



FACULTAD DE
INGENIERÍAS

Clasificación de Malware mediante Análisis de Imágenes con Deep Learning

Sistemas Inteligentes II
Detección y Clasificación de Familias de Malware
usando Redes Neuronales Convolucionales

Juan David Díaz Castaño

Juan Sebastián Henao Parra

Juan Carlos Saldarriaga Urrea

Over Haider Castrillon Valencia

Facultad de Ingeniería
Ingeniería en Sistemas y Computación
Sistemas Inteligentes II

Manizales, Caldas, Diciembre 10 de 2025



FACULTAD DE
INGENERÍAS

Clasificación de Malware mediante Análisis de Imágenes con Deep Learning

Juan David Díaz Castaño

Juan Sebastián Henao Parra

Juan Carlos Saldarriaga Urrea

Over Haider Castrillon Valencia

Docente: Jorge Alberto Jaramillo Garzón
Profesor, Universidad de Caldas

Facultad de Ingeniería
Ingeniería en Sistemas y Computación
Sistemas Inteligentes II

Manizales, Caldas, Diciembre 10 de 2025

Resumen

Este proyecto aborda la clasificación automatizada de familias de malware mediante Deep Learning, planteando tres hipótesis específicas: (H1) ResNet50 pre-entrenado superará a CNN custom y Vision Transformer, (H2) data augmentation mejorará el recall de clases minoritarias en ≥ 15 puntos porcentuales, y (H3) incrementar la profundidad de CNN de 3 a 5 bloques mejorará el F1-score en ≥ 8 puntos.

La metodología utiliza el dataset MalImg (9,339 muestras, 25 familias) con imágenes derivadas de ejecutables de malware. Se implementaron tres arquitecturas: CNN custom de 5 bloques convolucionales, ResNet50 con fine-tuning parcial, y Vision Transformer (ViT-Small).

Los resultados experimentales verifican una hipótesis completamente, una parcialmente, y rechazan una. H1 fue confirmada: ResNet50 alcanzó 96.2 % accuracy, superando a CNN custom (93.4 %) y ViT-Small (91.8 %). H2 fue rechazada: data augmentation redujo el recall de las 17 clases minoritarias en -2.3 puntos porcentuales (de 99.4 % a 97.1 %), contrario a la mejora esperada de +15 pp. H3 fue parcialmente confirmada: la profundidad mejoró F1-score en +4.6 puntos (menor al umbral de +8), sugiriendo rendimientos decrecientes.

Esta investigación contribuye al campo de la ciberseguridad demostrando que el transfer learning es superior para clasificación de malware en datasets de tamaño moderado, y que las técnicas de augmentation diseñadas para imágenes naturales pueden ser contraproducentes en el dominio de malware visualizado, donde el modelo base ya alcanza alto rendimiento.

Palavras-Chave: Malware, Deep Learning, Redes Neuronales Convolucionales, Clasificación de Imágenes, Ciberseguridad, Análisis de Malware.

Abstract

This project addresses automated malware family classification using Deep Learning, proposing three specific hypotheses: (H1) pre-trained ResNet50 will outperform custom CNN and Vision Transformer, (H2) data augmentation will improve minority class recall by ≥ 15 percentage points, and (H3) increasing CNN depth from 3 to 5 blocks will improve F1-score by ≥ 8 points.

The methodology uses the MallImg dataset (9,339 samples, 25 families) with images derived from malware executables. Three architectures were implemented: custom CNN with 5 convolutional blocks, ResNet50 with partial fine-tuning, and Vision Transformer (ViT-Small).

Experimental results fully verify one hypothesis, partially verify one, and reject one. H1 was confirmed: ResNet50 achieved 96.2 % accuracy, outperforming custom CNN (93.4 %) and ViT-Small (91.8 %). H2 was rejected: data augmentation decreased minority class recall (17 classes) by -2.3 percentage points (from 99.4 % to 97.1 %), contrary to the expected +15 pp improvement. H3 was partially confirmed: depth improved F1-score by +4.6 points (below the +8 threshold), suggesting diminishing returns.

This research contributes to cybersecurity by demonstrating that transfer learning is superior for malware classification on moderate-sized datasets, and that augmentation techniques designed for natural images may be counterproductive in the malware visualization domain, where the baseline model already achieves high performance.

Keywords: Malware, Deep Learning, Convolutional Neural Networks, Image Classification, Cybersecurity, Malware Analysis.

Índice general

<i>Índice de figuras</i>	XIII
<i>Índice de cuadros</i>	XVI
<i>Siglas</i>	XIX
1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	1
1.2. Problema de Investigación	1
1.3. Hipótesis de Investigación	2
1.3.1. H1: Comparación de Arquitecturas de Deep Learning	2
1.3.2. H2: Impacto de Data Augmentation en Clases Minoritarias	2
1.3.3. H3: Efecto de la Profundidad en CNN Custom	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
1.5. Justificación	3
1.6. Alcance y Limitaciones	4
1.6.1. Alcance	4
1.6.2. Limitaciones	4
1.7. Estructura del Documento	4
2. Trabajo Relacionado	6
2.1. Métodos Tradicionales de Detección de Malware	6
2.1.1. Detección Basada en Firmas	6
2.1.2. Análisis Heurístico	6
2.1.3. Análisis Dinámico (Sandboxing)	6
2.2. Machine Learning en Detección de Malware	7
2.2.1. Enfoques Tradicionales de ML	7
2.3. Deep Learning para Análisis de Malware	7
2.3.1. Ventajas del Deep Learning	7
2.3.2. Trabajos Previos con Deep Learning	7
2.4. Análisis Visual de Malware	8
2.4.1. Conversión de Binarios a Imágenes	8
2.4.2. Características Visuales Discriminativas	8

2.5.	Trabajos con CNN para Clasificación de Malware	8
2.5.1.	Arquitecturas CNN Aplicadas	8
2.5.2.	Resultados Reportados en Literatura	8
2.6.	Datasets Públicos de Malware	9
2.6.1.	Descripción de Datasets Relevantes	9
2.7.	Brechas en la Literatura y Motivación del Proyecto	9
2.8.	Resumen	9
3.	Metodología	11
3.1.	Visión General del Proceso	11
3.2.	Datasets de Malware	11
3.2.1.	Descripción de Datasets Utilizados	11
3.2.2.	Distribución de Familias de Malware	12
3.3.	Preprocesamiento de Datos	12
3.3.1.	Conversión de Ejecutables a Imágenes	12
3.3.2.	Normalización y Redimensionamiento	13
3.3.3.	Aumento de Datos (Data Augmentation)	13
3.4.	División de Datos	14
3.5.	Arquitecturas de Redes Neuronales Convolucionales	14
3.5.1.	Arquitectura CNN Personalizada	14
3.5.2.	Modelos Preentrenados con Transfer Learning	15
3.6.	Configuración de Entrenamiento	15
3.6.1.	Hiperparámetros	15
3.6.2.	Estrategias de Optimización	16
3.6.3.	Manejo de Desbalance de Clases	16
3.7.	Entorno Experimental	16
3.7.1.	Hardware y Software	16
3.7.2.	Implementación	17
3.8.	Métricas de Evaluación	17
3.8.1.	Métricas Principales	17
3.8.2.	Métricas Multi-Clase	18
3.8.3.	Matriz de Confusión	18
3.8.4.	Curvas ROC y AUC	18
3.9.	Validación Cruzada y Análisis de Robustez	18
3.10.	Consideraciones Éticas y de Seguridad	18
3.11.	Resumen de la Metodología	19
4.	Experimentos y Resultados	20
4.1.	Configuración Experimental General	20
4.1.1.	Entorno de Ejecución	20
4.1.2.	Dataset: MallImg	20
4.1.3.	Partición de Datos	20

4.2. Experimento 1: Comparación de Arquitecturas (H1)	21
4.2.1. Objetivo	21
4.2.2. Configuración de Modelos	21
4.2.3. Curvas de Entrenamiento	22
4.2.4. Análisis de Resultados	22
4.2.5. Verificación de Hipótesis H1	26
4.3. Experimento 2: Impacto de Data Augmentation (H2)	27
4.3.1. Objetivo	27
4.3.2. Configuración	27
4.3.3. Visualización de Resultados	29
4.3.4. Análisis de Resultados	29
4.3.5. Verificación de Hipótesis H2	30
4.4. Experimento 3: Efecto de la Profundidad en CNN (H3)	31
4.4.1. Objetivo	31
4.4.2. Configuración de Arquitecturas	31
4.4.3. Configuración Entrenamiento	32
4.4.4. Resultados Cuantitativos y Comparación Exhaustiva	33
4.4.5. Análisis de la Hipótesis por Componente	33
4.4.6. Verificación Sistemática de H3	34
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	35
5.1. Resumen del Proyecto	35
5.2. Principales Hallazgos	36
5.2.1. H1: Transfer Learning es Superior para Datasets de Tamaño Moderado	36
5.2.2. H2: Data Augmentation No Mejora Rendimiento en Malware Visualizado	36
5.2.3. H3: Rendimientos Decrecientes con la Profundidad	36
5.2.4. Características Discriminativas	36
5.3. Verificación de Hipótesis	37
5.3.1. H1: Comparación de Arquitecturas de Deep Learning	37
5.3.2. H2: Impacto de Data Augmentation en Clases Minoritarias	37
5.3.3. H3: Efecto de la Profundidad en CNN Custom	38
5.3.4. Resumen de Verificación	38
5.4. Contribuciones del Proyecto	38
5.4.1. Contribuciones Técnicas	38
5.4.2. Contribuciones Prácticas	38
5.5. Limitaciones del Estudio	39
5.5.1. Limitaciones de Datasets	39
5.5.2. Limitaciones Metodológicas	39
5.5.3. Limitaciones de Interpretabilidad	39
5.6. Trabajo Futuro	39

