación entre la aplicación web y el worker encargado del procesamiento.

Ilustración 27

Servicio de cola Redis administrado en Upstash.



7.3.5. Continuidad, aislamiento y tiempos de cola

La validación operativa utilizó una tarea completada y otra finalizada con error para comprobar la conservación de tareas y estados. Redis entregó ambas al worker; la ROI benigna alcanzó el estado completado y la ROI maligna conservó un estado terminal de error después de sus intentos. Los registros del worker y los estados en Neon permitieron reconstruir ambos recorridos sin evidencias de tareas perdidas.

Para la ROI benigna transcurrieron aproximadamente 24,5 segundos entre la creación del registro y la recepción de la tarea por el worker. La ejecución en el servidor se completó en unas 2 horas y 55 minutos. El fallo de la tarea asociada a la ROI maligna

no detuvo el contenedor y la aplicación web continuó permitiendo la consulta de estados mientras el procesamiento se ejecutaba de forma independiente.

Tabla 20

Plan de verificación de la cola y del procesamiento en segundo plano

Aspecto	Procedimiento	Indicador o evidencia	Estado
Conservación de la cola	Contrastar la entrega de una tarea completada y otra finalizada con error desde Redis al worker.	Ambas tareas fueron recibidas y conservaron un estado terminal.	Verificado
Ausencia de pérdida de tareas	Comparar las tareas recibidas con los estados completado o error.	La ROI benigna quedó completada y la ROI maligna quedó en error; ninguna tarea perdió su trazabilidad.	Verificado
Tiempo de espera	Comparar la creación del registro de la ROI benigna con su recepción por el worker.	Espera aproximada de 24,5 segundos.	Verificado
Aislamiento de errores	Observar el comportamiento de la tarea asociada a la ROI maligna después del código 1 de Julia.	No se guardaron métricas parciales y el fallo no alteró las demás tareas.	Verificado
Continuidad del worker	Revisar estado del contenedor después de completar y fallar tareas.	El contenedor permaneció saludable y disponible.	Verificado
Disponibilidad de la web	Consultar estados mientras el worker procesaba en segundo plano.	La aplicación permitió consultar el estado sin esperar el fin de Julia.	Verificado

7.4. Validación del simulador Julia/MPC

7.4.1. Preparación de la ROI y construcción del dominio

La imagen confirmada se convierte a PGM en escala de grises mediante una transformación estable. Para imágenes a color se utiliza luminancia; en entradas de mayor profundidad se aplica una escala fija asociada al rango del formato, en lugar de ajustar el contraste con los valores extremos observados. De esta manera, una misma entrada produce la misma matriz de intensidades y se evita modificar artificialmente las diferencias internas de la ROI.

A partir de la matriz se construye una máscara que separa el fondo exterior de la región válida. La revisión de la máscara confirmó que el exterior conectado al borde queda excluido y que las zonas oscuras internas pertenecientes al tejido se conservan. Cada celda válida genera un obstáculo cilíndrico cuyo radio depende de la intensidad: los tonos más oscuros producen radios mayores y los tonos claros, radios menores.

7.4.2. Dinámica MPC implementada

Las partículas se inicializan con posición continua dentro del volumen asociado a las celdas válidas y con velocidades obtenidas a partir de los parámetros térmicos del modelo. En cada paso se aplica traslación libre, control de fronteras, rebote contra los obstáculos y colisión multipartícula por celdas. La colisión utiliza la velocidad media de la celda y una rotación de las velocidades relativas, conservando la estructura mesoscópica del método.

Las pruebas comprobaron que una partícula no permanece fuera de la máscara mamaria, que el rebote invierte la componente normal de la velocidad y que la colisión conserva la magnitud esperada de las velocidades relativas.

7.4.3. Parámetros y reproducibilidad

La configuración de producción prioriza una ejecución más completa que las pruebas mínimas utilizadas durante el desarrollo. Se ejecutan 200 pasos y tres realizaciones, se siguen 500 partículas para C_v y se utilizan 30 hilos de CPU en el servidor universitario. La semilla base se mantiene fija para facilitar la repetición de una corrida; cada realización deriva de ella una semilla determinista diferente, por lo que el promedio combina trayectorias distintas sin perder reproducibilidad.

Tabla 21
Parámetros de simulación utilizados en producción

PARÁMETRO	VALOR	PROPÓSITO
Pasos de simulación	200	Avance temporal de cada realización.
Realizaciones	3	Promediar resultados obtenidos con trayectorias diferentes.
Partículas etiquetadas	500	Calcular la autocorrelación de velocidades.
Tiempos iniciales de correlación	50	Aumentar las muestras utilizadas para Cv.
Densidad media n0	10	Definir la cantidad promedio de partículas por celda.
Paso temporal tau	1	Controlar el incremento temporal de la dinámica.
Energía térmica kBT	1	Determinar la escala de velocidades iniciales.
Masa por partícula	1	Intervenir en la relación térmica de la velocidad.
Ángulo de rotación	$\pi/2$	Aplicar la colisión multipartícula por celdas.
Semilla base	1234	Permitir la repetición de la configuración.
Tiempos de salida	0 y 200	Generar mapas inicial y final equivalentes.
Límite de ejecución	Sin tiempo máximo	Permitir que las tareas extensas concluyan en el servidor.
Hilos de CPU	30	Aprovechar el paralelismo y los recursos del servidor.

7.4.4. Métricas y salidas del simulador

La autocorrelación de velocidades Cv mide cuánto conserva una partícula etiquetada la dirección y velocidad que tenía en un instante de referencia. La curva se normaliza y se ajusta mediante una función exponencial para estimar τ_C , que resume la

rapidez con la que se pierde esa memoria. A partir de la integración discreta de Cv se obtiene MDC; posteriormente se calcula MDC^* al dividir MDC para la referencia libre MDC_0 .

El simulador genera mapas de concentración inicial y final, una representación del dominio, radios por celda, obstáculos derivados de la imagen, la caja pseudo tridimensional y la gráfica de Cv.

7.5. Validación del despliegue distribuido

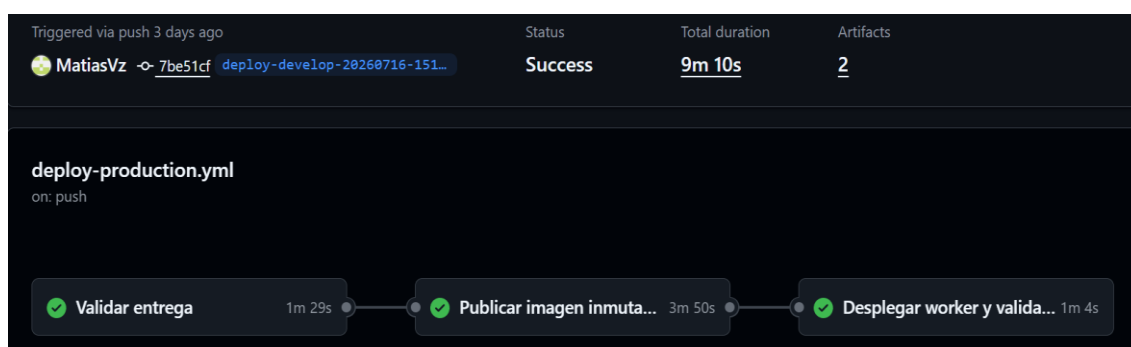
7.5.1. Pipeline de entrega

El despliegue se inicia mediante una etiqueta controlada o una ejecución manual confirmada. GitHub Actions verifica que el commit coincida con la rama autorizada, ejecuta las pruebas y publica la imagen del worker en GitHub Container Registry. La referencia se fija por digest, por lo que el servidor descarga exactamente la imagen validada. Antes de continuar, el entorno production solicita una aprobación manual.

La ejecución utilizada como evidencia finalizó correctamente en 9 minutos y 10 segundos. Sus tres etapas fueron: validar la entrega, publicar la imagen inmutable y desplegar el worker junto con la validación de la aplicación web.

Ilustración 28

Ejecución exitosa del flujo de despliegue mediante GitHub Actions.

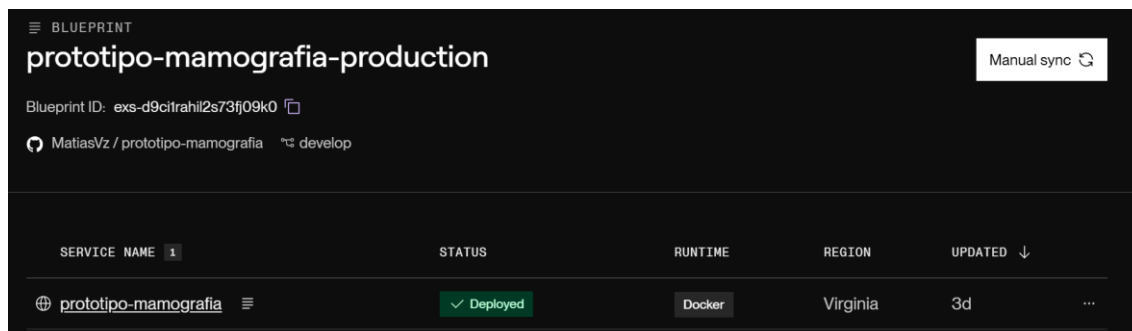


7.5.2. Aplicación web y comprobaciones de salud

La aplicación web se ejecuta en Render dentro de un contenedor con Flask y Gunicorn. La comprobación de vida respondió con estado ok y la versión 7be51cf, mientras que la comprobación de disponibilidad reportó database, queue y storage en estado ok. Esto confirmó que la versión web desplegada podía acceder a las dependencias necesarias para registrar y encolar casos.

Ilustración 29

Aplicación web desplegada en Render mediante un Blueprint.



7.5.3. Worker en el servidor universitario

El worker se ejecuta en un proyecto Docker Compose aislado dentro del directorio del usuario asignado en el servidor CIITT. No publica puertos web y utiliza un archivo de entorno privado con permisos restringidos. El contenedor integra Python, Julia y las dependencias fijadas del simulador.

La configuración permite hasta 30 hilos de CPU. Esta cantidad representa el máximo disponible para el proceso, el uso real depende del tamaño de la ROI, la cantidad de partículas y las etapas paralelas del simulador.

Ilustración 30

Verificación del estado y los hilos disponibles del worker en el servidor universitario.

```
mvelasquez@ciitt-server:~$ echo "Usuario conectado: $(whoami)"
Usuario conectado: mvelasquez
mvelasquez@ciitt-server:~$ echo "Servidor: $(hostname)"
Servidor: ciitt-server
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker ps \
> --filter "name=mamografia-mvelasquez-worker-1" \
> --format "table {{.Names}}\t{{.Status}}"
NAME                STATUS
mamografia-mvelasquez-worker-1 Up 3 days (healthy)
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker inspect --format 'Proyecto Compose: {{index .Config.Labels "com.docker.compose.project"}}' mamografia-mvelasquez-worker-1
Proyecto Compose: mamografia-mvelasquez
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker inspect --format 'Servicio: {{index .Config.Labels "com.docker.compose.service"}}' mamografia-mvelasquez-worker-1
Servicio: worker
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker inspect --format 'Estado del contenedor: {{.State.Status}}' mamografia-mvelasquez-worker-1
Estado del contenedor: running
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker inspect --format 'Estado de salud: {{.State.Health.Status}}' mamografia-mvelasquez-worker-1
Estado de salud: healthy
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker exec mamografia-mvelasquez-worker-1 printenv SIMULATION_CPU_THREADS
a-mvelasquez-worker-1 printenv JULIA_NUM_THREADS
docker exec mamografia-mvelasquez-worker-1 julia -e 'using Base.Threads; println("Hilos Julia disponibles: ", nthreads())' 30
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker exec mamografia-mvelasquez-worker-1 printenv JULIA_NUM_THREADS
30
mvelasquez@ciitt-server:~$ docker exec mamografia-mvelasquez-worker-1 julia -e 'using Base.Threads; println("Hilos Julia disponibles: ", nthreads())'
Hilos Julia disponibles: 30
mvelasquez@ciitt-server:~$
```

La salida de terminal identifica el proyecto Docker Compose y el servicio correspondiente al worker. El contenedor aparece en ejecución y con estado de salud

healthy, lo que confirma su disponibilidad operativa. Además, los valores reportados por la configuración y por Julia evidencian que el entorno reconoce los 30 hilos asignados.

7.5.4. Seguridad operativa del despliegue

Las credenciales se almacenan como variables protegidas en Render, en el entorno production de GitHub y en un archivo privado del servidor. Las conexiones hacia Neon, Upstash, R2 y Brevo se realizan mediante TLS o HTTPS. El despliegue SSH verifica la clave del host y utiliza una llave dedicada, mientras que la imagen del worker se descarga mediante una autenticación temporal. Estas medidas reducen la exposición de secretos y permiten asociar cada despliegue con un commit específico.

7.6. Resultados obtenidos

7.6.1. Resultados operativos de los casos procesados

En el entorno de producción se documentaron dos resultados operativos. La ROI benigna recortada, de 47 092 bytes, completó la simulación con métricas, mapas, objetos privados y notificación. La ROI maligna recortada, de 93 345 bytes, finalizó con error y no generó métricas válidas. Estas ejecuciones se emplean como evidencia del recorrido satisfactorio y del manejo de una tarea fallida; no constituyen por sí solas una comparación clínica antes y después del tratamiento.

Tabla 22
Resultados registrados en el entorno de producción

ENTRADA EVALUADA	MODALIDAD	ESTADO	MDC	MDC*	OBSERVACIÓN
ROI benigna	ROI recortada	Completado	0,5764	0,4940	Entrada de 47 092 bytes; resultados, objetos R2 y notificaciones disponibles.
ROI maligna	ROI recortada	Error	No generado	No generado	Entrada de 93 345 bytes; Julia devolvió el mensaje de error y no se

guardaron métricas
parciales.

Para la ROI benigna procesada, MDC fue 0,5764, MDC0 fue 1,1667 y MDC* fue 0,4940. Por tanto, la movilidad calculada por el modelo correspondió aproximadamente al 49,4 % de la referencia libre utilizada. Esta lectura es relativa al modelo MPC y no constituye un indicador clínico. La ejecución se completó en el servidor en aproximadamente 2 horas y 55 minutos.

7.6.2. Mapas y representación del dominio

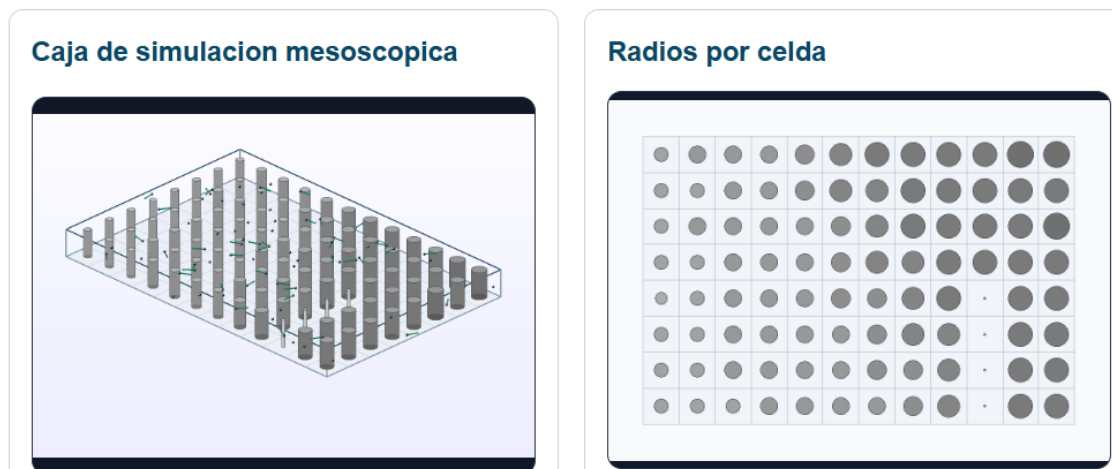
La salida visual permite seguir la transformación de la ROI. La máscara muestra la región considerada por el simulador, el mapa de radios representa la relación entre intensidad y tamaño de obstáculo, la caja pseudo tridimensional facilita observar una sección de cilindros y partículas, y los mapas científicos inicial y final muestran la distribución de concentración sobre la forma de la ROI. Los puntos rojos resaltan eventos o zonas de interés computacional definidos por la visualización, mientras que las áreas negras permanecen fuera del dominio.

Ilustración 31

Dominio válido y representación de obstáculos derivados de la ROI.



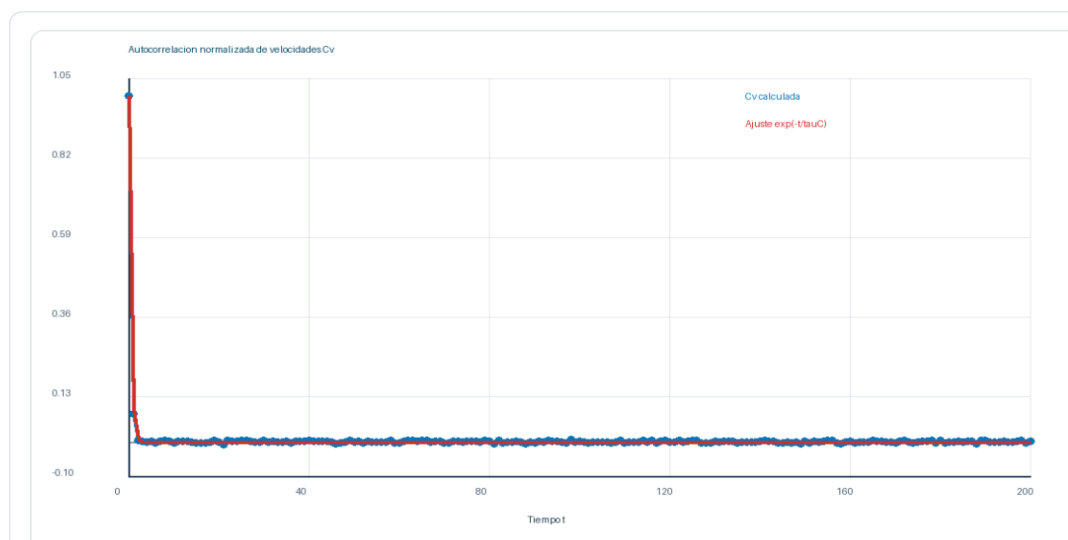
La caja pseudo tridimensional representa una sección del dominio mediante cilindros y partículas MPC. La vista superior muestra la distribución de radios por celda, donde cada círculo corresponde al tamaño calculado para su obstáculo.

Ilustración 32**Caja de simulación mesoscópica y distribución de radios por celda.****7.6.3. Autocorrelación y métricas de difusión**

La gráfica C_v presenta la curva promedio calculada y el ajuste exponencial empleado para estimar τ_C . Una caída rápida hacia cero indica que las partículas pierden pronto la memoria de su dirección inicial debido a colisiones y cambios de trayectoria. MDC resume la movilidad simulada; MDC_0 actúa como referencia libre y MDC^* permite comparar corridas en una escala común. La desviación estándar informa cuánto variaron los valores MDC entre las tres realizaciones.

Ilustración 33**Autocorrelación normalizada de velocidades y ajuste exponencial de la memoria del movimiento.****Memoria del movimiento (C_v)**

C_v muestra cuánto conserva el movimiento su dirección inicial. El ajuste exponencial permite estimar el tiempo característico τ_C .



7.6.4. Comparación de casos

La comparación presenta los valores de dos casos, la diferencia absoluta y la diferencia relativa. Antes de calcularla, el servicio comprueba la equivalencia de la configuración MPC y de los mapas disponibles. Esta restricción evita atribuir a las imágenes una diferencia causada por usar distinto número de pasos, realizaciones o partículas etiquetadas.

La finalidad de esta función es observar cambios relativos entre casos compatibles, no clasificar una lesión como benigna o maligna. El uso más representativo consiste en contrastar una ROI anterior y otra posterior al tratamiento, procesadas con la misma versión del simulador, semilla, pasos, realizaciones y demás parámetros MPC. La revisión conjunta de τ_C , MDC, MDC^* , su variación y los mapas permite describir cómo cambió el comportamiento computacional del modelo entre ambos momentos. La interpretación clínica de esa diferencia permanece fuera del alcance del prototipo.

Ilustración

34

Comparación de métricas de difusión mesoscópica entre dos casos procesados.

MÉTRICA	CASO A	CASO B	DIFERENCIA	DIFERENCIA RELATIVA
Difusión calculada (MDC) Qué tan fácil se movieron las partículas dentro de la ROI simulada.	0.58248	0.57636	-0.0061172	-1.05%
Referencia libre (MDC0) Valor esperado si no existieran obstáculos en el dominio.	1.1667	1.1667	0	0.00%
Difusión normalizada (MDC*) Relación entre la difusión calculada y la referencia libre.	0.49927	0.49403	-0.0052434	-1.05%
Tiempo característico (τ_C) Tiempo estimado en que C_v pierde memoria de la dirección inicial.	0.34176	0.41959	+0.077828	+22.77%
Desviación estándar de MDC Dispersión de MDC entre realizaciones independientes.	0.12935	0.10129	-0.02806	-21.69%
Error estándar de MDC Incertidumbre del MDC promedio entre realizaciones.	0.074682	0.058481	-0.0162	-21.69%
Desviación estándar de MDC^* Dispersión de la difusión normalizada entre realizaciones.	0.11087	0.086823	-0.024051	-21.69%
Error estándar de MDC^* Incertidumbre del promedio de difusión normalizada.	0.064013	0.050127	-0.013886	-21.69%

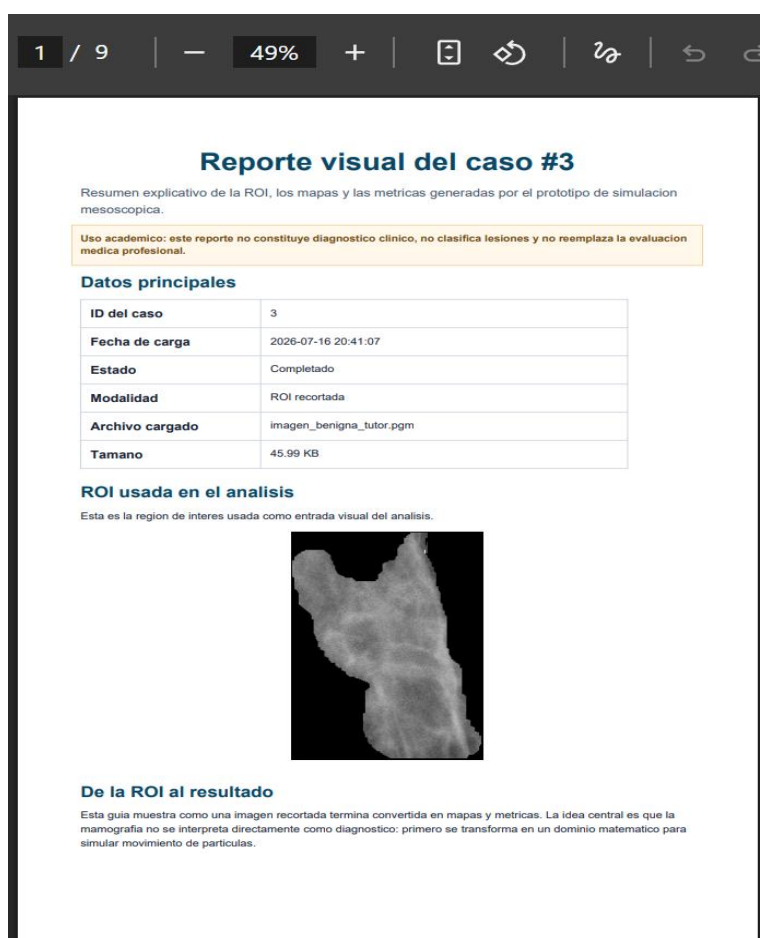
7.6.5. Reporte PDF y paquete de resultados

El reporte PDF organiza los datos principales del caso, explica las métricas en lenguaje accesible e incorpora las imágenes más relevantes. El paquete descargable añade archivos técnicos para reproducibilidad y revisión académica. La aplicación no habilita estas descargas mientras el caso esté incompleto o en error, con lo cual se evita entregar documentos vacíos o inconsistentes.

Ilustración

Reporte PDF visual generado para un caso procesado.

35



7.6.6. Tiempo de respuesta y uso de recursos

El tiempo de procesamiento depende de las dimensiones de la ROI, la cantidad de celdas válidas, el número de partículas y las realizaciones. La arquitectura asíncrona evita mantener abierta una solicitud web durante la simulación y permite que el usuario cierre el navegador y consulte el resultado posteriormente. La configuración de 30 hilos busca aprovechar el servidor universitario, pero no garantiza que todas las etapas utilicen simultáneamente el total disponible.

7.6.7. Discusión de resultados

Los resultados muestran que el prototipo logró representar el comportamiento mesoscópico de una ROI mediante mapas de concentración y métricas de difusión simulada. Se obtuvo un tauC de 0,4196 y un MDC* de 0,494. Al compararlos con el escenario Before de Borjas et al., que reportó un tauC aproximado de 0,45 y un MDC* de $0,54 \pm 0,03$, se observan diferencias del 6,8 % y 8,5 %, respectivamente.

La cercanía en el orden de magnitud indica una correspondencia aproximada con el comportamiento del modelo, pero no constituye una reproducción numérica exacta. Las diferencias pueden estar relacionadas con la preparación de la imagen, la máscara de la ROI, la resolución, la discretización del dominio, las condiciones de frontera y el carácter aleatorio de la simulación. Además, las métricas se calcularon con tres realizaciones, por lo que su promedio y medidas de dispersión deben interpretarse dentro de esta configuración específica.

La reproducibilidad de las métricas cuantitativas depende de mantener procedimientos estandarizados. Hu et al. observaron variaciones relacionadas con la técnica de adquisición y las características de las lesiones [55]. Asimismo, el perfil QIBA destaca la necesidad de controlar el procesamiento y la repetibilidad antes de comparar métricas de difusión [56]. Aunque estos estudios se refieren a resonancia magnética, respaldan la importancia de utilizar parámetros equivalentes al comparar resultados del prototipo.

Hottat et al. encontraron un incremento del coeficiente aparente de difusión después de la quimioterapia neoadyuvante [57]. Este resultado respalda la utilidad investigativa de comparar la difusión en diferentes momentos. Sin embargo, dicho coeficiente es una medición física obtenida mediante resonancia magnética, mientras que el MDC y el MDC* son resultados computacionales derivados de mamografías. Por ello, no son métricas clínicamente intercambiables.

Los mapas conservaron la forma de la ROI y permitieron observar la distribución de partículas en el dominio válido. Las zonas rojas corresponden a celdas que superaron el umbral de concentración, pero no representan tumores ni regiones malignas. Su distribución también puede estar influida por los obstáculos y los rebotes producidos en los límites de la máscara.

El servidor universitario redujo considerablemente el tiempo de procesamiento, no obstante, esta mejora no puede atribuirse únicamente al aumento de hilos, porque también cambiaron el hardware y el entorno de ejecución. De igual forma, las pruebas con k6 y Lighthouse comprobaron la estabilidad y calidad de la capa web, pero no validan la exactitud científica del simulador ni representan pruebas de múltiples simulaciones intensivas ejecutadas simultáneamente.

En conjunto, los resultados respaldan el uso del prototipo como herramienta académica para ejecutar, documentar y comparar simulaciones mesoscópicas bajo condiciones controladas. El monitoreo corresponde a la comparación computacional de casos y métricas, sin constituir seguimiento clínico, diagnóstico ni sustitución de la evaluación médica.

7.7. Cumplimiento de requisitos y trazabilidad

La comprobación de requisitos se realizó relacionando cada requisito con su criterio de aceptación, método de verificación y evidencia. La validación no se limita a constatar que una función exista; también revisa condiciones de privacidad, seguridad, reproducibilidad y operación distribuida.

7.7.1. Requisitos funcionales

La evidencia cubre la carga y validación de imágenes, registro de casos, almacenamiento de archivos, selección y confirmación de ROI, conversión PGM, preparación del dominio, envío a cola, ejecución MPC, cálculo de métricas, mapas, presentación web, reporte PDF, comparación, estados, autenticación, privacidad, eliminación y notificación. Los recorridos se validaron mediante la interfaz, los estados persistidos, los objetos privados y los registros del procesamiento.

7.7.2. Requisitos no funcionales

Los requisitos de modularidad y mantenibilidad se respaldan en la separación entre web, servicios, worker y simulador. La trazabilidad y reproducibilidad se sustentan en parámetros, semillas, archivos de salida y versiones de despliegue. La privacidad se aplica mediante propiedad de casos y almacenamiento R2 privado; la portabilidad, mediante Docker; y la operación distribuida, mediante conexiones cifradas, endpoints de salud y secretos externos al repositorio.