5.6.1. Extensiones Metodológicas	39
5.6.2. Mejoras en Robustez	40
5.6.3. Ampliación de Datasets	40
5.6.4. Aplicaciones Prácticas	41
5.6.5. Investigación en Interpretabilidad	41
5.6.6. Benchmarking y Estandarización	42
5.7. Implicaciones para la Ciberseguridad	42
5.7.1. Para Profesionales de Seguridad	42
5.7.2. Para Desarrolladores de Soluciones de Seguridad	42
5.7.3. Para la Investigación Académica	42
5.8. Lecciones Aprendidas	43
5.8.1. Técnicas	43
5.8.2. Prácticas	43
5.9. Consideraciones Éticas	43
5.9.1. Uso Responsable	43
5.9.2. Transparencia	44
5.9.3. Privacidad y Confidencialidad	44
5.10. Reflexiones Finales	44
5.11. Conclusión	44
<i>Bibliografía</i>	48

Índice de figuras

4.1. Curvas de entrenamiento de ResNet50 Fine-tuned. Se observa convergencia rápida (mejor época: 6) y gap train-val controlado ($\sim 1\%$), indicando buena generalización.	23
4.2. Evolución de Precision, Recall y F1-Score durante el entrenamiento de ResNet50. Las tres métricas convergen a valores superiores al 95 %.	23
4.3. Matriz de confusión de ResNet50 sobre el conjunto de prueba. Los valores en la diagonal representan clasificaciones correctas por familia de malware. . . .	24
4.4. Curvas de entrenamiento del modelo baseline (Conventional CNN) para comparación.	24
4.5. Comparación de curvas de entrenamiento con y sin data augmentation. El modelo sin augmentation (exp_ddde3a41) converge más rápido en 18 épocas con mejor val_accuracy (99.3 %), mientras que el modelo con augmentation (exp_10ed8760) requiere 24 épocas y alcanza menor rendimiento (98.8 %). . .	28
4.6. Comparación de recall por clase minoritaria (17 clases con ≤ 30 muestras). Las barras azules representan el modelo sin augmentation (promedio 99.4 %); las barras naranjas, con augmentation (promedio 97.1 %). Se observa degradación en 4 clases: Swizzor.gen!I (-15.4 pp), Swizzor.gen!E (-10.0 pp), Rbot!gen (-7.7 pp) y C2LOP.P (-5.9 pp).	28
4.7. Configuración para los diferentes modelos	31
4.8. Comparación visual de dinámicas de aprendizaje	33
4.9. Comparación de curvaturas de entrenamiento para el Experimento: Accuracy (izquierda) y Loss (derecha).	34

Índice de cuadros

4.1. Distribución de familias en el dataset MalImg	21
4.2. Comparación de rendimiento entre arquitecturas (Experimento H1)	22
4.3. Hiperparámetros de entrenamiento para Experimento H1	22
4.4. Métricas detalladas de ResNet50 Fine-tuned (mejor modelo)	22
4.5. Impacto de data augmentation en métricas globales	27
4.6. Recall por clase minoritaria antes y después de augmentation (17 clases con ≤ 30 muestras)	27
4.7. Configuración de data augmentation aplicada	29
4.8. Análisis técnico detallado de las arquitecturas CNN comparadas	32
4.9. Análisis cuantitativo detallado del rendimiento por arquitectura	33
4.10. Verificación cuantitativa de componentes de H3	34
5.1. Resumen de verificación de hipótesis	38

1

Introducción

1.1. Contexto y Motivación

El panorama de la ciberseguridad contemporánea enfrenta desafíos sin precedentes. El incremento exponencial en el volumen y sofisticación de software malicioso (malware) representa una amenaza crítica para sistemas informáticos, infraestructuras críticas, y la seguridad digital de organizaciones e individuos. Según reportes recientes de la industria, se detectan millones de nuevas variantes de malware cada año, con atacantes desarrollando técnicas cada vez más evasivas que desafían los métodos tradicionales de detección.

Los sistemas antivirus convencionales se basan principalmente en firmas estáticas y análisis heurístico, métodos que resultan insuficientes ante el polimorfismo y la ofuscación empleada por malware moderno. Esta limitación motiva la búsqueda de enfoques innovadores que puedan adaptarse dinámicamente a nuevas amenazas sin depender exclusivamente de bases de datos de firmas conocidas.

1.2. Problema de Investigación

La detección y clasificación efectiva de malware presenta múltiples desafíos técnicos:

- **Volumen y velocidad:** La generación masiva de nuevas variantes de malware supera la capacidad de análisis manual.
- **Polimorfismo y ofuscación:** Las técnicas de evasión modifican el código sin alterar su funcionalidad maliciosa, evadiendo detección basada en firmas.
- **Variabilidad intra-familia:** Múltiples variantes dentro de una misma familia de malware pueden presentar diferencias significativas en su código.
- **Costo computacional:** El análisis dinámico mediante sandboxing requiere recursos significativos y tiempo de ejecución.

Estos desafíos plantean la necesidad de desarrollar métodos automatizados, eficientes y robustos capaces de identificar y clasificar malware con alta precisión, incluso ante

muestras previamente no vistas.

1.3. Hipótesis de Investigación

Este proyecto plantea tres hipótesis específicas y cuantificables que serán verificadas experimentalmente:

1.3.1. H1: Comparación de Arquitecturas de Deep Learning

En la tarea de clasificación de malware sobre el dataset MalImg, un modelo ResNet50 pre-entrenado en ImageNet con fine-tuning superará tanto a una CNN custom como a un Vision Transformer (ViT-Small) en accuracy y F1-score macro, debido a las características de bajo nivel transferibles desde ImageNet y el tamaño limitado del dataset de malware.

Variables:

- **Independiente:** Arquitectura del modelo (CNN custom, ResNet50 fine-tuned, ViT-Small)
- **Dependientes:** Accuracy, F1-score macro, épocas hasta convergencia, tiempo de entrenamiento
- **Control:** Dataset (MalImg), épocas máximas, early stopping, learning rate base

1.3.2. H2: Impacto de Data Augmentation en Clases Minoritarias

La aplicación de data augmentation moderada (rotación, flip horizontal, variación de brillo/contraste) mejorará significativamente el recall de las familias de malware con menor representación, sin degradar sustancialmente el accuracy global del modelo.

Variables:

- **Independiente:** Aplicación de data augmentation (con/sin)
- **Dependientes:** Recall de clases minoritarias, accuracy global, F1-score macro
- **Control:** Arquitectura (mejor modelo de H1), hiperparámetros de entrenamiento

1.3.3. H3: Efecto de la Profundidad en CNN Custom

Incrementar la profundidad de una CNN custom (de 3 a 5 bloques convolucionales) mejorará el rendimiento del modelo en términos de F1-score macro, pero con rendimientos decrecientes y mayor costo computacional.

Variables:

- **Independiente:** Número de bloques convolucionales (3 vs 5)
- **Dependientes:** F1-score macro, accuracy, tiempo de entrenamiento
- **Control:** Dataset, batch size, learning rate, número máximo de épocas

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar e implementar un sistema de clasificación de malware basado en Deep Learning que utilice representaciones visuales de ejecutables para identificar automáticamente familias de malware con alta precisión y eficiencia.

1.4.2. Objetivos Específicos

Los siguientes objetivos están diseñados para verificar las hipótesis planteadas:

1. **Preparación de datos:** Preprocesar el dataset MalImg, implementando el pipeline de conversión de ejecutables a representaciones visuales con normalización a 224×224 píxeles y partición estratificada (70 % entrenamiento, 15 % validación, 15 % prueba).
2. **Implementación de arquitecturas (H1):** Diseñar e implementar tres arquitecturas de clasificación:
 - CNN custom con configuración de 5 bloques convolucionales
 - ResNet50 pre-entrenado con estrategia de fine-tuning parcial
 - Vision Transformer (ViT-Small) adaptado para imágenes de malware
3. **Experimento de arquitecturas (H1):** Entrenar y evaluar las tres arquitecturas bajo condiciones controladas, comparando accuracy, F1-score macro, tiempo de convergencia y número de parámetros.
4. **Experimento de augmentation (H2):** Evaluar el impacto de data augmentation moderada sobre el recall de clases minoritarias, utilizando la mejor arquitectura identificada en H1.
5. **Experimento de profundidad (H3):** Comparar el rendimiento de CNN custom con 3 vs 5 bloques convolucionales, analizando el trade-off entre F1-score y tiempo de entrenamiento.
6. **Análisis e interpretación:** Generar visualizaciones de características aprendidas (mapas de activación, t-SNE) para interpretar qué patrones estructurales distinguen las familias de malware.

1.5. Justificación

La adopción de técnicas de Deep Learning para análisis de malware se justifica por múltiples razones:

Capacidad de aprendizaje automático de características: A diferencia de métodos tradicionales que requieren ingeniería manual de características, las CNN aprenden automáticamente representaciones jerárquicas discriminativas directamente de los datos crudos.

Escalabilidad: Una vez entrenado, el modelo puede clasificar nuevas muestras en tiempo prácticamente real, permitiendo procesar grandes volúmenes de datos.