7.7.3. Correspondencia entre resultados y objetivos

Los resultados se organizaron de acuerdo con los objetivos de la investigación. Esta relación permite comprobar que las pruebas no se limitaron a verificar funciones aisladas, sino que aportaron evidencia sobre el análisis de requisitos, la construcción del prototipo y la evaluación de su flujo computacional.

Tabla 23

Correspondencia entre objetivos, resultados y evidencias

OBJETIVO	RESULTADO RELACIONADO	EVIDENCIA	SECCIÓN
Objetivo general	Flujo web distribuido que registra casos, prepara ROI, ejecuta MPC y entrega métricas, mapas y reportes.	Prueba integral, caso completado, resultados en R2 y notificación.	7.2 a 7.6
Objetivo específico 1	Requisitos funcionales y no funcionales analizados y vinculados con criterios de aceptación.	Matriz de trazabilidad, validación funcional y síntesis de requisitos.	7.1, 7.2 y 7.7
Objetivo específico 2	Prototipo funcional con carga, ROI, dominio MPC, métricas de difusión y presentación comparativa.	Caso completado, mapas, Cv, tauC, MDC, MDC* y reporte.	7.4 y 7.6
Objetivo específico 3	Evaluación técnica del flujo, del despliegue y del tiempo de procesamiento.	Integración productiva, manejo del caso con error y comparación local-servidor además de pruebas de rendimiento.	7.3, 7.5, 7.8 y 7.9

7.8. Pruebas de rendimiento

Las pruebas de rendimiento evaluaron la capacidad de respuesta de la aplicación web desplegada en Render bajo distintos niveles de concurrencia. Estas pruebas se concentraron en la capa web y se ejecutaron independientemente del procesamiento científico, puesto que la simulación se realiza de forma asíncrona en el worker alojado en el servidor universitario.

7.8.1. Propósito, herramienta e indicadores

Las pruebas HTTP se realizaron con k6 desde un equipo externo hacia la aplicación publicada. El recorrido incluyó el endpoint de salud, el panel principal, el listado de casos, la comparación y la gestión de cuenta. Para ello se utilizó una sesión autenticada perteneciente a una cuenta exclusiva de prueba.

No se cargaron imágenes, eliminaron casos ni enviaron simulaciones durante estas ejecuciones. Esta separación permitió medir la respuesta de Flask, Gunicorn, Render y las consultas a PostgreSQL sin incorporar el tiempo de procesamiento del simulador Julia.

Los indicadores registrados fueron el número de solicitudes, la mediana del tiempo de respuesta, el percentil 95 (p95), la tasa de solicitudes fallidas y la recuperación posterior a un incremento repentino de usuarios. El p95 indica el tiempo máximo dentro del cual respondió el 95 % de las solicitudes, por lo que permite observar demoras que podrían quedar ocultas al utilizar únicamente el promedio.

7.8.2. Escenarios definidos

Se establecieron cuatro escenarios progresivos. La línea base proporcionó una referencia con un solo usuario; la prueba de carga utilizó concurrencia moderada; la prueba de pico incrementó temporalmente los usuarios; y la prueba de resistencia mantuvo una carga continua durante un periodo mayor.

Tabla 24
Escenarios de las pruebas de rendimiento con k6

ESCENARIO	CONFIGURACIÓN	PROPÓSITO	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
Línea base	1 usuario virtual durante 1 minuto	Establecer una referencia con la instancia activa	Errores inferiores al 1 % y p95 documentado
Carga	5 usuarios virtuales durante 5 minutos	Evaluar el comportamiento con concurrencia moderada	Errores inferiores al 2 % y respuesta estable
Pico	Incremento hasta 20 usuarios, permanencia	Comprobar degradación y	Errores inferiores al 5 % y

	durante 30 segundos y reducción progresiva	recuperación ante un aumento repentino	recuperación posterior
Resistencia	3 usuarios virtuales durante 15 minutos	Detectar degradación progresiva o acumulación de errores	Sin incremento sostenido de errores ni pérdida de disponibilidad

7.8.3. Resultados obtenidos con k6

La prueba de línea base realizó 196 solicitudes sin errores. La mediana fue de 113,04 ms y el p95 alcanzó 119,73 ms. Estos valores se utilizaron como referencia para analizar el efecto de los escenarios posteriores.

Con cinco usuarios concurrentes, la prueba de carga atendió 4.631 solicitudes sin respuestas fallidas. La mediana aumentó a 122,90 ms y el p95 a 157,57 ms. El incremento de la mediana respecto de la línea base fue aproximadamente del 8,7 %, lo que evidencia una variación moderada frente al aumento de concurrencia.

Durante la prueba de pico se alcanzaron 20 usuarios virtuales y se atendieron 1.751 solicitudes sin errores. La mediana fue de 303,03 ms y el p95 de 699,48 ms. Aunque se observó un incremento temporal en la latencia, la aplicación mantuvo su disponibilidad. Al finalizar el pico, el endpoint de salud respondió con código HTTP 200 en 162,26 ms, confirmando la recuperación del servicio.

Durante la prueba de resistencia se atendieron 8.481 solicitudes en quince minutos, con una mediana de 118,94 ms y un percentil 95 de 130,19 ms. La tasa de errores se mantuvo en 0 % y los tiempos de respuesta permanecieron estables durante toda la ejecución.

Tabla 25
Resultados de las pruebas de rendimiento

ESCENARIO	SOLICITUDES	MEDIANA	P95	ERRORES	RESULTADO
Línea base	196	113,04 ms	119,73 ms	0 %	Aprobado

Carga	4.631	122,90 ms	157,57 ms	0 %	Aprobado
Pico	1.751	303,03 ms	699,48 ms	0 %	Aprobado
Resistencia	8.481	118,94 ms	130,19 ms	0 %	Aprobado

Los cuatro escenarios cumplieron los criterios definidos. No se registraron solicitudes fallidas ni interrupciones de la aplicación. El incremento de latencia observado durante el pico fue temporal y, después de retirar la carga, el servicio recuperó tiempos de respuesta cercanos a la línea base.

7.8.4. Evaluación complementaria con Lighthouse

Como complemento de las pruebas de concurrencia, se empleará Lighthouse para evaluar la calidad técnica de páginas representativas del prototipo. Esta herramienta permitirá revisar el rendimiento de presentación, la accesibilidad, las buenas prácticas web y la optimización básica para motores de búsqueda.

La evaluación comprenderá la pantalla de inicio de sesión, el panel principal, el listado de casos y la vista de resultados. Las mediciones se conservarán como evidencia separada porque Lighthouse analiza la experiencia de una navegación individual, mientras que k6 evalúa el comportamiento del servicio ante varias solicitudes concurrentes.

Tabla 26
Resultados de la evaluación con Lighthouse

PÁGINA EVALUADA	RENDIMIENTO	ACCESIBILIDAD	BUENAS PRÁCTICAS	SEO
Inicio de sesión	100	100	100	100
Panel principal	100	100	100	100
Carga de mamografía	100	100	100	100
Listado de casos	100	100	100	100

Comparación de casos	100	100	100	100
---------------------------------	-----	-----	-----	-----

La evaluación realizada con Lighthouse mostró una puntuación de 100 en rendimiento, accesibilidad, buenas prácticas y SEO para las cinco páginas principales analizadas. Los resultados evidencian que, bajo la configuración de escritorio y con la instancia web activa, las interfaces evaluadas presentan tiempos de carga adecuados, una estructura compatible con las comprobaciones automatizadas de accesibilidad, cumplimiento de buenas prácticas web y una configuración técnica favorable para los motores de búsqueda.

Estos resultados corresponden a una auditoría automatizada y no sustituyen pruebas manuales exhaustivas de accesibilidad, seguridad o experiencia de usuario. Sin embargo, constituyen evidencia favorable sobre la calidad técnica de las principales interfaces del prototipo desplegado.

7.9. Comparación del procesamiento local y en el servidor universitario

7.9.1. Justificación del procesamiento en el servidor universitario

La ejecución del simulador MPC exige mantener disponibles durante periodos prolongados la CPU, la memoria y el worker. En el equipo local, una corrida completa podía ocupar el computador durante varias horas y dependía de que el proceso permaneciera activo. Por esta razón, el procesamiento se trasladó al servidor universitario CIITT, donde el worker se ejecuta de forma independiente de la aplicación web y dispone de hasta 30 hilos de CPU, frente a los seis utilizados en la prueba local.

Esta decisión permite que el usuario cierre el navegador o apague su equipo sin interrumpir la simulación, mantiene disponible la aplicación publicada en Render y concentra el trabajo intensivo en una infraestructura destinada al procesamiento. El servidor no modifica por sí mismo el significado científico de los resultados, por ello, la comparación de tiempos se realiza con la misma ROI y con los parámetros comunes que quedaron registrados en ambos entornos.

7.9.2. Diseño de la comparación

La comparación utiliza la misma ROI benigna de 47 092 bytes en el equipo local y en el servidor universitario. En ambos registros se confirmaron 200 pasos, tres

realizaciones y semilla base 1234. La prueba local utilizó seis hilos y la ejecución del servidor dispuso de 30. Debido a que también cambia el hardware, el resultado se interpreta como una comparación operativa de los entornos completos y no como una medición aislada del efecto del número de hilos.

La ejecución local de la ROI benigna concluyó en aproximadamente 18 horas y 40 minutos, mientras que la misma entrada se procesó en el servidor en unas 2 horas y 55 minutos. Esto representa una reducción aproximada del 84,4 % y una aceleración de 6,4 veces.

7.9.3. Métricas y evidencia

Tabla 27

Comparación del procesamiento local y en el servidor universitario

INDICADOR	ENTORNO LOCAL	SERVIDOR UNIVERSITARIO
Entrada evaluada	ROI benigna, 47 092 bytes	Misma ROI benigna, 47 092 bytes
Parámetros comunes	200 pasos, 3 realizaciones, semilla 1234	200 pasos, 3 realizaciones, semilla 1234
Hilos de CPU	6	30
Tiempo de espera en cola	No aplica	Aproximadamente 24,5 segundos
Tiempo de procesamiento	Aproximadamente 18 h 40 min	Aproximadamente 2 h 55 min
Estado final	Completado	Completado
Reducción del tiempo	No aplica	84,4 %

7.10. Limitaciones del estudio y condiciones de generalización

Los resultados obtenidos permiten comprobar la viabilidad técnica del prototipo, el funcionamiento de su arquitectura distribuida y la capacidad del simulador para generar mapas y métricas computacionales a partir de una región de interés mamográfica. Sin embargo, estos resultados no permiten establecer conclusiones diagnósticas, pronósticas o terapéuticas, debido a que el sistema no ha sido validado con una muestra clínica representativa ni mediante criterios definidos por especialistas médicos.

La evaluación se realizó con un conjunto limitado de regiones de interés y bajo condiciones controladas. Por esta razón, los valores de Cv, tauC, MDC y MDC* deben interpretarse como resultados del modelo computacional y no como valores universales aplicables a cualquier mamografía. Tampoco se establecieron umbrales que permitan clasificar lesiones o determinar la respuesta de una paciente a un tratamiento.

Los resultados de la simulación dependen de las características de la ROI, su resolución, la delimitación del dominio mamario, el tratamiento del fondo y los parámetros configurados. En consecuencia, la comparación entre casos debe realizarse utilizando el mismo procedimiento de preparación y condiciones equivalentes de pasos, realizaciones, partículas, semilla y demás parámetros del modelo. Cualquier modificación de estas condiciones puede producir diferencias que no estén relacionadas únicamente con las características de la imagen.

La caja de simulación representa un dominio computacional plano construido a partir de las intensidades de la ROI. Los cilindros y las partículas corresponden a elementos matemáticos del modelo MPC y no constituyen una reconstrucción anatómica tridimensional del tejido mamario. Por tanto, los mapas generados describen el comportamiento de la simulación y no una representación clínica directa del interior de la mama.

Render utiliza un plan gratuito que puede suspender la instancia web por inactividad y provocar una demora inicial al recibir una nueva solicitud. Neon, Upstash, Cloudflare R2 y Brevo también están sujetos a cuotas de utilización. Estas condiciones son adecuadas para un prototipo académico y pruebas controladas, pero no representan una infraestructura clínica con disponibilidad garantizada.

El worker comparte el servidor universitario con otros procesos y utiliza recursos de CPU. La GPU disponible no forma parte de la implementación actual. La reducción del tiempo observada corresponde a la ROI, los parámetros y los entornos evaluados, por lo que no debe generalizarse como una aceleración constante para cualquier imagen o configuración. Además, el sistema no integra sistemas PACS ni historias clínicas y no ha sido validado con una cohorte clínica.

Las imágenes reales deben mantenerse anonimizadas y utilizarse únicamente con autorización institucional. Para emplear el prototipo como base de investigaciones

posteriores será necesario conservar el mismo procedimiento de preparación, registrar los parámetros de cada ejecución y utilizar versiones equivalentes del software. La ampliación de los resultados requerirá un conjunto más diverso de ROI, ejecuciones repetidas y mecanismos externos de validación científica.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

En conclusión, el proyecto alcanzó el propósito de desarrollar un prototipo web que integra la gestión de usuarios y casos, preparación de ROI, simulación mesoscópica, consulta de resultados y generación de reportes.

Se analizaron y documentaron los requisitos funcionales y no funcionales del prototipo, relacionándolos con casos de uso, historias de usuario y pruebas para mantener coherencia entre las necesidades y la implementación.

Se diseñó y desarrolló un prototipo web que integra la preparación de imágenes, la simulación MPC y la presentación de mapas, métricas relativas de difusión y reportes.

Se evaluó el flujo completo mediante pruebas funcionales, de integración, despliegue y rendimiento. Los resultados obtenidos confirmaron el funcionamiento correcto del flujo de análisis y la generación consistente de mapas, métricas y reportes.

La aplicación de prácticas de Ingeniería de Software permitió organizar el prototipo mediante módulos con responsabilidades diferenciadas y mantener coherencia entre los requisitos, el diseño, la implementación y las pruebas.

La arquitectura distribuida separó la aplicación web del procesamiento intensivo. Render se integró con Neon, Upstash Redis, Cloudflare R2 y Brevo, mientras que el worker y el simulador se ejecutaron mediante Docker Compose en el servidor universitario.

El servidor universitario redujo el procesamiento de una ROI de 18 horas y 40 minutos a 2 horas y 55 minutos. Esto representó una reducción del 84,4 % y una aceleración aproximada de 6,4 veces.

Las pruebas con k6 registraron un 0 % de errores HTTP y atendieron 8.481 solicitudes durante 15 minutos en el escenario de resistencia. Asimismo, Lighthouse obtuvo 100 puntos en rendimiento, accesibilidad, buenas prácticas y SEO.