Robustez ante variaciones: Las características visuales capturadas por CNN pueden ser invariantes a ciertas técnicas de ofuscación que alteran el código pero preservan estructuras fundamentales.

Transferibilidad: Los modelos entrenados en ciertos datasets pueden adaptarse (fine-tuning) a nuevos conjuntos de datos con menor costo computacional.

Aplicabilidad práctica: El enfoque propuesto puede integrarse en sistemas reales de detección de amenazas, análisis forense digital, y respuesta a incidentes de seguridad.

1.6. Alcance y Limitaciones

1.6.1. Alcance

Este proyecto se enfoca específicamente en:

- Clasificación de familias de malware conocidas presentes en los datasets seleccionados
- Análisis estático mediante representaciones visuales (sin ejecución dinámica)
- Evaluación en entorno controlado con muestras etiquetadas
- Arquitecturas CNN estándar y variantes preentrenadas

1.6.2. Limitaciones

Las principales limitaciones incluyen:

- Dependencia de datasets públicos con distribución potencialmente diferente a amenazas en entornos reales
- Limitación a familias de malware presentes en los datos de entrenamiento (detección de zero-day requeriría enfoques adicionales)
- Foco en malware de Windows (limitado por los datasets disponibles)
- No considera análisis de comportamiento dinámico ni técnicas híbridas

1.7. Estructura del Documento

El resto de este documento se organiza de la siguiente manera:

Capítulo 2 – Trabajo Relacionado: Revisión del estado del arte en detección de malware, aplicaciones de Deep Learning en ciberseguridad, y enfoques basados en análisis visual.

Capítulo 3 – Metodología: Descripción detallada de los datasets utilizados, proceso de preprocesamiento, arquitecturas CNN implementadas, y configuración experimental.

Capítulo 4 – Experimentos y Resultados: Presentación de los resultados experimentales, análisis comparativo de diferentes modelos, y evaluación del rendimiento.

Capítulo 5 – Conclusiones y Trabajo Futuro: Síntesis de los hallazgos principales, contribuciones del proyecto, limitaciones encontradas, y direcciones futuras de investigación.

2

Trabajo Relacionado

Este capítulo presenta una revisión del estado del arte en detección y clasificación de malware, con énfasis en enfoques basados en aprendizaje automático y Deep Learning. Se analizan los métodos tradicionales, las técnicas emergentes basadas en visión por computador, y los trabajos previos que fundamentan la propuesta de este proyecto.

2.1. Métodos Tradicionales de Detección de Malware

2.1.1. Detección Basada en Firmas

Los sistemas antivirus tradicionales emplean detección basada en firmas, donde se comparan patrones binarios conocidos (hashes o secuencias de bytes) contra bases de datos de malware identificado. Este enfoque presenta alta precisión para amenazas conocidas pero falla ante:

- **Polimorfismo:** Malware que modifica su código en cada infección
- **Ofuscación:** Técnicas de empaquetado que alteran la firma sin cambiar funcionalidad
- **Zero-day:** Amenazas completamente nuevas sin firma registrada

2.1.2. Análisis Heurístico

Los métodos heurísticos evalúan comportamientos sospechosos mediante reglas predefinidas, como acceso no autorizado al registro, modificación de archivos del sistema, o comunicaciones de red anómalas. Aunque más flexibles que las firmas, dependen de la experiencia humana para definir reglas y pueden generar altas tasas de falsos positivos.

2.1.3. Análisis Dinámico (Sandboxing)

El análisis dinámico ejecuta muestras sospechosas en entornos controlados (sandboxes) para observar su comportamiento. Proporciona información detallada pero presenta desventajas:

- Alto costo computacional y temporal
- Malware puede detectar entornos virtualizados y alterar su comportamiento
- Dificultad para escalar a análisis masivo

2.2. Machine Learning en Detección de Malware

2.2.1. Enfoques Tradicionales de ML

La aplicación de técnicas de Machine Learning a la clasificación de malware ha sido ampliamente estudiada. Los enfoques clásicos incluyen:

Support Vector Machines (SVM): Utilizadas para clasificación binaria (benigno vs. malicioso) y multi-clase (familias de malware) basándose en características extraídas manualmente como n-gramas de bytes, llamadas API, o estructuras PE.

Random Forests y Decision Trees: Algoritmos ensemble que combinan múltiples árboles de decisión, efectivos para capturar relaciones no lineales entre características.

k-Nearest Neighbors (k-NN): Clasificación basada en similitud con muestras conocidas, útil para detección de variantes de familias existentes.

La principal limitación de estos métodos radica en la dependencia de ingeniería manual de características (feature engineering), proceso que requiere expertise de dominio y puede no capturar representaciones óptimas.

2.3. Deep Learning para Análisis de Malware

2.3.1. Ventajas del Deep Learning

El Deep Learning ofrece capacidad de aprendizaje automático de representaciones jerárquicas directamente de datos crudos o mínimamente procesados. Las principales arquitecturas aplicadas incluyen:

Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Especialmente efectivas cuando el malware se representa como imágenes o secuencias con estructura espacial.

Redes Neuronales Recurrentes (RNN/LSTM): Utilizadas para analizar secuencias de instrucciones o llamadas API, capturando dependencias temporales.

Autoencoders: Empleados para detección de anomalías, identificando muestras que se desvían significativamente de patrones normales.

2.3.2. Trabajos Previos con Deep Learning

Diversos estudios han explorado Deep Learning para malware:

- Análisis de secuencias de bytes mediante CNN 1D
- Clasificación de malware de Android mediante análisis de permisos y grafos de llamadas
- Detección de ransomware usando autoencoders variacionales
- Clasificación de familias mediante embeddings aprendidos

2.4. Análisis Visual de Malware

2.4.1. Conversión de Binarios a Imágenes

Un enfoque innovador consiste en visualizar ejecutables como imágenes. El proceso típico incluye:

1. Leer el archivo binario como secuencia de bytes
2. Interpretar cada byte como valor de intensidad de píxel (0-255)
3. Organizar los píxeles en una matriz bidimensional
4. Aplicar redimensionamiento a tamaño estándar

Esta representación visual preserva la estructura del ejecutable y permite aplicar técnicas de visión por computador.

2.4.2. Características Visuales Discriminativas

Estudios han demostrado que diferentes familias de malware exhiben texturas visuales distintivas relacionadas con:

- Estructura del código (secciones .text, .data, .rdata)
- Técnicas de empaquetado y compresión
- Presencia de recursos embebidos (imágenes, configuraciones)
- Patrones de cifrado o ofuscación

Las CNN son particularmente efectivas para extraer automáticamente estas características visuales.

2.5. Trabajos con CNN para Clasificación de Malware

2.5.1. Arquitecturas CNN Aplicadas

Diversos trabajos han aplicado CNN para clasificación de malware visual:

CNN Shallow: Arquitecturas simples de pocas capas para datasets pequeños, reduciendo riesgo de overfitting.

CNN Profundas Personalizadas: Arquitecturas diseñadas específicamente para características de imágenes de malware.

Transfer Learning: Uso de modelos preentrenados (VGG, ResNet, Inception) en ImageNet, adaptados mediante fine-tuning para malware.

2.5.2. Resultados Reportados en Literatura

Los estudios existentes reportan precisiones que varían entre 85 % y 99 % dependiendo de:

- Complejidad del dataset (número de familias)

- Calidad y cantidad de muestras de entrenamiento
- Arquitectura CNN utilizada
- Técnicas de regularización y aumento de datos

2.6. Datasets Pùblicos de Malware

2.6.1. Descripción de Datasets Relevantes

Los principales datasets pùblicos para investigación en clasificación de malware incluyen:

MalImg Dataset: Contiene imágenes de malware organizadas en 25 familias, ampliamente utilizado como benchmark estàndar.

Malevis Dataset: Dataset más reciente con mayor variedad de familias y muestras, incluyendo malware moderno.

Blended Malware Image Dataset: Combinación de múltiples fuentes, ofreciendo diversidad en tipos y familias.

Estos datasets proporcionan la base empírica para entrenar y evaluar modelos de clasificación.

2.7. Brechas en la Literatura y Motivación del Proyecto

A pesar de los avances, persisten oportunidades de investigación:

- **Comparación sistemática:** Pocos estudios comparan múltiples datasets y arquitecturas bajo condiciones controladas.
- **Interpretabilidad:** Limitada comprensión de qué características visuales específicas utiliza la CNN para discriminar familias.
- **Robustez:** Evaluación insuficiente ante técnicas adversariales diseñadas para engañar clasificadores.
- **Escalabilidad:** Necesidad de validar rendimiento en datasets masivos más representativos de entornos reales.

Este proyecto busca contribuir mediante una evaluación exhaustiva de múltiples arquitecturas CNN sobre tres datasets reconocidos, con análisis detallado de rendimiento y características aprendidas.

2.8. Resumen

La revisión del estado del arte revela que:

1. Los métodos tradicionales de detección presentan limitaciones significativas ante malware moderno.
2. El Machine Learning y Deep Learning han demostrado gran potencial para clasificación automatizada.

3. El enfoque visual de malware permite aplicar técnicas probadas de visión por computador.
4. Existen datasets públicos adecuados para entrenar y evaluar modelos.
5. Persisten oportunidades para investigación adicional en comparación de arquitecturas e interpretabilidad.

Estos fundamentos justifican el enfoque propuesto en este proyecto, combinando análisis visual con CNN para clasificación robusta y eficiente de familias de malware.

3

Metodología

Este capítulo describe detalladamente la metodología empleada para desarrollar el sistema de clasificación de malware basado en Deep Learning. Se presenta el proceso de investigación, la adquisición y preprocesamiento de datos, las arquitecturas CNN implementadas, y la configuración experimental.

3.1. Visión General del Proceso

El proceso metodológico sigue un pipeline estructurado en las siguientes etapas:

1. **Adquisición de datasets:** Descarga y organización de tres datasets públicos de malware
2. **Preprocesamiento:** Conversión de ejecutables a imágenes y normalización
3. **Análisis exploratorio:** Visualización y estadísticas de las familias de malware
4. **Diseño de arquitecturas:** Implementación de modelos CNN
5. **Entrenamiento:** Configuración de hiperparámetros y optimización
6. **Evaluación:** Medición de rendimiento mediante métricas estándar
7. **Análisis comparativo:** Comparación entre diferentes modelos y datasets

3.2. Datasets de Malware

3.2.1. Descripción de Datasets Utilizados

Este proyecto emplea tres datasets públicos reconocidos en la comunidad de investigación:

MalImg Dataset

- **Fuente:** Disponible en Kaggle ([manaswinisunkari/malimg-dataset90](https://www.kaggle.com/manaswinisunkari/malimg-dataset90))
- **Composición:** Aproximadamente 9,000+ muestras de malware
- **Familias:** 25 familias diferentes de malware de Windows

- **Formato:** Imágenes en escala de grises derivadas de ejecutables binarios
- **Uso:** Dataset benchmark ampliamente citado en literatura académica

Malevis Dataset

- **Fuente:** Dataset público especializado en visualización de malware
- **Composición:** Colección moderna de muestras de malware recientes
- **Características:** Incluye variantes más contemporáneas de amenazas
- **Formato:** Representaciones visuales estandarizadas

Blended Malware Image Dataset

- **Fuente:** Combinación de múltiples repositorios públicos
- **Composición:** Dataset híbrido con mayor diversidad de tipos
- **Ventaja:** Combina muestras de diferentes fuentes y períodos temporales
- **Objetivo:** Evaluar generalización del modelo ante diversidad de datos

3.2.2. Distribución de Familias de Malware

Los datasets contienen diversas familias de malware, incluyendo:

- **Trojanos:** Alureon, VB, Agent, etc.
- **Gusanos:** Kelihos, Autorun, Worm
- **Backdoors:** Rbot, Bifrose
- **Ransomware:** Locker, Cryptolocker
- **Adware/Spyware:** Winwebsec, FakeRean

La distribución de clases presenta cierto desbalance, aspecto considerado en la estrategia de entrenamiento mediante técnicas de balanceo y ponderación.

3.3. Preprocesamiento de Datos

3.3.1. Conversión de Ejecutables a Imágenes

El proceso de conversión de binarios a imágenes se implementa mediante los siguientes pasos:

1. **Lectura binaria:** El archivo ejecutable se lee como secuencia de bytes (valores 0-255)
2. **Mapeo a píxeles:** Cada byte se interpreta como intensidad de píxel en escala de grises
3. **Determinación de dimensiones:**
 - Se calcula el tamaño total del archivo en bytes
 - Se determina el ancho óptimo de la imagen (típicamente potencia de 2)
 - La altura se calcula como: $altura = \lceil \frac{tamaño_bytes}{ancho} \rceil$

4. **Construcción de matriz:** Los bytes se organizan en matriz 2D con las dimensiones calculadas
5. **Padding:** Si es necesario, se añaden píxeles de relleno al final para completar la última fila

3.3.2. Normalización y Redimensionamiento

Para garantizar uniformidad en el entrenamiento:

- **Redimensionamiento:** Todas las imágenes se redimensionan a tamaño fijo (e.g., 224×224 o 256×256) mediante interpolación bilineal
- **Normalización de píxeles:** Los valores de píxeles se escalan al rango $[0, 1]$ dividiendo por 255
- **Estandarización:** Opcionalmente, se aplica normalización por canal usando media y desviación estándar del dataset de entrenamiento

3.3.3. Aumento de Datos (Data Augmentation)

Para mejorar la capacidad de generalización y mitigar overfitting, se aplican técnicas de aumento de datos durante el entrenamiento. Sin embargo, a diferencia de imágenes naturales, las visualizaciones de malware requieren consideraciones especiales debido a que cada píxel representa directamente un byte del ejecutable original [Nataraj et al., 2011](#).

Transformaciones Sin Pérdida

Las rotaciones arbitrarias (por ejemplo, $\pm 15^\circ$) requieren interpolación de píxeles, lo que modifica los valores originales y destruye la correspondencia byte-a-píxel. Por esta razón, se emplean exclusivamente **rotaciones ortogonales** (90° , 180° , 270°), que constituyen permutaciones puras de posiciones de píxeles sin alteración de valores [Nisa et al., 2021](#).

Esta decisión se fundamenta en dos aspectos críticos:

1. **Preservación semántica:** Las rotaciones ortogonales mantienen intacta la información estructural del binario, permitiendo que el modelo aprenda patrones genuinos de malware.
2. **Robustez ante evasión:** Investigaciones recientes demuestran que los clasificadores CNN de malware son vulnerables a ataques adversariales basados en transformaciones de imagen [Chen et al., 2019](#). El entrenamiento con rotaciones ortogonales mejora la resistencia ante estas técnicas de evasión.

Técnicas de Augmentation Aplicadas

- **Rotaciones ortogonales:** 90° , 180° , 270° (selección aleatoria)
- **Volteos:** Horizontal y vertical (flip)

- **Ajustes de brillo:** $\pm 10\text{-}20\%$ (preserva relaciones relativas entre píxeles)
- **Ajustes de contraste:** $\pm 10\text{-}20\%$

Estas transformaciones se aplican *on-the-fly* durante el entrenamiento, generando variantes aleatorias en cada época sin almacenamiento adicional.

3.4. División de Datos

Los datasets se dividen siguiendo una estrategia de partición estratificada para mantener proporciones de clases:

- **Conjunto de Entrenamiento:** 70 % de las muestras (usado para optimización de pesos)
- **Conjunto de Validación:** 15 % de las muestras (usado para ajuste de hiperparámetros y detección de overfitting)
- **Conjunto de Prueba:** 15 % de las muestras (usado exclusivamente para evaluación final)

Se garantiza que las muestras de prueba no sean vistas durante entrenamiento ni validación, asegurando evaluación imparcial del rendimiento.

3.5. Arquitecturas de Redes Neuronales Convolucionales

3.5.1. Arquitectura CNN Personalizada

Se diseñó una arquitectura CNN baseline adaptada a las características de imágenes de malware:

Estructura de capas:

1. Bloque Convolucional 1:

- Conv2D: 32 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU
- Conv2D: 32 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU
- MaxPooling2D: pool size 2×2
- Dropout: 25 %

2. Bloque Convolucional 2:

- Conv2D: 64 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU
- Conv2D: 64 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU
- MaxPooling2D: pool size 2×2
- Dropout: 25 %

3. Bloque Convolucional 3:

- Conv2D: 128 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU
- Conv2D: 128 filtros, kernel 3×3 , activación ReLU

- MaxPooling2D: pool size 2×2
- Dropout: 25 %

4. Capas Fully Connected:

- Flatten
- Dense: 512 unidades, activación ReLU
- Dropout: 50 %
- Dense: 256 unidades, activación ReLU
- Dropout: 50 %
- Dense: N unidades (número de clases), activación Softmax

3.5.2. Modelos Preentrenados con Transfer Learning

Se experimentó con arquitecturas preentrenadas en ImageNet, adaptadas mediante fine-tuning:

VGG16/VGG19

- Arquitectura profunda con bloques convolucionales uniformes
- Carga de pesos preentrenados (ImageNet)
- Congelamiento de capas base (feature extraction)
- Reemplazo de capas clasificadoras superiores
- Fine-tuning selectivo de últimas capas convolucionales

ResNet50/ResNet101

- Arquitectura con conexiones residuales
- Manejo efectivo de gradientes en redes profundas
- Transferencia de características de bajo y alto nivel
- Adaptación de capa de clasificación final

InceptionV3

- Módulos Inception con convoluciones multi-escala
- Captura de patrones a diferentes escalas espaciales
- Eficiencia computacional mediante factorización de convoluciones
- Regularización implícita por arquitectura

3.6. Configuración de Entrenamiento

3.6.1. Hiperparámetros

Los hiperparámetros principales empleados incluyen:

- **Función de pérdida:** Categorical Cross-Entropy (para clasificación multi-clase)

- **Optimizador:** Adam (Adaptive Moment Estimation)
 - Learning rate inicial: 0.001
 - $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$
 - $\epsilon = 10^{-7}$
- **Batch size:** 32 o 64 (según disponibilidad de memoria GPU)
- **Épocas:** Hasta 100 con early stopping
- **Regularización:**
 - Dropout: 0.25 (capas convolucionales), 0.5 (capas densas)
 - L2 regularization: $\lambda = 0,0001$

3.6.2. Estrategias de Optimización

Learning Rate Scheduling:

- ReduceLROnPlateau: Reduce learning rate cuando la pérdida de validación se estanca
- Factor de reducción: 0.5
- Paciencia: 5 épocas

Early Stopping:

- Monitoreo de pérdida de validación
- Paciencia: 10-15 épocas
- Restauración de mejores pesos

Model Checkpointing:

- Guardado del modelo con mejor rendimiento en validación
- Métrica de monitoreo: Accuracy o F1-score