8.2. Recomendaciones

Mantener el alcance académico y de investigación del prototipo, capacitando a sus usuarios sobre la interpretación de los mapas y métricas generadas, para evitar que los resultados sean considerados diagnósticos clínicos.

Fortalecer la escalabilidad de la infraestructura tecnológica del prototipo, con el fin de soportar un mayor número de usuarios y simulaciones sin afectar su estabilidad ni sus tiempos de respuesta.

Establecer un plan de mantenimiento que contemple la actualización de dependencias, revisión de contenedores, respaldo de configuraciones, protección de credenciales y comprobación periódica del funcionamiento de la aplicación y del worker.

Conservar las prácticas de Ingeniería de Software aplicadas durante el desarrollo, incluyendo control de versiones, organización mediante Kanban, documentación técnica, pruebas y despliegues controlados.

Evaluar periódicamente la experiencia de usuario, la accesibilidad y la comprensión de los resultados, considerando la participación de investigadores y profesionales relacionados con el análisis de imágenes mamográficas.

8.3. Trabajos futuros

Evaluar la aceleración del simulador mediante GPU y nuevas estrategias de paralelización, comparando sus tiempos de ejecución, consumo de recursos y resultados con el procesamiento actual en CPU, especialmente en regiones de interés de mayor tamaño y complejidad.

Incorporar un panel administrativo que permita revisar el estado de las simulaciones, identificar errores, consultar los tiempos de procesamiento y controlar el uso de los recursos y servicios del prototipo.

Realizar una evaluación científica con conjuntos de imágenes autorizados y la participación de especialistas, con el propósito de estudiar la utilidad de los mapas y métricas generados en diferentes escenarios de investigación.

Referencias

- [1] «Global Cancer Observatory». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://gco.iarc.who.int/>
- [2] R. L. Gullo, S. C. Partridge, H. J. Shin, S. B. Thakur, y K. Pinker, «Update on DWI for Breast Cancer Diagnosis and Treatment Monitoring», *AJR Am J Roentgenol*, vol. 222, n.º 1, p. e2329933, ene. 2024, doi: 10.2214/AJR.23.29933.
- [3] OECD y T. W. Bank, «Health at a Glance: Latin America and the Caribbean 2023», OECD. Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.oecd.org/en/publications/health-at-a-glance-latin-america-and-the-caribbean-2023_532b0e2d-en.html
- [4] «Hospital del Niño en Guayaquil apertura el servicio de resonancia magnética – Ministerio de Salud Pública». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.salud.gob.ec/hospital-del-nino-en-guayaquil-apertura-el-servicio-de-resonancia-magnetica/>
- [5] J. Borjas, K. Tucci, O. Alvarez-Llamoza, y C. Echeverria, «Diffusion Simulation on Mammograms: A Technique for Analyzing and Monitoring Breast Tumors», *Mathematics*, vol. 11, n.º 24, p. 4988, ene. 2023, doi: 10.3390/math11244988.
- [6] W. Li *et al.*, «Diffusion-Weighted MRI for Predicting Pathologic Complete Response in Neoadjuvant Immunotherapy», *Cancers (Basel)*, vol. 14, n.º 18, p. 4436, sep. 2022, doi: 10.3390/cancers14184436.
- [7] J. Camps-Herrero, «Diffusion-weighted imaging of the breast: current status as an imaging biomarker and future role», *BJR Open*, vol. 1, n.º 1, p. 20180049, 2019, doi: 10.1259/bjro.20180049.
- [8] «Breast cancer». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer>
- [9] «Screening for Breast Cancer - NCI». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/types/breast/screening>
- [10] «Dense Breasts: Answers to Commonly Asked Questions - NCI». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/types/breast/screening/dense-breasts>
- [11]: «KJR :: Korean Journal of Radiology». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://kjronline.org/DOIx.php?id=10.3348%2Fkjr.2020.0093>
- [12] C. T. Rueden *et al.*, «ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data», *BMC Bioinformatics*, vol. 18, n.º 1, p. 529, nov. 2017, doi: 10.1186/s12859-017-1934-z.
- [13] A. A. Malayeri *et al.*, «Principles and Applications of Diffusion-weighted Imaging in Cancer Detection, Staging, and Treatment Follow-up», *RadioGraphics*, vol. 31, n.º 6, pp. 1773-1791, oct. 2011, doi: 10.1148/rg.316115515.
- [14] D. Le Bihan y M. Iima, «Diffusion Magnetic Resonance Imaging: What Water Tells Us about Biological Tissues», *PLoS Biol*, vol. 13, n.º 7, p. e1002203, jul. 2015, doi: 10.1371/journal.pbio.1002203.
- [15] S. C. Partridge, N. Nissan, H. Rahbar, A. E. Kitsch, y E. E. Sigmund, «Diffusion-weighted breast MRI: Clinical applications and emerging techniques», *J Magn Reson Imaging*, vol. 45, n.º 2, pp. 337-355, feb. 2017, doi: 10.1002/jmri.25479.
- [16] Y. Guo *et al.*, «Differentiation of clinically benign and malignant breast lesions using diffusion-weighted imaging», *J Magn Reson Imaging*, vol. 16, n.º 2, pp. 172-178, ago. 2002, doi: 10.1002/jmri.10140.

- [17] A. R. Padhani *et al.*, «Diffusion-weighted magnetic resonance imaging as a cancer biomarker: consensus and recommendations», *Neoplasia*, vol. 11, n.º 2, pp. 102-125, feb. 2009, doi: 10.1593/neo.81328.
- [18] A. Malevanets y R. Kapral, «Mesoscopic model for solvent dynamics», *J. Chem. Phys.*, vol. 110, n.º 17, pp. 8605-8613, may 1999, doi: 10.1063/1.478857.
- [19] R. Kapral, «Multiparticle Collision Dynamics: Simulation of Complex Systems on Mesoscales», en *Advances in Chemical Physics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 89-146. doi: 10.1002/9780470371572.ch2.
- [20] T. Ihle y D. M. Kroll, «Stochastic rotation dynamics: A Galilean-invariant mesoscopic model for fluid flow», *Phys. Rev. E*, vol. 63, n.º 2, p. 020201, ene. 2001, doi: 10.1103/PhysRevE.63.020201.
- [21] R. Kubo, «Statistical-Mechanical Theory of Irreversible Processes. I. General Theory and Simple Applications to Magnetic and Conduction Problems», *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 12, n.º 6, pp. 570-586, jun. 1957, doi: 10.1143/JPSJ.12.570.
- [22] C.-C. Huang, G. Gompper, y R. G. Winkler, «Hydrodynamic correlations in multiparticle collision dynamics fluids», *Phys. Rev. E*, vol. 86, n.º 5, p. 056711, nov. 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.86.056711.
- [23] M. Ripoll, K. Mussawisade, R. G. Winkler, y G. Gompper, «Dynamic regimes of fluids simulated by multiparticle-collision dynamics», *Phys. Rev. E*, vol. 72, n.º 1, p. 016701, jul. 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.016701.
- [24] N. Pötsch, C. Sodano, y P. A. T. Baltzer, «Performance of Diffusion-weighted Imaging-based Noncontrast MRI Protocols for Diagnosis of Breast Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis», *Radiology*, vol. 311, n.º 2, p. e232508, may 2024, doi: 10.1148/radiol.232508.
- [25] A. Van Camp *et al.*, «The creation of breast lesion models for mammographic virtual clinical trials: a topical review», *Prog. Biomed. Eng.*, vol. 5, n.º 1, p. 012003, mar. 2023, doi: 10.1088/2516-1091/acc4fc.
- [26] D. kaba Gurmessa y W. Jimma, «Explainable machine learning for breast cancer diagnosis from mammography and ultrasound images: a systematic review», *BMJ Health Care Inform*, vol. 31, n.º 1, feb. 2024, doi: 10.1136/bmjhci-2023-100954.
- [27] S. Murugesan, Y. Deshpande, S. Hansen, y A. Ginige, «Web Engineering: a New Discipline for Development of Web-Based Systems», en *Web Engineering: Managing Diversity and Complexity of Web Application Development*, S. Murugesan y Y. Deshpande, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, pp. 3-13. doi: 10.1007/3-540-45144-7_2.
- [28] R. T. Fielding, «Principled Design of the Modern Web Architecture», *ACM Transactions on Internet Technology*, vol. 2, n.º 2.
- [29] M. van Steen y A. S. Tanenbaum, «A brief introduction to distributed systems», *Computing*, vol. 98, n.º 10, pp. 967-1009, oct. 2016, doi: 10.1007/s00607-016-0508-7.
- [30] «Python 3.14 documentation», Python documentation. Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://docs.python.org/3/>
- [31] «Welcome to Flask — Flask Documentation (3.1.x)». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable>
- [32] «Gunicorn - Python WSGI HTTP Server for UNIX». Accedido: 14 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://gunicorn.org/>
- [33] «Web Standards», W3C. Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.w3.org/standards>

- [34] «ECMA-262», Ecma International. Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-262/>
- [35] «PostgreSQL: Documentation». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.postgresql.org/docs>
- [36] «Connection pooling - Neon Docs», Neon. Accedido: 14 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://neon.com/docs/connect/connection-pooling>
- [37] «RQ: Simple job queues for Python». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://python-rq.org>
- [38] «Security», Upstash Documentation. Accedido: 14 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://upstash.com/docs/redis/features/security>
- [39] J. Bezanson, A. Edelman, S. Karpinski, y V. B. Shah, «Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing», *SIAM Rev.*, vol. 59, n.º 1, pp. 65-98, ene. 2017, doi: 10.1137/141000671.
- [40] «Multi-Threading · The Julia Language». Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://docs.julialang.org/en/v1/manual/multi-threading/>
- [41] «How R2 works», Cloudflare Docs. Accedido: 14 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://developers.cloudflare.com/r2/how-r2-works/>
- [42] «Send a transactional email | Brevo API Documentation». Accedido: 14 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://developers.brevo.com/docs/send-a-transactional-email>
- [43] «Docker Compose», Docker Documentation. Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://docs.docker.com/compose/>
- [44] «Git». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://git-scm.com/book/en/v2>
- [45] «Web Services», Render. Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://render.com/docs/web-services>
- [46] «Workflows», GitHub Docs. Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://docs-internal.github.com/en/actions/concepts/workflows-and-actions/workflows>
- [47] «Working with the Container registry», GitHub Docs. Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://docs-internal.github.com/en/packages/working-with-a-github-packages-registry/working-with-the-container-registry>
- [48] «Metrics | Grafana k6 documentation», Grafana Labs. Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://grafana.com/docs/k6/latest/using-k6/metrics/>
- [49] «Introducción a Lighthouse», Chrome for Developers. Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/overview?hl=es-419>
- [50] Y. SUGIMORI, K. KUSUNOKI, F. CHO, y S. UCHIKAWA, «Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system», *International Journal of Production Research*, vol. 15, n.º 6, pp. 553-564, ene. 1977, doi: 10.1080/00207547708943149.
- [51] M. O. Ahmad, J. Markkula, y M. Oivo, «Kanban in software development: A systematic literature review», en *2013 39th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, sep. 2013, pp. 9-16. doi: 10.1109/SEAA.2013.28.
- [52] M. Ikonen, E. Pirinen, F. Fagerholm, P. Kettunen, y P. Abrahamsson, «On the Impact of Kanban on Software Project Work: An Empirical Case Study

- Investigation», en *2011 16th IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems*, abr. 2011, pp. 305-314. doi: 10.1109/ICECCS.2011.37.
- [53] «Issue status – Linear Docs». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://linear.app/docs/configuring-workflows>
 - [54] B. Wake, «INVEST in Good Stories, and SMART Tasks - XP123». Accedido: 20 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://xp123.com/invest-in-good-stories-and-smart-tasks/>
 - [55] Y. Hu, Q. Hu, C. Zhan, T. Yin, y T. Ai, «Intraobserver and Interobserver Reproducibility of Breast Diffusion-Weighted Imaging Quantitative Parameters: Readout-Segmented vs. Single-Shot Echo-Planar Imaging», *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, vol. 58, n.º 6, pp. 1725-1736, 2023, doi: 10.1002/jmri.28655.
 - [56] M. A. Boss *et al.*, «The QIBA Profile for Diffusion-Weighted MRI: Apparent Diffusion Coefficient as a Quantitative Imaging Biomarker», *Radiology*, vol. 313, n.º 1, p. e233055, oct. 2024, doi: 10.1148/radiol.233055.
 - [57] N. A. Hottat, D. A. Badr, S. Lecomte, T. Besse-Hammer, J. C. Jani, y M. M. Cannie, «Assessment of diffusion-weighted MRI in predicting response to neoadjuvant chemotherapy in breast cancer patients», *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 614, ene. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-27787-x.