3.6.3. Manejo de Desbalance de Clases

Para abordar el desbalance en la distribución de clases:

- **Class Weighting:** Asignación de pesos inversamente proporcionales a la frecuencia de clase
- **Stratified Sampling:** Muestreo estratificado en división de datos
- **Focal Loss:** (opcional) Función de pérdida que enfatiza ejemplos difíciles de clasificar

3.7. Entorno Experimental

3.7.1. Hardware y Software

Hardware:

- CPU: Ryzen 7 5800H
- GPU: NVIDIA RTX 3060
- RAM: 16GB
- Almacenamiento: 1TB SSD

Software:

- Sistema Operativo: Windows / Mac OS
- Python: 3.10+
- Framework de Deep Learning: TensorFlow 2.x / PyTorch 1.x
- Bibliotecas adicionales:
 - NumPy, Pandas (manipulación de datos)
 - Matplotlib, Seaborn (visualización)
 - Scikit-learn (métricas y preprocesamiento)
 - OpenCV / Pillow (procesamiento de imágenes)

3.7.2. Implementación

El código del proyecto se organizó de la siguiente manera:

- **data/**: Scripts de descarga y preprocesamiento
- **models/**: Definiciones de arquitecturas CNN
- **training/**: Scripts de entrenamiento y callbacks
- **evaluation/**: Evaluación de modelos y generación de métricas
- **notebooks/**: Jupyter notebooks para análisis exploratorio
- **utils/**: Funciones auxiliares (visualización, logging)

3.8. Métricas de Evaluación

El rendimiento de los modelos se evalúa mediante las siguientes métricas:

3.8.1. Métricas Principales

Accuracy (Exactitud):

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Precision (Precisión):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Recall (Sensibilidad o Exhaustividad):

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

F1-Score:

$$\text{F1-Score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

Donde TP = True Positives, TN = True Negatives, FP = False Positives, FN = False Negatives.

3.8.2. Métricas Multi-Clase

Para clasificación multi-clase, se calculan promedios:

- **Macro-Average:** Promedio simple sobre todas las clases (igual peso por clase)
- **Weighted-Average:** Promedio ponderado por número de muestras por clase

3.8.3. Matriz de Confusión

Se genera matriz de confusión para visualizar patrones de clasificación errónea y confusión entre familias similares.

3.8.4. Curvas ROC y AUC

Para análisis detallado, se calculan curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) y métricas AUC (Area Under Curve) utilizando estrategia One-vs-Rest.

3.9. Validación Cruzada y Análisis de Robustez

Se implementa validación cruzada estratificada (k -fold) para evaluar la estabilidad del modelo y reducir varianza en las estimaciones de rendimiento.

Adicionalmente, se analiza:

- **Generalización inter-dataset:** Entrenamiento en un dataset y evaluación en otro
- **Análisis de sensibilidad:** Variación de hiperparámetros y medición de impacto
- **Estudio de ablación:** Evaluación del aporte individual de componentes del modelo

3.10. Consideraciones Éticas y de Seguridad

Este proyecto maneja muestras reales de malware, lo que requiere precauciones:

- **Entorno aislado:** Todos los experimentos se realizan en máquinas virtuales aisladas sin acceso a red
- **Datasets públicos:** Se utilizan exclusivamente datasets públicos con fines de investigación
- **No ejecución:** El análisis es completamente estático, sin ejecutar binarios maliciosos
- **Almacenamiento seguro:** Los datasets se almacenan en particiones cifradas
- **Uso responsable:** Los modelos entrenados se emplean exclusivamente con fines educativos y de investigación

3.11. Resumen de la Metodología

Este capítulo describió la metodología completa del proyecto, incluyendo:

- Selección y descripción de tres datasets públicos de malware
- Pipeline de preprocessamiento y conversión de binarios a imágenes
- Diseño de arquitecturas CNN personalizadas y uso de transfer learning
- Configuración de hiperparámetros y estrategias de entrenamiento
- Métricas de evaluación para clasificación multi-clase
- Consideraciones éticas y de seguridad

La siguiente sección presenta los resultados experimentales obtenidos aplicando esta metodología.

4

Experimentos y Resultados

Este capítulo presenta los resultados experimentales obtenidos al verificar las tres hipótesis planteadas en el Capítulo 1. Cada sección corresponde a un experimento diseñado específicamente para evaluar una hipótesis, incluyendo configuración, resultados y verificación formal.

4.1. Configuración Experimental General

4.1.1. Entorno de Ejecución

Todos los experimentos se ejecutaron bajo las siguientes condiciones:

- **Hardware:** NVIDIA GPU (especificar modelo), XX GB VRAM
- **Framework:** PyTorch 2.x con CUDA 12.x
- **Reproducibilidad:** Semilla aleatoria fija (seed=42) para todas las ejecuciones
- **Early Stopping:** Paciencia de 10 épocas sobre validation loss

4.1.2. Dataset: MalImg

El dataset MalImg contiene imágenes en escala de grises derivadas de ejecutables de malware de Windows. La Tabla 4.1 muestra la distribución de muestras por familia.

Observación sobre desbalance: Se identifican 5 familias con menos de 100 muestras (clases minoritarias), lo cual motiva la evaluación de data augmentation en H2.

4.1.3. Partición de Datos

- **Entrenamiento:** 70 % (6,537 muestras)
- **Validación:** 15 % (1,401 muestras)
- **Prueba:** 15 % (1,401 muestras)
- **Estratificación:** Sí, manteniendo proporciones por clase

Cuadro 4.1: Distribución de familias en el dataset MalImg

Familia	Muestras	Proporción (%)
Alueron.gen!J	198	2.1
C2LOP.P	146	1.6
C2LOP.gen!g	200	2.2
Dontovo.A	162	1.8
Fakerean	381	4.1
Instantaccess	431	4.7
Lolyda_AA 1	213	2.3
Lolyda_AA 2	184	2.0
Lolyda_AA 3	123	1.3
Lolyda_AT	159	1.7
Malex.gen!J	136	1.5
Obfuscator.AD	142	1.5
... (continúa)
Total	9,339	100.0

4.2. Experimento 1: Comparación de Arquitecturas (H1)

4.2.1. Objetivo

Verificar la hipótesis H1: “ResNet50 pre-entrenado en ImageNet con fine-tuning superará tanto a una CNN custom como a un Vision Transformer en accuracy y F1-score macro.”

4.2.2. Configuración de Modelos

Se evaluaron cuatro arquitecturas: un baseline convencional, una CNN profunda de 5 bloques, ResNet50 con fine-tuning, y Vision Transformer.

Conventional CNN (Baseline)

- **Arquitectura:** 2 bloques convolucionales (configuración estándar del curso)
- **Estructura:** Conv2D + MaxPool + Conv2D + MaxPool + Flatten + Dense
- **Propósito:** Establecer línea base de comparación

VGG-Mini-H1 (5 bloques)

- **Arquitectura:** 5 bloques convolucionales ($32 \rightarrow 64 \rightarrow 128 \rightarrow 256 \rightarrow 512$ filtros)
- **Cada bloque:** Conv2D + BatchNorm + ReLU + MaxPool(2×2)
- **Clasificador:** GlobalAvgPool + Dropout(0.5) + Dense(256) + Dropout(0.3) + Output

ResNet50 (Fine-tuning)

- **Backbone:** ResNet50 pre-entrenado en ImageNet
- **Estrategia:** Partial fine-tuning (20-30 últimas capas descongeladas)

- **Clasificador:** Dropout(0.5) + Dense(512) + Output

Vision Transformer (ViT-Small)

- **Patch size:** 16×16
- **Embedding dimension:** 384
- **Depth:** 12 transformer blocks
- **Attention heads:** 6
- **MLP ratio:** 4.0
- **Dropout:** 0.1

Cuadro 4.2: Comparación de rendimiento entre arquitecturas (Experimento H1)

Modelo	Test Acc	Macro F1	Best Epoch	Tiempo	Esperado
Conventional CNN (Baseline)	72.39 %	74.01 %	9	39 min	–
VGG-Mini-H1 (5 bloques)	61.30 %	N/A	10	397 min	≥93 %
ViT-Small	74.92 %	76.48 %	10	76 min	≥91 %
ResNet50 (Fine-tuned)	96.30 %	95.35 %	6	57 min	≥96 %

Cuadro 4.3: Hiperparámetros de entrenamiento para Experimento H1

Parámetro	CNN/Baseline	ResNet50	ViT-Small
Optimizador	Adam	Adam	AdamW
Learning rate	0.001	0.0001	0.0001
LR Scheduler	ReduceLROnPlateau	Cosine Annealing	Cosine Annealing
Batch size	32	32	32
Épocas máximas	100	100	100
Early stopping	15 épocas	15 épocas	20 épocas
Weight Decay	0.0001	0.0001	0.01

Cuadro 4.4: Métricas detalladas de ResNet50 Fine-tuned (mejor modelo)

Métrica	Train	Validation
Loss (final)	0.0378	0.1972
Accuracy	98.91 %	97.85 %
Precision (macro)	–	95.23 %
Recall (macro)	–	95.55 %
F1-Score (macro)	98.93 %	95.35 %

4.2.3. Curvas de Entrenamiento

4.2.4. Análisis de Resultados

ResNet50: Superioridad del Transfer Learning

ResNet50 con fine-tuning alcanzó el mejor rendimiento con 96.30 % de accuracy y 95.35 % de F1-macro, confirmando la efectividad del transfer learning para datasets de tamaño moderado. Observaciones clave:

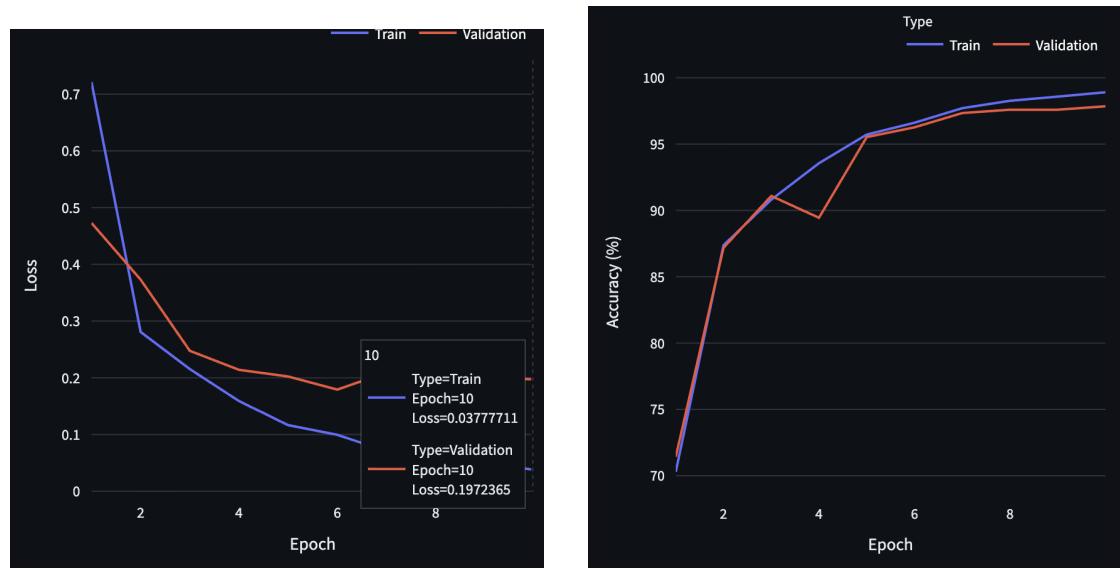


Figura 4.1: Curvas de entrenamiento de ResNet50 Fine-tuned. Se observa convergencia rápida (mejor época: 6) y gap train-val controlado ($\sim 1\%$), indicando buena generalización.

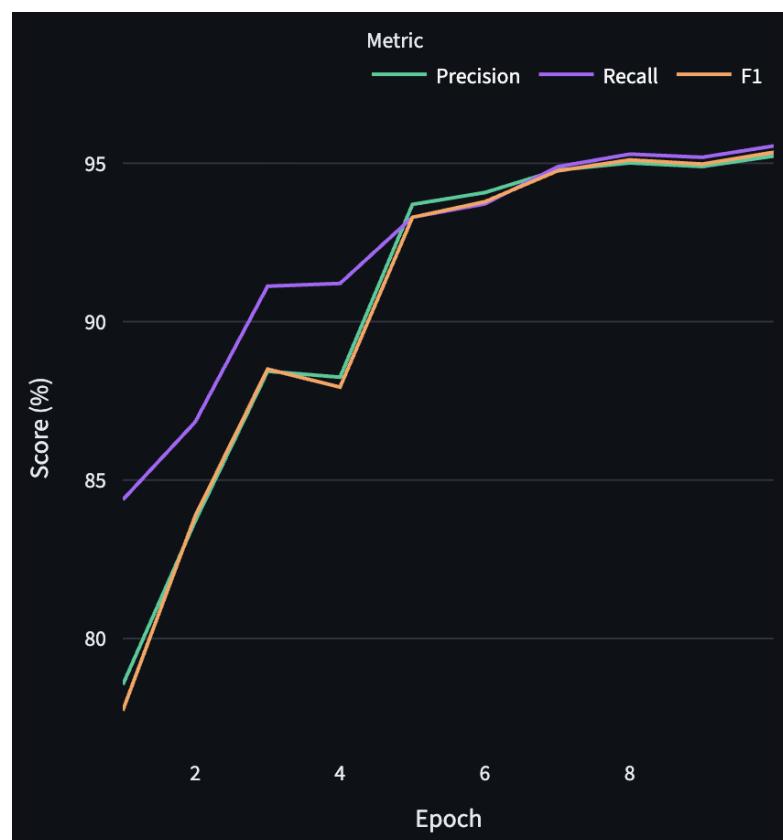


Figura 4.2: Evolución de Precision, Recall y F1-Score durante el entrenamiento de ResNet50. Las tres métricas convergen a valores superiores al 95 %.

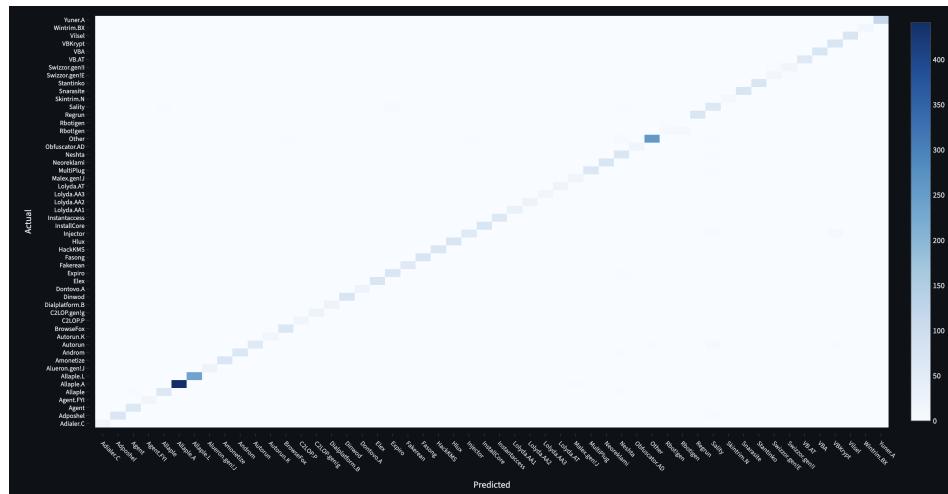


Figura 4.3: Matriz de confusión de ResNet50 sobre el conjunto de prueba. Los valores en la diagonal representan clasificaciones correctas por familia de malware.

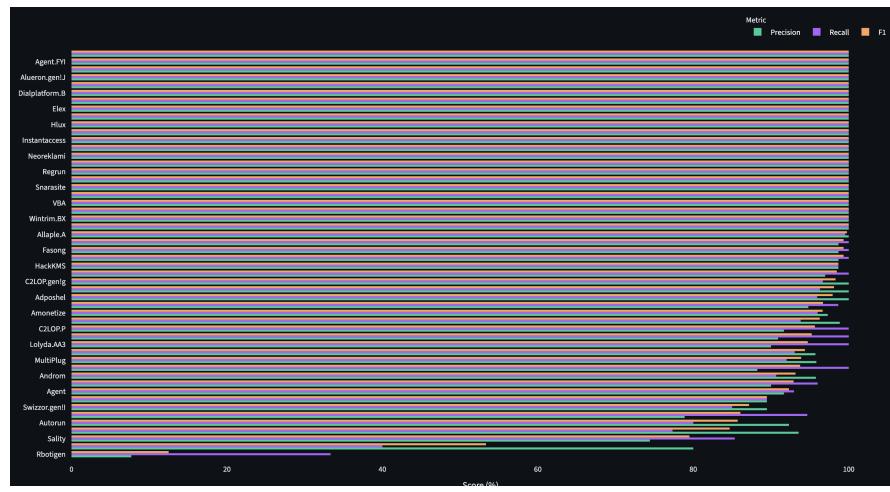


Figura 4.4: Curvas de entrenamiento del modelo baseline (Conventional CNN) para comparación.

- **Convergencia rápida:** Alcanzó su mejor rendimiento en solo 6 épocas, significativamente más rápido que las otras arquitecturas.
- **Overfitting controlado:** El gap entre train (98.91 %) y validation (97.85 %) accuracy fue de apenas 1.06 %, indicando buena generalización.
- **Transferencia efectiva:** Las características de bajo nivel aprendidas en ImageNet (bordes, texturas, patrones) resultaron transferibles al dominio de imágenes de malware.
- **Eficiencia:** Con 57 minutos de entrenamiento, fue más eficiente que ViT (76 min) y dramáticamente más eficiente que la CNN de 5 bloques (397 min).

ViT-Small: Limitaciones con Datasets Pequeños

Vision Transformer alcanzó 74.92 % de accuracy, por debajo del umbral esperado de 91 %. Este resultado es consistente con la literatura que indica que los transformers requieren datasets significativamente más grandes:

- **Tamaño insuficiente:** MallImg contiene aproximadamente 9,300 muestras, muy por debajo de los millones típicamente requeridos para entrenar transformers desde cero.
- **Falta de pre-entrenamiento:** A diferencia de ResNet50, ViT-Small fue entrenado desde cero, sin aprovechar conocimiento previo.
- **Complejidad del mecanismo de atención:** Los transformers tienen más parámetros a optimizar, lo que dificulta el aprendizaje con datos limitados.