Anexos

Anexo A

Matriz de requisitos funcionales RF-01 a RF-14

Matriz de requerimientos del prototipo de aplicativo web									
Proyecto: análisis de lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica									
ID	Tipo	Módulo / componente	Requerimiento	Fuente	Prioridad	Criterio de aceptación	Método de verificación	Evidencia esperada	Estado
RF-01	Funcional	Carga de imagen	El aplicativo web debe permitir cargar una mamografía completa o una imagen ya recortada correspondiente a la región de interés para iniciar un caso de análisis.	Objetivo 1; Alcance	Alta	El usuario puede seleccionar un archivo válido, cargar una mamografía completa o una ROI recortada, y el sistema confirma la recepción del archivo.	Prueba funcional de carga	Captura del formulario y registro del caso	Verificado
RF-02	Funcional	Validación de archivos	El sistema debe validar extensión, tipo, legibilidad y tamaño del archivo cargado antes de registrarlo como caso.	Metodología; Alcance	Alta	Se aceptan solo archivos definidos como válidos y se muestra un mensaje de error controlado ante archivos no permitidos, corruptos o ilegibles.	Prueba de validación de entrada	Capturas de archivo aceptado y rechazado	Verificado
RF-03	Funcional	Registro de caso	El sistema debe crear un identificador único para cada caso, registrando fecha, usuario propietario, estado, modalidad de entrada y archivos asociados.	Objetivo 1; Metodología	Alta	Cada carga válida genera un caso registrado en la base de datos con ID único, estado inicial y trazabilidad mínima.	Revisión de base de datos y prueba funcional	Registro en base de datos y captura del estado inicial	Verificado
RF-04	Funcional	Almacenamiento privado	El sistema debe almacenar la imagen original, la ROI, la entrada de simulación, los resultados y los reportes de cada caso en un almacenamiento privado organizado por usuario y caso.	Alcance actualizado; Privacidad; Despliegue	Alta	Los archivos se guardan en el bucket privado bajo un prefijo asociado al usuario y al caso; la base de datos conserva referencias al objeto y las descargas se autorizan mediante enlaces temporales.	Prueba de integración del almacenamiento	Referencias R2, objetos por prefijo y enlace temporal de descarga	Verificado
RF-05	Funcional	ROI	El sistema debe permitir trabajar con una región de interés mediante dos modalidades: cargar una ROI ya recortada o delimitar manualmente la ROI a partir de una mamografía completa dentro del aplicativo web.	Objetivo 1; Alcance; Artículo base	Alta	El usuario puede cargar una ROI existente o recortar una región desde una mamografía completa.	Prueba funcional de selección y recorte de ROI	Captura de ROI cargada o recortada	Verificado
RF-06	Funcional	ROI	El sistema debe solicitar confirmación de la ROI antes de enviarla a preparaciones y simulación.	Objetivo 1; Alcance; Artículo base	Alta	El usuario puede revisar la ROI, confirmarla o volver a recortarla antes del procesamiento.	Prueba funcional de confirmación de ROI	Captura de ROI confirmada	Verificado
RF-07	Funcional	Preparación de imagen	El sistema debe convertir la ROI confirmada a una imagen en escala de grises compatible con el simulador, usando formato PGM como entrada reproducible.	Objetivo 2; Artículo base; Decisión técnica	Alta	La ROI confirmada genera un archivo simulation_input.pgm asociado al caso.	Prueba técnica de conversión a PGM	Archivo PGM generado	Verificado
RF-08	Funcional	Preparación de simulación	El sistema debe transformar la ROI confirmada en una representación compatible con la simulación mesoscópica, incluyendo dominio mamario válido, matriz de intensidades y obstáculos derivados de la imagen.	Objetivo 2; Alcance; Artículo base	Alta	La ROI confirmada genera una estructura de entrada válida para el módulo de simulación.	Prueba técnica del módulo de preparación	Máscara, matriz y archivos de entrada	Verificado
RF-09	Funcional	Procesamiento asincrónico	El sistema debe enviar el caso con ROI confirmada a una tarea de procesamiento en segundo plano para evitar bloquear el aplicativo web.	Metodología; Decisión técnica	Alta	Al solicitar procesamiento, el caso cambia a estado pendiente o procesando y el usuario puede seguir usando la interfaz.	Prueba funcional con cola de tareas y worker	Estado del caso y log del worker	Verificado
RF-10	Funcional	Simulador Julia	El sistema debe ejecutar una simulación mesoscópica MPC sobre la información preparada a partir de la ROI confirmada.	Objetivo 2; Alcance; Artículo base	Alta	El simulador Julia procesa el caso y genera salidas numéricas, visuales y archivos de trazabilidad.	Prueba técnica del simulador	Archivos de salida del simulador	Verificado
RF-11	Funcional	Métricas	El sistema debe calcular métricas numéricas derivadas de la simulación, incluyendo Cv, MDC, MDROI, MDC* y variación entre realizaciones cuando corresponda.	Objetivo 2; Alcance; Artículo base	Alta	El caso procesado genera métricas numéricas asociadas al resultado del análisis.	Prueba técnica del cálculo de métricas	Tabla o archivo con métricas generadas	Verificado
RF-12	Funcional	Resultados visuales	El sistema debe generar mapas visuales derivados de la simulación, tales como mapa de visitas, mapas de concentración MPC, máscara de dominio y mapa de radios de obstáculos.	Objetivo 2; Alcance; Artículo base	Alta	El caso procesado genera imágenes o mapas asociados a la ROI analizada.	Prueba funcional de generación de mapas	Mapas PGM/PNG generados	Verificado
RF-13	Funcional	Resultados	El aplicativo web debe presentar los resultados del caso de forma comprensible, incluyendo datos principales, imágenes, mapas, métricas y mensajes explicativos.	Objetivo 2; Alcance; Metodología	Alta	El usuario puede consultar una pantalla de detalle con resultados y explicaciones básicas.	Prueba funcional de visualización de resultados	Captura de pantalla de resultados	Verificado
RF-14	Funcional	Reportes	El sistema debe generar un reporte PDF visual y explicativo para usuario final, incluyendo resumen del caso, métricas principales, imágenes de resultados y nota de alcance no diagnóstico.	Objetivo 2; Alcance; Requerimiento académico	Alta	El usuario puede descargar un PDF entendible con resultados principales y explicaciones no técnicas.	Prueba funcional de generación y descarga de reporte PDF	Reporte PDF generado	Verificado

Anexo B

Matriz de requisitos funcionales RF-15 a RF-22 y requisitos no funcionales RNF-01 a RNF-07

ID	Tipo	Módulo / componente	Requerimiento	Fuente	Prioridad	Criterio de aceptación	Método de verificación	Evidencia esperada	Estado
RF-15	Funcional	Comparación	El sistema debe permitir comparar casos procesados del mismo usuario, mostrando diferencias numéricas y visuales entre métricas y resultados disponibles.	Alcance; Artículo base; Trabajo investigativo	Media	El usuario puede seleccionar casos propios procesados y visualizar una comparación básica de resultados.	Prueba funcional de comparación de casos	Vista comparativa de casos	Verificado
RF-16	Funcional	Gestión de estados	El sistema debe mostrar y actualizar el estado del caso durante el flujo de análisis: registrado, ROI confirmada, pendiente, procesamiento, completado, error o retirado.	Metodología	Alta	El estado cambia correctamente según el avance del caso y la confirmación de la ROI.	Prueba de flujo de estados	Registro de cambios de estado	Verificado
RF-17	Funcional	Autenticación	El sistema debe permitir registrar usuarios, iniciar sesión y cerrar sesión para separar los casos de cada persona.	Seguridad; Privacidad; Alcance actualizado	Alta	El usuario puede crear una cuenta, iniciar sesión, cerrar sesión y acceder al flujo autenticado.	Prueba funcional de autenticación	Capturas de registro, login y cierre de sesión	Verificado
RF-18	Funcional	Control de acceso	El sistema debe asociar cada caso al usuario que lo subió y restringir la visibilidad de casos, resultados y reportes al usuario propietario.	Seguridad; Privacidad; Alcance actualizado	Alta	Un usuario autenticado solo puede ver, compararse y descargar resultados de sus propios casos.	Prueba de control de acceso	Evidencia de restricción por usuario	Verificado
RF-19	Funcional	Eliminación de casos	El sistema debe permitir que el usuario propietario elimine uno de sus casos mediante una confirmación explícita, junto con sus registros y archivos asociados.	Alcance actualizado; Privacidad; Seguridad	Alta	El propietario puede confirmar la eliminación de un caso que no se encuentre en cola o procesamiento; al finalizar, el caso deja de aparecer y sus objetos asociados se eliminan del almacenamiento.	Prueba funcional de eliminación de caso	Confirmación de eliminación, ausencia del registro y eliminación del prefijo de almacenamiento	Verificado
RF-20	Funcional	Recuperación de contraseña	El sistema debe permitir que un usuario solicite la recuperación de su contraseña mediante el correo asociado a su cuenta.	Alcance actualizado; Seguridad	Alta	La solicitud muestra una respuesta que no revela si la cuenta existe; cuando corresponde, se envía un enlace con token temporal que permite definir una contraseña nueva y queda invalidado después de utilizarse.	Prueba funcional de recuperación de contraseña	Correo recibido, enlace temporal, cambio de contraseña y rechazo del token reutilizado	Verificado
RF-21	Funcional	Correo transaccional	El sistema debe notificar por correo electrónico al usuario propietario cuando el procesamiento de un caso termine correctamente.	Alcance actualizado; Metodología	Media	Al completar la simulación se envía una notificación al correo del propietario, si el proveedor de correo no responde, el fallo se registra sin perder los resultados ni revertir el estado completado.	Prueba de integración del correo transaccional	Notificación de caso completado y registro controlado ante fallo de envío	Verificado
RF-22	Funcional	Eliminación de cuenta	El sistema debe permitir que el usuario autenticado elimine permanentemente su cuenta, junto con sus casos y archivos asociados, mediante una confirmación explícita.	Alcance actualizado; Privacidad; Seguridad	Alta	El usuario confirma la eliminación mediante su contraseña; al finalizar, la cuenta, sus casos y los objetos privados asociados dejan de estar disponibles.	Prueba funcional de eliminación de cuenta	Confirmación de eliminación, cierre de sesión y ausencia de la cuenta, casos y archivos asociados	Verificado
RNF-01	No funcional	Aplicativo web	El prototipo debe funcionar como aplicativo web accesible desde un navegador moderno.	Título; Metodología	Alta	El usuario puede acceder al prototipo desde una interfaz web.	Prueba de acceso web	Captura de acceso al aplicativo	Verificado
RNF-02	No funcional	Arquitectura del sistema	El sistema debe organizarse en módulos diferenciados para facilitar desarrollo, revisión, integración y mantenimiento.	Metodología; Alcance	Alta	El proyecto se estructura en módulos como autenticación, carga, ROI, simulación, visualización, métricas, resultados y reportes.	Revisión técnica de estructura	Árbol de carpetas o diagrama de módulos	Verificado
RNF-03	No funcional	Trazabilidad	El sistema debe conservar información mínima del caso, usuario propietario, modalidad de entrada, ROI confirmada, estado, archivos de entrada y salidas generadas.	Alcance; Metodología	Alta	Cada caso permite identificar usuario, archivo de entrada, modalidad, ROI, estado, resultados y errores asociados.	Revisión de base de datos	Registro trazable del caso	Verificado
RNF-04	No funcional	Reproducibilidad	El flujo de análisis debe poder repetirse bajo condiciones controladas para verificar el comportamiento del prototipo.	Alcance; Metodología; Artículo base	Alta	Un caso de prueba puede ejecutarse nuevamente conservando parámetros, semilla, archivos de entrada y resultados generados.	Prueba repetida del flujo	Evidencia de ejecución repetida	Verificado
RNF-05	No funcional	Procesamiento en segundo plano	El sistema debe ejecutar las tareas de procesamiento de forma asincrónica para evitar bloquear la interfaz web durante simulaciones prolongadas.	Metodología	Alta	El usuario puede enviar un caso a procesamiento y el sistema mantiene un estado de avance sin bloquear la aplicación.	Prueba con worker	Estado del caso y tarea procesada	Verificado
RNF-06	No funcional	Entorno distribuido	El prototipo debe ejecutarse en un entorno distribuido y reproducible, con la aplicación web y el worker desplegados en contenedores independientes y conectados a servicios administrados mediante configuración externa.	Metodología; Alcance; Despliegue	Media	La aplicación web y el worker pueden construirse y ejecutarse por separado con Docker y Docker Compose, usando PostgresSQL, Redis y almacenamiento configurados mediante variables de entorno.	Prueba de despliegue distribuido	Contenedores web y worker conectados a los servicios administrados	Verificado
RNF-07	No funcional	Código y documentación	El código y la estructura del sistema deben organizarse de forma que permitan futuras ampliaciones o ajustes.	Alcance; Metodología	Media	El proyecto cuenta con estructura modular, nombres claros y documentación mínima de instalación, arquitectura y uso.	Revisión documental y técnica	README, diagramas y notas técnicas	Verificado

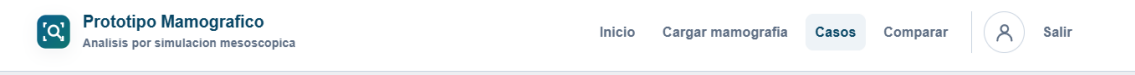
Anexo C

Matriz de requisitos no funcionales RNF-08 a RNF-15

ID	Tipo	Módulo / componente	Requerimiento	Fuente	Prioridad	Criterio de aceptación	Método de verificación	Evidencia esperada	Estado
RNF-08	No funcional	Seguridad de archivos	Las mamografías, ROI, entradas y resultados deben permanecer en almacenamiento privado, separados por usuario y caso, sin exposición pública directa.	Alcance, Metodología, Privacidad, Seguridad, Despliegue	Alta	Los objetos no son públicos, las descargas requieren autorización del usuario propietario y utilizan enlaces firmados de corta duración.	Prueba de acceso al almacenamiento	Bucket privado, prefijos controlados y URL firmada con vencimiento	Verificado
RNF-09	No funcional	Manejo de errores	El sistema debe registrar y mostrar errores controlados durante carga, validación, procesamiento, simulación y generación de resultados.	Metodología	Alta	Cuando ocurre un fallo, el sistema actualiza el estado del caso y conserva información mínima del error.	Prueba de error controlado	Registro de error y mensaje en sistema	Verificado
RNF-10	No funcional	Privacidad	El sistema debe evitar exponer información personal o clínica innecesaria y debe manejar los casos como registros académicos asociados a usuarios del sistema.	Ética, Alcance actualizado	Alta	Los casos se identifican por ID interno y usuario propietario, sin requerir datos clínicos identificables del paciente.	Revisión funcional y documental	Casos anónimos y acceso por usuario	Verificado
RNF-11	No funcional	Portabilidad mediante Docker	La aplicación web y el worker deben poder construirse y ejecutarse mediante imágenes Docker y archivos Docker Compose compatibles con un servidor Linux.	Metodología, Despliegue	Media	Los servicios se construyen desde el repositorio, usan configuración externa y pueden iniciarse en el entorno de despliegue sin instalar manualmente las dependencias de la aplicación.	Prueba de construcción y ejecución de contenedores	Imágenes web y worker iniciadas mediante Docker Compose	Verificado
RNF-12	No funcional	Salud del sistema	El despliegue debe exponer comprobaciones de actividad y preparación para verificar el proceso web, sus dependencias externas y el estado operativo del worker.	Despliegue, Metodología	Alta	El endpoint de actividad responde mientras el proceso web está activo; el endpoint de preparación solo responde correctamente cuando PostgreSQL, Redis y el almacenamiento están disponibles; el worker dispone de una comprobación equivalente.	Prueba de endpoints y healthcheck	Respuestas de health/live, health/ready y estado del worker	Verificado
RNF-13	No funcional	Comunicación segura	Las comunicaciones entre los componentes desplegados y los servicios externos deben utilizar conexiones cifradas mediante TLS.	Seguridad, Despliegue	Alta	PostgreSQL, este endpoint-requis. Redis utiliza el esquema redis y las conexiones con el almacenamiento y el proveedor de correo utilizan HTTPS.	Revisión de configuración y prueba de conectividad	URLs seguras y validación de esquemas TLS	Verificado
RNF-14	No funcional	Gestión de secretos	Las contraseñas, claves de API, tokens y credenciales de servicios deben mantenerse fuera del código fuente, las imágenes de contenedor y los registros de ejecución.	Seguridad, Despliegue	Alta	El despliegue obtiene los valores sensibles mediante variables de entorno o archivos privados no versionados, y la validación previa rechaza configuraciones incompletas.	Revisión de repositorio y validación de entorno	Plantilla sin secretos, archivo privado de entorno y validación de variables obligatorias	Verificado
RNF-15	No funcional	Aislamiento de recursos	El worker de procesamiento debe ejecutarse de forma independiente a la aplicación web, sin publicar puertos y con límites de recursos definidos para no interferir con otros procesos del servidor.	Despliegue, Metodología	Media	El contenedor del worker no expone servicios de red, permite configurar hasta 30 hilos de Julia autorizados, utiliza un directorio temporal privado y elimina las copias locales después de publicar los resultados.	Revisión de Docker Compose y prueba operativa	Configuración de recursos, ausencia de puertos publicados y limpieza del directorio temporal	Verificado