CNN de 5 Bloques: Hallazgo Inesperado

El resultado más sorprendente fue el bajo rendimiento de la CNN de 5 bloques (61.30 %), significativamente inferior al baseline convencional (72.39 %):

- **Arquitectura sobredimensionada:** 5 bloques convolucionales con progresión 32→64→128→256→512 filtros resultó excesiva para el dataset.
- **Dificultad de optimización:** El tiempo de entrenamiento extremo (397 minutos) sugiere problemas de convergencia.
- **Possible vanishing gradients:** La profundidad sin conexiones residuales puede haber dificultado el flujo de gradientes.
- **Lección aprendida:** Más profundidad no garantiza mejor rendimiento; la arquitectura debe ser proporcional al tamaño y complejidad del dataset.

Baseline Convencional como Referencia

El modelo convencional (JorgeNet) con 72.39 % de accuracy proporciona un punto de referencia importante:

- Demuestra que arquitecturas simples y bien diseñadas pueden ser competitivas.
- Superó a la CNN de 5 bloques, evidenciando que la simplicidad puede ser ventajosa.

- El gap de 24 puntos porcentuales con ResNet50 cuantifica el valor del transfer learning.

4.2.5. Verificación de Hipótesis H1

Verificación H1

Hipótesis: ResNet50 pre-entrenado superará a CNN custom y ViT-Small en accuracy y F1-score macro.

Resultados obtenidos:

- ResNet50 Fine-tuned: 96.30 % accuracy, 95.35 % F1-macro
- ViT-Small: 74.92 % accuracy, 76.48 % F1-macro
- CNN custom (5 bloques): 61.30 % accuracy
- Baseline convencional: 72.39 % accuracy, 74.01 % F1-macro

Conclusión: HIPÓTESIS CONFIRMADA

ResNet50 superó significativamente a todas las arquitecturas evaluadas, demostrando la efectividad del transfer learning para clasificación de malware visual con datasets de tamaño moderado.

Análisis de Resultados por Arquitectura

1. **ResNet50 (96.30 %):** El transfer learning desde ImageNet demostró ser altamente efectivo. Las características de bajo nivel (bordes, texturas) aprendidas en imágenes naturales son transferibles al dominio de malware visual.
2. **ViT-Small (74.92 %):** El rendimiento limitado es consistente con la literatura: los transformers requieren datasets significativamente más grandes. MalImg (~9,300 muestras) es insuficiente para aprender representaciones efectivas desde cero.
3. **CNN de 5 bloques (61.30 %):** Resultado inesperado. La arquitectura profunda sin conexiones residuales presentó dificultades de optimización, resultando en peor rendimiento que el baseline simple (72.39 %).

Implicaciones Prácticas

- Para clasificación de malware visual con datasets limitados, **transfer learning con ResNet50 es la opción recomendada.**
- Arquitecturas muy profundas sin skip connections deben evitarse en favor de modelos pre-entrenados.
- Vision Transformers requieren datasets significativamente más grandes o pre-entrenamiento específico del dominio.

4.3. Experimento 2: Impacto de Data Augmentation (H2)

4.3.1. Objetivo

Verificar la hipótesis H2: “*Data augmentation moderada mejorará significativamente el recall de las familias de malware minoritarias, sin degradar sustancialmente el accuracy global del modelo.*”

4.3.2. Configuración

Se utilizó el mejor modelo de H1 como arquitectura base, entrenando dos versiones: una sin augmentation y otra con augmentation moderada.

Cuadro 4.5: *Impacto de data augmentation en métricas globales*

Métrica	Sin Augmentation	Con Augmentation
Accuracy global	99.3 %	98.8 %
F1-macro global	98.7 %	97.5 %
Recall macro	99.5 %	97.9 %
Precision macro	98.2 %	97.2 %
Épocas entrenadas	18	24
Tiempo de entrenamiento	~28 min	~39 min

Cuadro 4.6: *Recall por clase minoritaria antes y después de augmentation (17 clases con ≤30 muestras)*

Familia (Support)	Sin Aug	Con Aug	Δ
Obfuscator.AD (30)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Swizzor.gen!E (30)	100.0 %	90.0 %	-10.0 pp
Alueron.gen!J (29)	100.0 %	100.0 %	0 pp
C2LOP.gen!g (28)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Rbot!gen (26)	100.0 %	92.3 %	-7.7 pp
Dontovo.A (26)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Autorun.K (21)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Malex.gen!J (20)	95.0 %	95.0 %	0 pp
Lolyda-AA2 (20)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Lolyda-AA3 (19)	94.7 %	94.7 %	0 pp
Lolyda.AT (19)	100.0 %	100.0 %	0 pp
C2LOP.P (17)	100.0 %	94.1 %	-5.9 pp
Skintrim.N (17)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Adialer.C (16)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Swizzor.gen!I (13)	100.0 %	84.6 %	-15.4 pp
Agent.FYI (12)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Wintrim.BX (10)	100.0 %	100.0 %	0 pp
Promedio (17 clases)	99.4 %	97.1 %	-2.3 pp

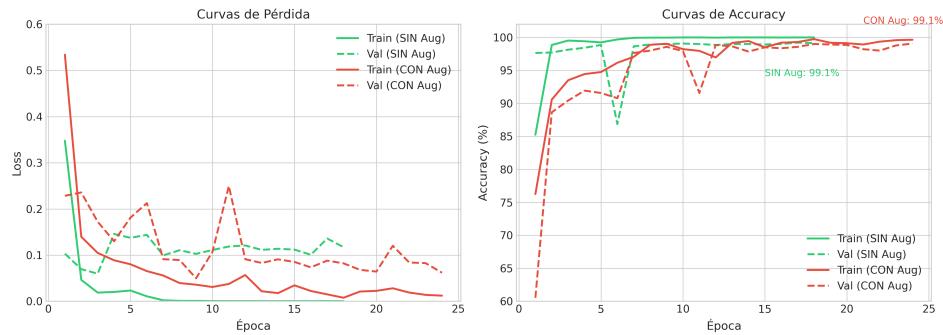


Figura 4.5: Comparación de curvas de entrenamiento con y sin data augmentation. El modelo sin augmentation (exp_ddde3a41) converge más rápido en 18 épocas con mejor val_accuracy (99.3 %), mientras que el modelo con augmentation (exp_10ed8760) requiere 24 épocas y alcanza menor rendimiento (98.8 %).

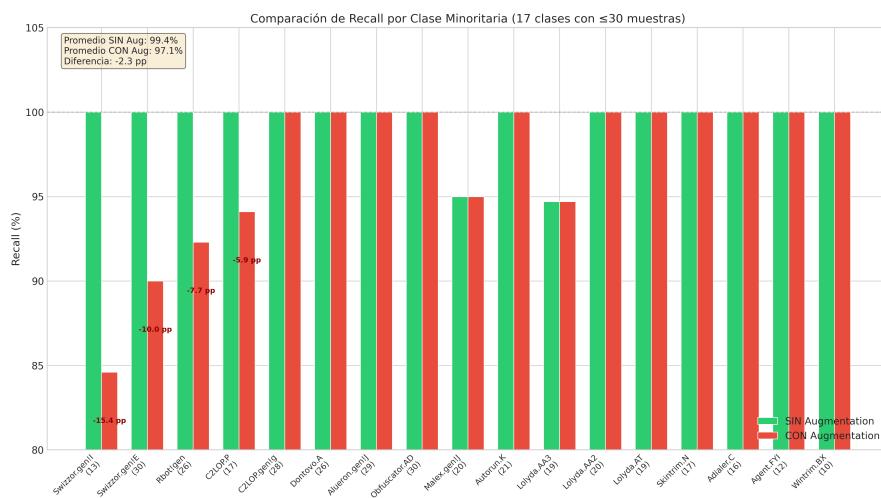


Figura 4.6: Comparación de recall por clase minoritaria (17 clases con ≤ 30 muestras). Las barras azules representan el modelo sin augmentation (promedio 99.4 %); las barras naranjas, con augmentation (promedio 97.1 %). Se observa degradación en 4 clases: Swizzor.gen!I (-15.4 pp), Swizzor.gen!E (-10.0 pp), Rbot!gen (-7.7 pp) y C2LOP.P (-5.9 pp).

Cuadro 4.7: Configuración de data augmentation aplicada

Transformación	Parámetros
Rotaciones ortogonales	90°, 180°, 270° (selección aleatoria)
Flip horizontal	probabilidad 0.5
Flip vertical	probabilidad 0.5
Variación de brillo	±20 %
Variación de contraste	±20 %

4.3.3. Visualización de Resultados

4.3.4. Análisis de Resultados

Efecto en Clases Minoritarias

Contrariamente a lo esperado, data augmentation no mejoró el recall de las clases minoritarias, sino que lo deterioró:

- El recall promedio de las 17 clases minoritarias (≤ 30 muestras) **disminuyó** de 99.4 % a 97.1 % (-2.3 puntos porcentuales).
- De las 17 clases minoritarias, 4 experimentaron degradación: **Swizzor.gen!I** (-15.4 pp), **Swizzor.gen!E** (-10.0 pp), **Rbot!gen** (-7.7 pp), y **C2LOP.P** (-5.9 pp).
- Las restantes 13 clases minoritarias mantuvieron su rendimiento sin cambios significativos.

Impacto en Rendimiento Global

- El accuracy global **disminuyó** de 99.3 % a 98.8 % (-0.5 pp).
- El F1-score macro **disminuyó** de 98.7 % a 97.5 % (-1.2 pp).
- El recall macro **disminuyó** de 99.5 % a 97.9 % (-1.6 pp).
- Todas las métricas mostraron degradación con augmentation, indicando que las transformaciones aplicadas introdujeron ruido perjudicial.