Anexo D

Encabezado y menú principal de navegación del prototipo



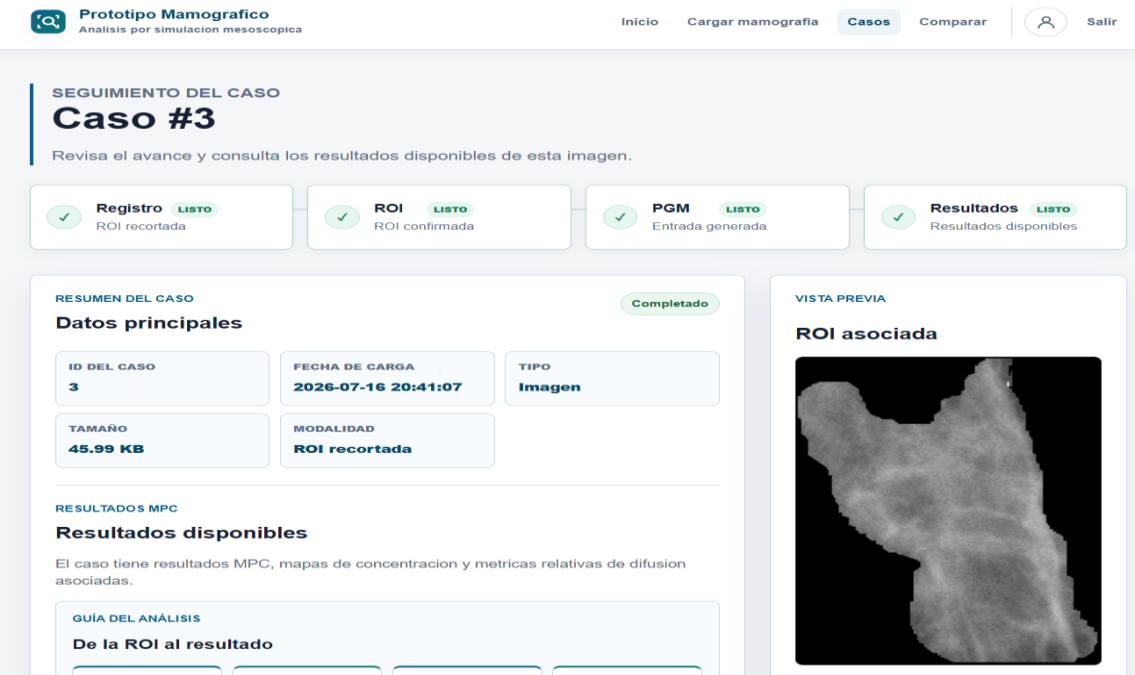
Anexo E

Pie de página e información académica del prototipo

Prototipo Mamografico Prototipo académico para el análisis de lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica. Es una herramienta de investigación y no constituye un instrumento de diagnóstico clínico.	PROYECTO Tesis de Ingeniería de Software BASE DE LA INVESTIGACION Diffusion Simulation on Mammograms: A Technique for Analyzing and Monitoring Breast Tumors
Uso exclusivo para investigación y validación funcional. No reemplaza la evaluación médica profesional ni emite criterios clínicos.	

Anexo F

Seguimiento, resumen y ROI asociada al caso procesado



Anexo G

Guía de análisis y métricas principales de la simulación

GUÍA DEL ANÁLISIS

De la ROI al resultado

1

ROI

Región que se analiza

2

Caja y cilindros

Modelo del tejido

3

Partículas MPC

Movimiento simulado

4

Mapas

Distribución observada

5

Métricas

Resultados comparables

► Cómo interpretar estos resultados

► Glosario de métricas

Resultados principales

Valores del modelo para describir y comparar la simulación. No constituyen un diagnóstico clínico.

Difusion calculada (MDC)

0.5764

Numero que resume la facilidad de movimiento dentro de la ROI simulada.

Referencia libre (MDC0)

1.167

Valor de comparacion para un espacio ideal sin obstaculos.

Difusion normalizada (MDC*)

0.494

MDC dividido para MDC0; permite comparar corridas en una escala comun.

Desviacion estandar de MDC

0.1013

Dispersion de los valores MDC obtenidos entre realizaciones.

Error estandar de MDC

0.05848

Incertidumbre del MDC promedio calculado entre realizaciones.

Desviacion estandar de MDC*

0.08682

Dispersion de la difusion normalizada entre realizaciones.

Error estandar de MDC*

0.05013

Incertidumbre del promedio de difusion normalizada.

Tiempo caracteristico (tauC)

0.4196

Tiempo estimado en que Cv pierde memoria de la direccion inicial.

Particulas simuladas

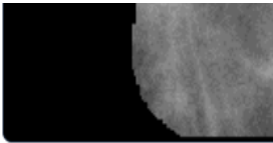
258.830

Puntos matematicos que se mueven dentro de la caja de simulacion.

Pasos ejecutados

200

Cantidad de iteraciones que avanzo el simulador.



Revisa la ROI antes de confirmar

CASO FINALIZADO

Resultados disponible

El procesamiento terminó. Los re y el reporte visual ya están listos.

✓ Procesamiento completado

Consulta las métricas y m en esta misma pantalla.

Cargar otra imagen

EXPORTACIÓN

Descargas del caso

Obtén el reporte visual o conserv los archivos de resultados.

Descargar PDF visual

Descargar resultados

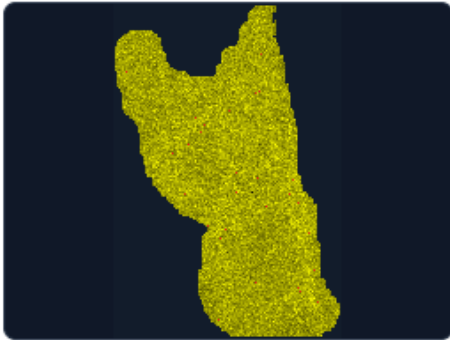
Anexo H

Mapas de concentración y memoria del movimiento de las partículas

Mapas de concentración

Muestran cómo se distribuyeron las partículas durante la simulación.

Concentración inicial en $t=0$



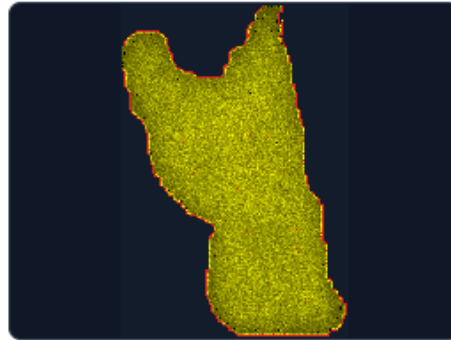
Instantánea reproducible de partículas MPC por celda tomada de una realización individual.

- Azul oscuro: exterior de la ROI
- Negro: celda válida sin partículas
- Amarillo: concentración de partículas
- Rojo: concentración superior a $2 \times n_0$

Realización reproducible 1; semilla 1234; umbral 20.

► Ayuda para interpretar

Concentración final en $t=200$



Instantánea reproducible de partículas MPC por celda tomada de una realización individual.

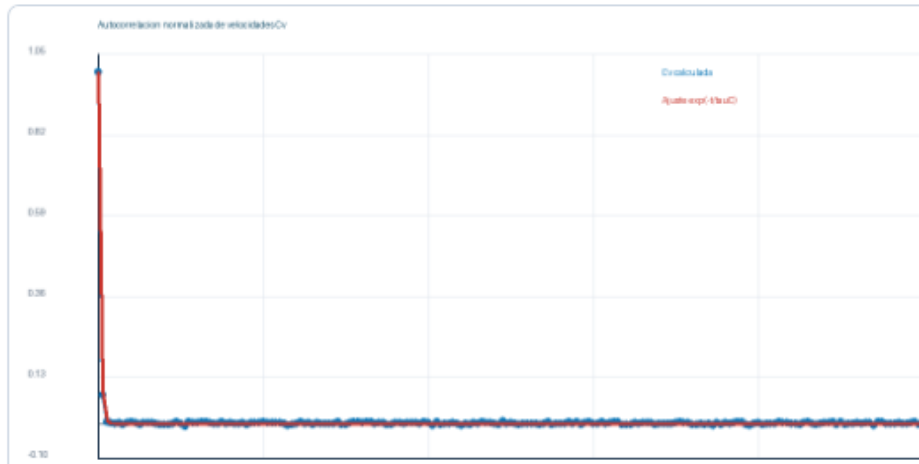
- Azul oscuro: exterior de la ROI
- Negro: celda válida sin partículas
- Amarillo: concentración de partículas
- Rojo: concentración superior a $2 \times n_0$

Realización reproducible 1; semilla 1234; umbral 20.

► Ayuda para interpretar

Memoria del movimiento (Cv)

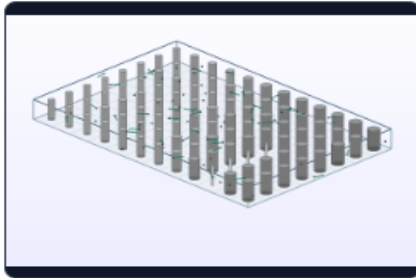
Cv muestra cuánto conserva el movimiento su dirección inicial. El ajuste exponencial permite estimar el tiempo característico τ_{Cv} .



Anexo I

Representación de la caja, los obstáculos y el dominio de simulación

Caja de simulacion mesoscopica



Seccion reproducible de la caja MPC con celdas, radios reales de obstaculos y una muestra de particulas con sus direcciones.

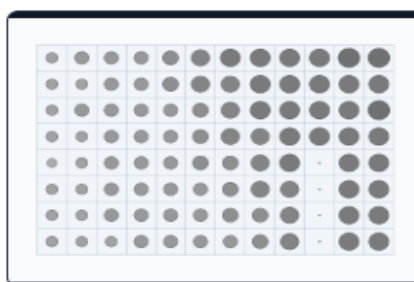
- Lineas azules: celdas
- Cilindros grises: obstaculos; oscuro mayor, claro menor
- Puntos negros: particulas MPC
- Lineas verdes: direccion de movimiento

Seccion mostrada: 12 x 8 celdas, desde $x=115$ y $y=17$; 96 cilindros visibles.

▼ Ayuda para interpretar

Esta imagen no es una reconstruccion anatomica 3D real; muestra el dominio artificial del simulador. Cuando la ROI es grande se presenta una seccion reproducible con diversidad de radios para evitar occlusion; el calculo siempre utiliza el dominio mamario completo.

Radios por celda



Vista superior de la misma seccion de la caja. El diametro de cada circulo corresponde al radio calculado para ese obstaculo.

- Cuadrícula clara: celdas del dominio
- Círculos grandes y oscuros: intensidades menores
- Círculos pequeños y claros: intensidades mayores
- Celdas oscuras: fondo fuera del dominio

Seccion mostrada: 12 x 8 celdas, desde $x=115$ y $y=17$; 96 cilindros visibles.

▼ Ayuda para interpretar

Esta vista complementa la perspectiva pseudo-3D para que las diferencias de tamaño sean comparables sin modificar la geometría simulada.

Region usada por la simulacion

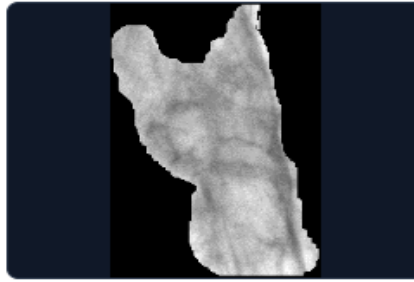


Muestra que parte de la ROI fue considerada tejido valido y separa esa zona del fondo externo.

▼ Ayuda para interpretar

Las zonas claras son el tejido que entra al modelo. Las zonas oscuras representan fondo externo o regiones que se excluyen para que la simulacion no se ejecute fuera de la mama.

Obstaculos derivados del tejido



Muestra como las intensidades claras y oscuras de la ROI se tradujeron en obstaculos para el modelo MPC.

▼ Ayuda para interpretar

En el modelo, los tonos mas oscuros de la ROI tienden a generar cilindros mas grandes y los tonos mas claros cilindros mas pequenos. Esos cilindros no son tumores: son obstaculos matematicos que representan la heterogeneidad del tejido.

Anexo J
Condiciones y parámetros utilizados en la simulación MPC

▼ CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN

Estos valores definen la corrida del modelo. No son datos clínicos del paciente.

Densidad media de partículas (n0)

10

Cantidad promedio de partículas que el modelo intenta ubicar por celda.

Paso temporal (tau)

1

Tamaño del salto de tiempo que avanza en cada paso de simulación.

Energía térmica (kBT)

1

Controla que tan intenso es el movimiento aleatorio de las partículas.

Masa por partícula

1

Peso matemático usado para calcular cómo cambia la velocidad.

Semilla de simulación

1.234

Número inicial que permite repetir una corrida con condiciones comparables.

Número de corridas

3

Cantidad de ejecuciones usadas para calcular o promediar resultados.

Partículas solicitadas para Cv

500

Cantidad objetivo de partículas seguidas para observar la memoria del movimiento.

Partículas usadas para Cv

500

Cantidad realmente seguida para Cv; si hay menos disponibles, se usa el total posible.

Ángulo de rotación MPC

1.571

Regla del modelo que gira velocidades durante la colisión multipartícula.

Anexo K

Reporte PDF: datos principales y ROI utilizada

Reporte visual del caso #3

Resumen explicativo de la ROI, los mapas y las metricas generadas por el prototipo de simulacion mesoscopica.

Uso academico: este reporte no constituye diagnostico clinico, no clasifica lesiones y no reemplaza la evaluacion medica profesional.

Datos principales

ID del caso	3
Fecha de carga	2026-07-16 20:41:07
Estado	Completado
Modalidad	ROI recortada
Archivo cargado	imagen_benigna_tutor.pgm
Tamano	45.99 KB

ROI usada en el analisis

Esta es la region de interes usada como entrada visual del analisis.



De la ROI al resultado

Esta guia muestra como una imagen recortada termina convertida en mapas y metricas. La idea central es que la mamografia no se interpreta directamente como diagnostico; primero se transforma en un dominio matematico para simular movimiento de particulas.

Anexo L
Reporte PDF: métricas principales de la simulación

Alcance temporal	La simulacion avanza 200 pasos. Mas pasos permiten observar una evolucion mas larga, aunque tambien aumentan el tiempo de procesamiento.
------------------	--

Metricas principales

Metrica	Valor	Que significa
Difusion calculada (MDC)	0.5764	Numero que resume la facilidad de movimiento dentro de la ROI simulada.
Referencia libre (MDC0)	1.167	Valor de comparacion para un espacio ideal sin obstaculos.
Difusion normalizada (MDC*)	0.494	MDC dividido para MDC0; permite comparar corridas en una escala comun.
Desviacion estandar de MDC	0.1013	Dispersión de los valores MDC obtenidos entre realizaciones.
Error estandar de MDC	0.05848	Incertidumbre del MDC promedio calculado entre realizaciones.
Desviacion estandar de MDC*	0.08682	Dispersión de la difusion normalizada entre realizaciones.
Error estandar de MDC*	0.05013	Incertidumbre del promedio de difusion normalizada.
Tiempo caracteristico (tauC)	0.4196	Tiempo estimado en que Cv pierde memoria de la direccion inicial.
Particulas simuladas	258.830	Puntos matematicos que se mueven dentro de la caja de simulacion.
Pasos ejecutados	200	Cantidad de iteraciones que avanza el simulador.
Choques con obstaculos	55.178.418	Rebotes registrados contra obstaculos derivados de la imagen.
Rebotes con borde de ROI	266.109	Intentos de salida del dominio mamario que fueron contenidos por la mascara.

Anexo M

Reporte PDF: concentración inicial en $t=0$

Imágenes principales de resultados

Concentración inicial en $t=0$

Instantánea reproducible de partículas MPC por celda tomada de una realización individual.

El exterior de la ROI se distingue del negro interno sin partículas. El amarillo aumenta con la concentración y el rojo identifica celdas que superan $2 \times n_0$.

Realización reproducible 1; semilla 1234; umbral 20.

- Azul oscuro: exterior de la ROI
- Negro: celda válida sin partículas
- Amarillo: concentración de partículas
- Rojo: concentración superior a $2 \times n_0$



Anexo N

Reporte PDF: concentración final en $t=200$ y memoria del movimiento

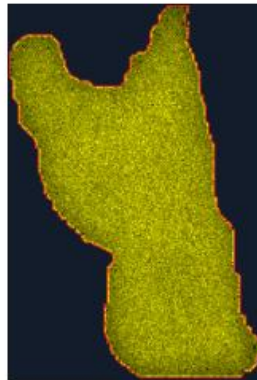
Concentracion final en $t=200$

Instantanea reproducible de particulas MPC por celda tomada de una realizacion individual.

El exterior de la ROI se distingue del negro interno sin particulas. El amarillo aumenta con la concentracion y el rojo identifica celdas que superan $2 \times n_0$.

Realizacion reproducible 1; semilla 1234; umbral 20.

- Azul oscuro: exterior de la ROI
- Negro: celda valida sin particulas
- Amarillo: concentracion de particulas
- Rojo: concentracion superior a $2 \times n_0$



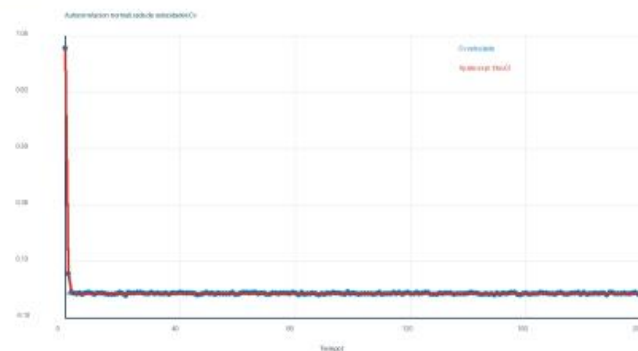
Memoria del movimiento (Cv)

Evolucion normalizada de la memoria de velocidad y ajuste exponencial usado para estimar el tiempo caracteristico τ_C .

La curva azul muestra el resultado MPC promedio. La curva roja es el ajuste $\exp(-t/\tau_C)$; una caída mas rapida indica que las particulas pierden antes la memoria de su direccion inicial.

Tiempo caracteristico estimado: $\tau_C = 0.4196$.

- Azul: Cv normalizada calculada
- Rojo: ajuste exponencial $\exp(-t/\tau_C)$
- Linea gris: referencia $C_v=0$



Anexo O

Reporte PDF: caja de simulación mesoscópica

Construcción del modelo de simulación

Estas vistas explican como la ROI se delimita y se transformo en la caja y los obstaculos usados por el simulador.

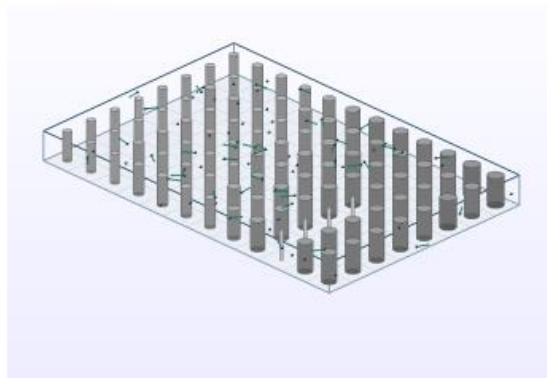
Caja de simulación mesoscopica

Sección reproducible de la caja MPC con celdas, radios reales de obstaculos y una muestra de particulas con sus direcciones.

Esta imagen no es una reconstrucción anatomica 3D real; muestra el dominio artificial del simulador. Cuando la ROI es grande se presenta una seccion reproducible con diversidad de radios para evitar oclusion; el calculo siempre utiliza el dominio mamario completo.

Sección mostrada: 12 x 8 celdas, desde $x=115$ y $y=17$; 96 cilindros visibles.

- Lineas azules: celdas
- Cilindros grises: obstaculos; oscuro mayor, claro menor
- Puntos negros: particulas MPC
- Lineas verdes: direccion de movimiento



Anexo P

Reporte PDF: radios por celda y región utilizada

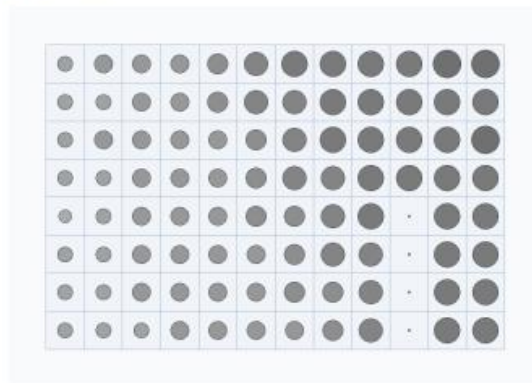
Radios por celda

Vista superior de la misma seccion de la caja. El diametro de cada circulo corresponde al radio calculado para ese obstaculo.

Esta vista complementa la perspectiva pseudo-3D para que las diferencias de tamaño sean comparables sin modificar la geometría simulada.

Seccion mostrada: 12 x 8 celdas, desde x=115 y y=17; 96 cilindros visibles.

- Cuadrícula clara: celdas del dominio
- Círculos grandes y oscuros: intensidades menores
- Círculos pequeños y claros: intensidades mayores
- Celdas oscuras: fondo fuera del dominio



Region usada por la simulacion

Muestra que parte de la ROI fue considerada tejido valido y separa esa zona del fondo externo.

Las zonas claras son el tejido que entra al modelo. Las zonas oscuras representan fondo externo o regiones que se excluyen para que la simulacion no se ejecute fuera de la mama.



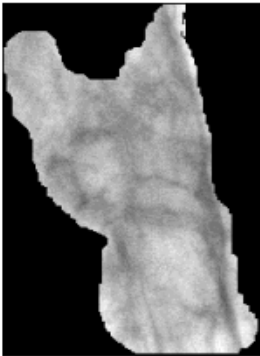
Anexo Q

Reporte PDF: obstáculos derivados del tejido y glosario

Obstaculos derivados del tejido

Muestra como las intensidades claras y oscuras de la ROI se tradujeron en obstaculos para el modelo MPC.

En el modelo, los tonos mas oscuros de la ROI tienden a generar cilindros mas grandes y los tonos mas claros cilindros mas pequenos. Esos cilindros no son tumores: son obstaculos matematicos que representan la heterogeneidad del tejido.



Glosario breve

MDC	Coefficiente de difusion calculado desde el movimiento de las particulas. En simple, resume que tan facil pudieron moverse dentro de la ROI simulada.
MDC0	Referencia teorica sin obstaculos. Funciona como una comparacion contra un espacio libre ideal.
MDC*	Relacion entre MDC y MDC0. Si vale 0.30, la movilidad simulada equivale aproximadamente al 30% de la referencia libre. Sirve para comparar casos o corridas en una misma escala.
Cv	Autocorrelacion de velocidades. En palabras sencillas, observa si las particulas siguen moviendose parecido a como empezaron o si los choques hicieron que perdieran esa direccion inicial.
tauC	Tiempo caracteristico estimado desde la caida inicial de Cv. Resume cuanto tarda el movimiento en perder memoria de su direccion inicial.
Incertidumbre entre realizaciones	La desviacion estandar describe cuanto variaron las corridas; el error estandar expresa la incertidumbre del promedio calculado.
Mapas de concentracion	Imagenes que muestran donde habia mas particulas en distintos momentos. Ayudan a ver si el movimiento se distribuye o se concentra en ciertas zonas de la ROI.

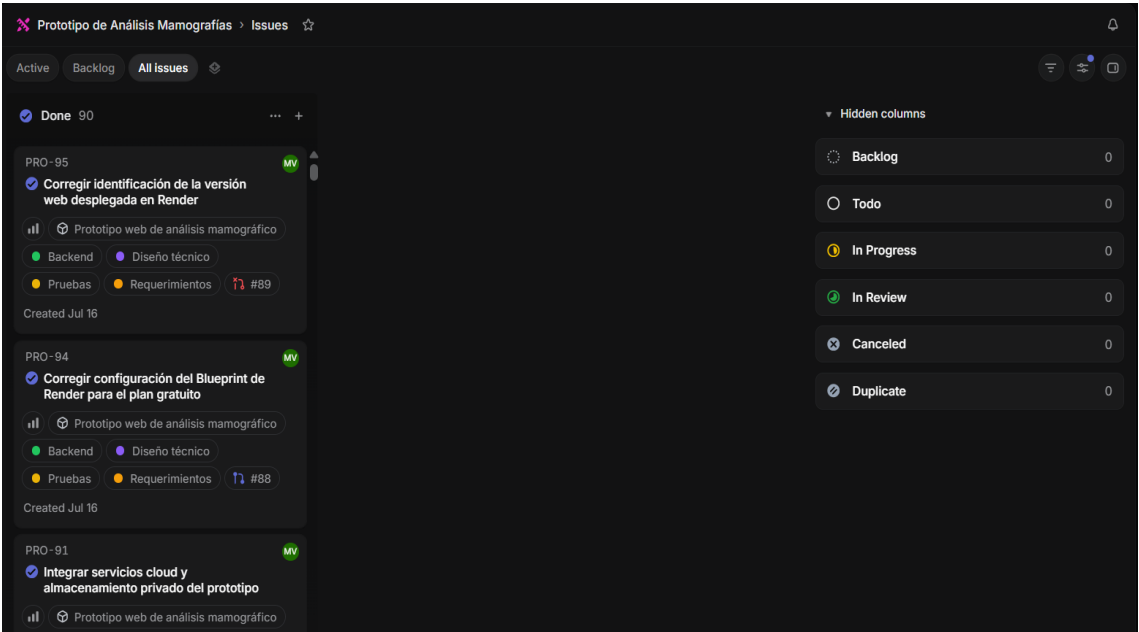
Zonas altas	Celdas que superan un umbral de concentracion. No significan lesion ni diagnostico; solo indican puntos donde el modelo acumulo mas particulas.
-------------	---

Alcance del reporte

Los mapas y metricas describen el comportamiento de una simulacion computacional sobre la ROI. No son una nueva mamografia, no identifican diagnosticos y deben interpretarse solo dentro del alcance academico del prototipo.

Anexo R

Tablero Kanban y estado de las actividades del proyecto en Linear



Anexo S

Épicas del proyecto y porcentaje de avance registrado en Linear



Anexo T

Propiedades y etiquetas asociadas al proyecto en Linear

Properties

Status

Completed

Priority

High

Lead

MV

Matías Velásquez

Members

Add members

Dates

Start → Target

Teams

Prototipo de Análisis Mamografías

Slack

Connect channel

Labels

Backend

Base de datos

Diseño técnico

Frontend

Procesamiento

Pruebas

Simulación

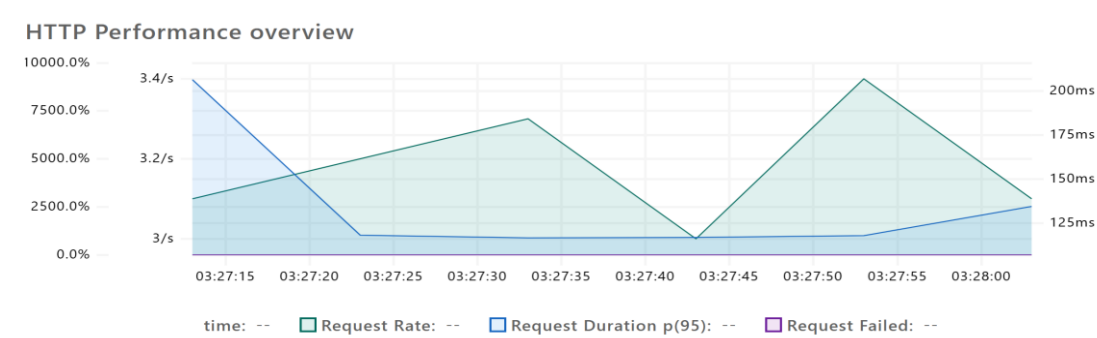
+

Anexo U

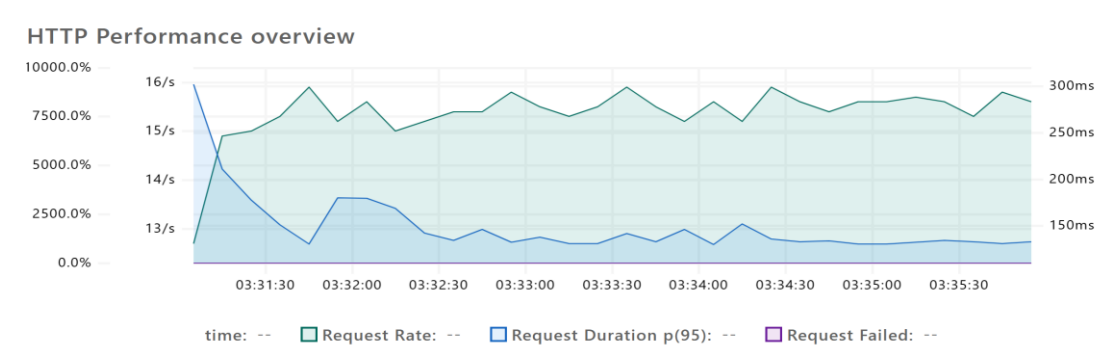
Etiquetas utilizadas para clasificar las actividades del proyecto

Name	Description
Autenticación	Registro, inicio de sesión, cierre de sesión y protección de rutas.
Backend	Lógica del servidor, reglas de negocio y servicios internos.
Base de datos	Modelado, persistencia y consulta de información.
Diseño técnico	Arquitectura, diagramas y decisiones técnicas del sistema.
Documentación	Elaboración y actualización de documentación técnica.
Frontend	Interfaces, componentes visuales e interacción del usuario.
Procesamiento	Cola de tareas, worker y ejecución en segundo plano.
Pruebas	Verificación funcional, integración, rendimiento y despliegue.
Reportes	Generación, exportación y presentación de reportes del caso.
Requerimientos	Definición y validación de necesidades del prototipo.
Resultados	Generación, consulta y comparación de métricas y mapas.
ROI	Carga, delimitación, confirmación y preparación de la región de interés.
Simulación	Implementación y ejecución del modelo mesoscópico MPC.

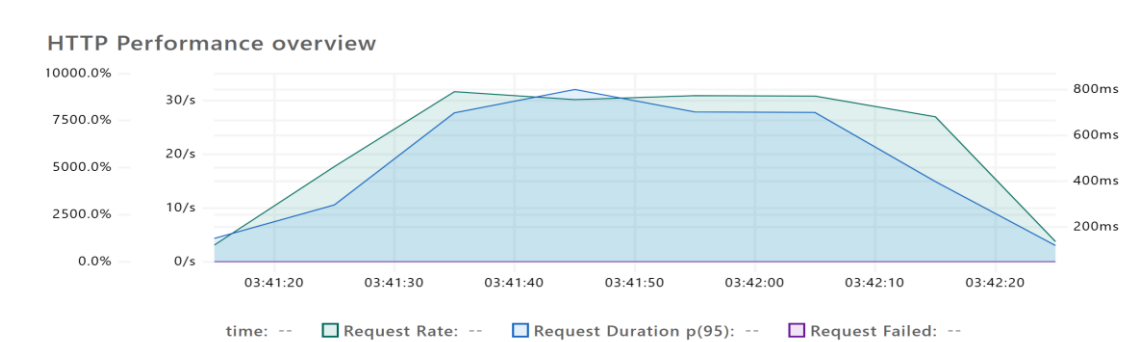
Anexo V
Rendimiento HTTP en la prueba de línea base



Anexo W
Rendimiento HTTP en la prueba de carga

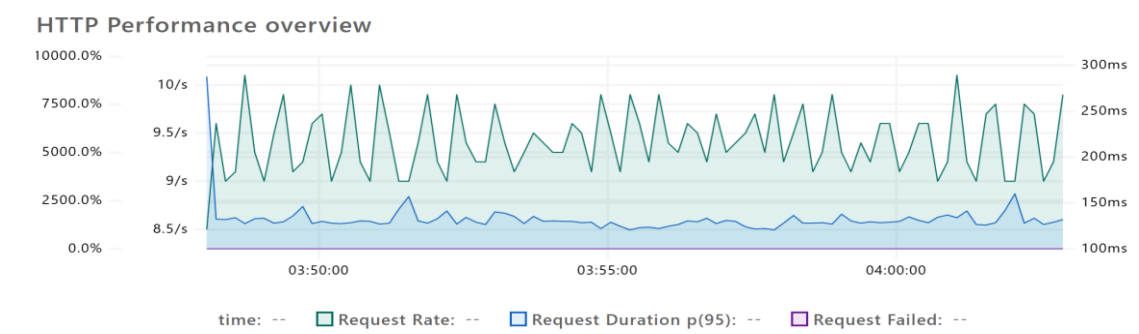


Anexo X
Rendimiento HTTP en la prueba de pico



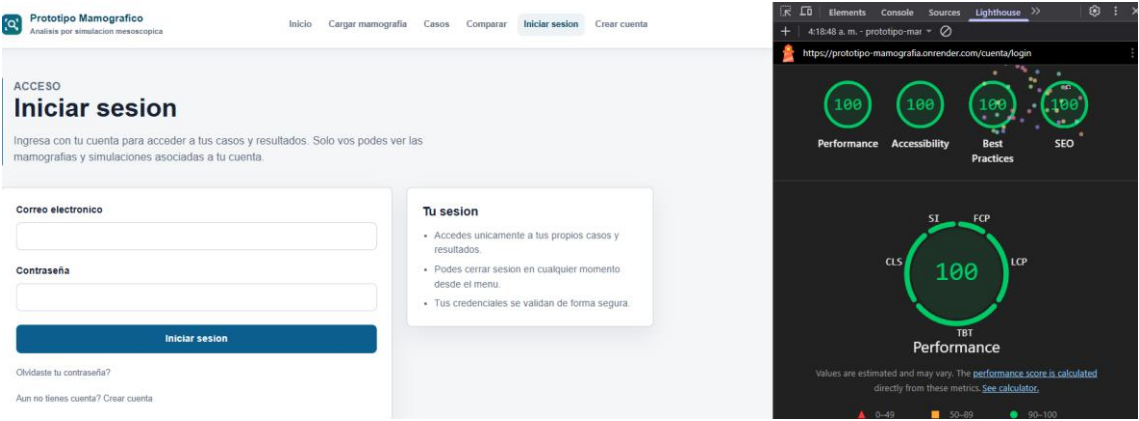
Anexo Y

Rendimiento HTTP en la prueba de resistencia



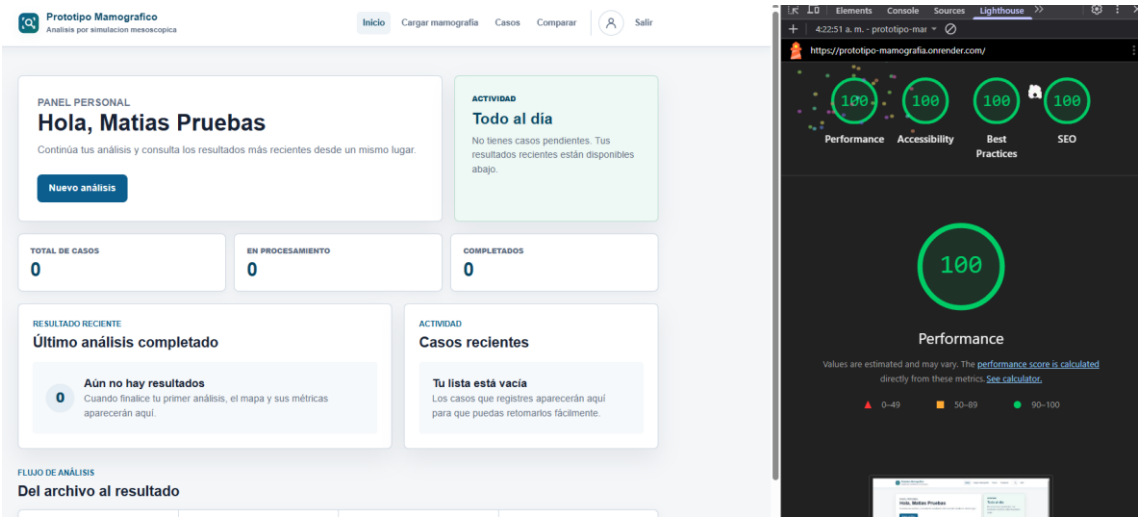
Anexo Z

Evaluación Lighthouse de la página de inicio de sesión



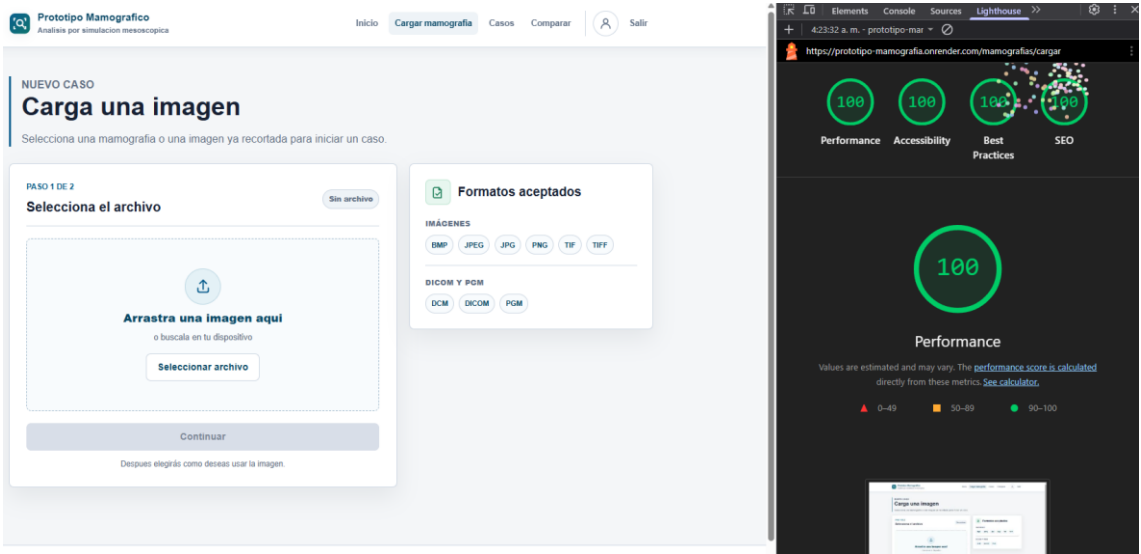
Anexo AA

Evaluación Lighthouse del panel principal



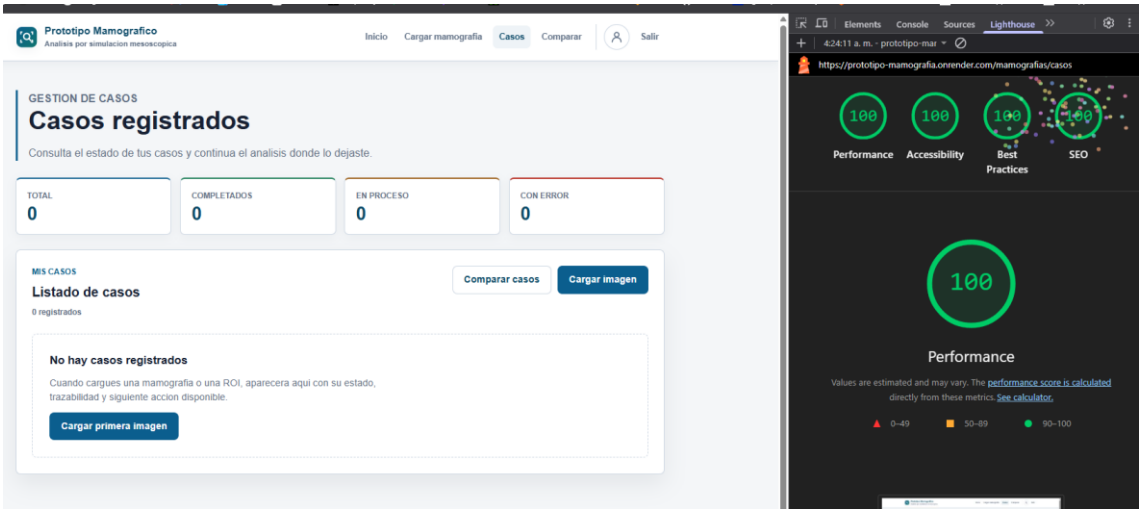
Anexo BB

Evaluación Lighthouse de la página de carga de imágenes



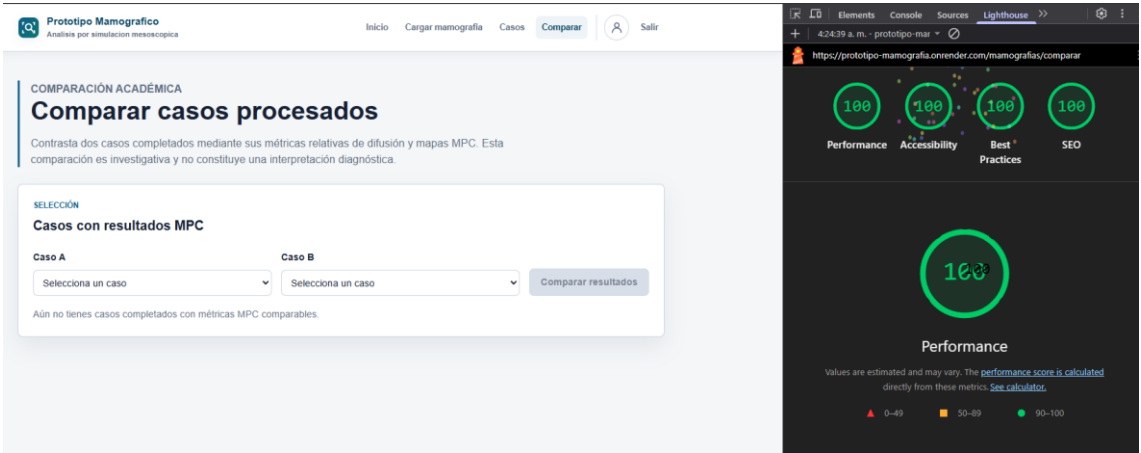
Anexo CC

Evaluación Lighthouse del listado de casos



Anexo DD

Evaluación Lighthouse de la página de comparación de casos





Universidad
Católica
de Cuenca

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Justin Matías Velásquez Chávez portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0106746381**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Desarrollo de un prototipo de aplicativo web para el análisis de lesiones mamarias a partir de mamografías mediante simulación mesoscópica”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **27 de agosto de 2026**

F: 

Justin Matías Velásquez Chávez

C.I. 0106746381