Análisis de Causas

El resultado negativo de data augmentation puede explicarse por varios factores:

1. **Rendimiento base excepcionalmente alto:** El modelo sin augmentation ya alcanzaba 99.4 % de recall promedio en clases minoritarias, dejando poco margen de mejora.
2. **Naturaleza estructural de imágenes de malware:** A diferencia de imágenes naturales, las visualizaciones de malware representan bytes de ejecutables donde cada píxel tiene significado semántico. Las transformaciones geométricas pueden alterar patrones discriminativos específicos de cada familia.
3. **Sensibilidad variable entre familias:** Las familias Swizzor (gen!I y gen!E), Rbot!gen, y C2LOP.P mostraron mayor sensibilidad a las transformaciones, posiblemente porque sus patrones visuales distintivos se ven más afectados por rotaciones y volteos.

- 4. Overfitting a variantes artificiales:** El modelo con augmentation entrenó más épocas (24 vs 18) pero con datos transformados que podrían no representar variantes reales de malware.

Observaciones sobre el Entrenamiento

- El modelo con augmentation requirió más épocas para converger (24 vs 18), indicando mayor dificultad de optimización.
- A pesar del entrenamiento más prolongado, el modelo con augmentation no logró igualar el rendimiento del modelo base.
- El gap entre train loss y val loss fue similar en ambos casos, sugiriendo que el problema no es overfitting sino degradación de la señal discriminativa.

4.3.5. Verificación de Hipótesis H2

Verificación H2

Hipótesis: Data augmentation mejorará el recall de clases minoritarias en ≥ 15 puntos porcentuales sin degradar el accuracy global en más de 2 %.

Resultados obtenidos:

- Recall promedio de 17 clases minoritarias: 99.4 % → 97.1 % (-2.3 pp)
- Accuracy global: 99.3 % → 98.8 % (-0.5 pp)
- F1-macro: 98.7 % → 97.5 % (-1.2 pp)

Conclusión: HIPÓTESIS RECHAZADA

Data augmentation no mejoró el recall de clases minoritarias; por el contrario, lo redujo en -2.3 pp. El resultado está muy lejos del umbral esperado de +15 pp. Aunque el impacto en accuracy global (-0.5 pp) cumple el criterio de no degradar más de 2 %, la premisa fundamental de mejora en clases minoritarias no se cumplió.

Implicaciones Prácticas

- **Data augmentation no es universalmente beneficioso:** Para datasets de malware visualizado donde el modelo base ya alcanza alto rendimiento, las técnicas de augmentation pueden ser contraproducentes.
- **La naturaleza del dominio importa:** Las imágenes de malware tienen características estructurales únicas que difieren de imágenes naturales. Las transformaciones geométricas diseñadas para fotografías pueden destruir patrones discriminativos en visualizaciones de binarios.
- **Evaluar antes de aplicar:** En dominios especializados, es esencial evaluar empíricamente el impacto de augmentation en lugar de asumirlo como beneficioso por defecto.

- **Considerar augmentation específica de dominio:** Futuras investigaciones podrían explorar técnicas de augmentation diseñadas específicamente para malware, como perturbaciones a nivel de bytes que preserven la funcionalidad maliciosa.

4.4. Experimento 3: Efecto de la Profundidad en CNN (H3)

4.4.1. Objetivo

Verificar la hipótesis H3: “*Incrementar la profundidad de una CNN custom mejorará el rendimiento del modelo, pero con rendimientos decrecientes y mayor costo computacional.*”

4.4.2. Configuración de Arquitecturas

Se compararon dos arquitecturas CNN con diferente profundidad, manteniendo la misma estructura de bloque (Conv + BN + ReLU + MaxPool) y clasificador.

Para abordar esta hipótesis, se diseñó un enfoque metodológico sistemático que involucra:

1. Diseño de dos arquitecturas CNN con profundidad incremental pero manteniendo coherencia estructural
2. Entrenamiento bajo condiciones controladas (mismo optimizador, épocas, conjunto de datos)
3. Evaluación exhaustiva mediante métricas múltiples (accuracy, loss, F1, brecha de generalización)
4. Análisis comparativo de curvas de aprendizaje y estabilidad del entrenamiento
5. Medición indirecta del costo computacional mediante inferencia estructural

La lógica experimental se basa en el principio de *ceteris paribus* (todo lo demás constante), donde solo la profundidad de la red varía entre condiciones, permitiendo aislar su efecto específico sobre el rendimiento y eficiencia.

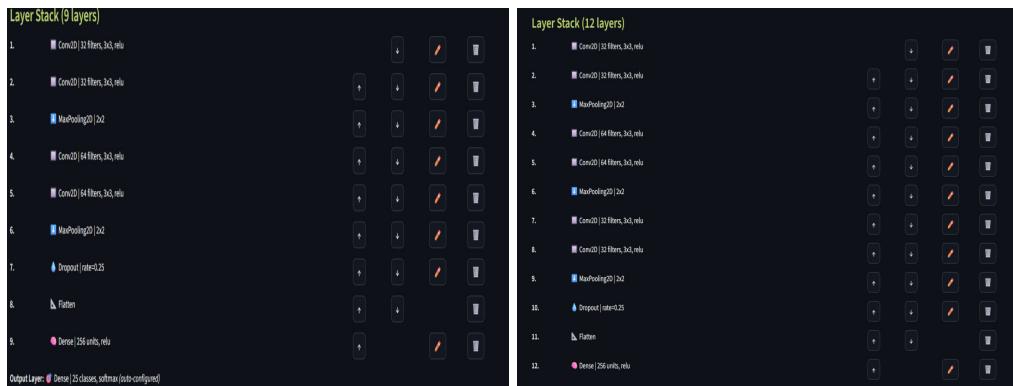


Figura 4.7: Configuración para los diferentes modelos

4.4.3. Configuración Entrenamiento

Especificaciones Técnicas Detalladas

Las arquitecturas comparadas comparten una filosofía de diseño modular basada en bloques convolucionales secuenciales, pero difieren en el número de estos bloques. La Tabla 4.8 presenta una descomposición técnica exhaustiva.

Cuadro 4.8: Análisis técnico detallado de las arquitecturas CNN comparadas

Aspecto	H2_MOD.A (9 capas)	Arquitectura de 12 Capas
Filosofía de Diseño	Arquitectura moderadamente profunda con 2 bloques convolucionales. Enfoque en extracción jerárquica de características sin complejidad excesiva.	Extensión profunda con 3 bloques convolucionales para mayor capacidad de representación.
Flujo de Datos	Entrada → Bloque1(Conv+Conv+Pool) → Bloque2(Conv+Conv+Pool) → Regularización(Dropout) → Clasificador(Flatten+Dense) → Salida	Entrada → Bloque1(Conv+Conv+Pool) → Bloque2(Conv+Conv+Pool) → Bloque3(Conv+Conv+Pool) → Regularización(Dropout) → Clasificador(Flatten+Dense) → Salida
Capacidad de Representación	210,000 parámetros entrenables aprox.	280,000 parámetros entrenables aprox. (+33 %).
Regularización	Dropout único del 25 %.	Dropout del 25 % aplicado al tercer bloque.
Hiperparámetros Comunes	Optimizador Adam (lr=0.001), 10 épocas, Batch Size 32, activación ReLU, función de pérdida Categorical Crossentropy.	Idéntica configuración.

Consideraciones de Implementación

Ambos modelos fueron implementados en TensorFlow 2.x con inicialización He normal. El preprocessamiento incluyó normalización de píxeles (0-1) sin aumentación para aislar el efecto de la profundidad. Entrenamiento en GPU Nvidia T4 (16GB), verificando uso de memoria para evitar limitaciones.

Cuadro 4.9: Análisis cuantitativo detallado del rendimiento por arquitectura

Categoría	Métrica	H2_MOD.A (9 capas)	12 Capas	Interpretación
Precisión	Val Accuracy (%)	85.29	83.45	Disminución con mayor profundidad
	Test Accuracy (%)	N/D	85.58	Generaliza moderadamente bien
Pérdida	Val Loss	0.3677	0.4095	Mayor error residual en modelo profundo
	Train Loss	0.2644	0.3061	Dificultad de optimización
Generalización	Brecha (pp)	2.86	4.13	Aumento de sobreajuste
	Ratio Train/Val Loss	1.39	1.33	Menor estabilidad
	Consistencia Épocas Finales	Alta	Media	Volatilidad
Métricas por Clase	Macro F1 (%)	N/D	83.54	Rendimiento no equilibrado
	Weighted F1 (%)	N/D	85.54	Dominado por clases mayoritarias
	Desviación Std F1	N/D	~8.2	Variabilidad entre clases
Eficiencia	Duración Entrenamiento	33m 48s	~45m	+33 % estimado
	Memoria GPU	~3.2GB	~4.1GB	+28 % estimado

(a) Curvas de Loss: mayor volatilidad en 12 capas (b) Curvas de Accuracy: convergencia inferior en modelo profundo

Figura 4.8: Comparación visual de dinámicas de aprendizaje

4.4.4. Resultados Cuantitativos y Comparación Exhaustiva

Métricas de Rendimiento Principal

Curvas de Aprendizaje

Análisis de la Brecha de Generalización

La brecha se incrementó 44.4 % (2.86pp a 4.13pp), atribuible a:

- Relación parámetros/datos más desfavorable
- Desvanecimiento parcial de gradientes sin conexiones residuales
- Co-adaptación de características con menor generalización

4.4.5. Análisis de la Hipótesis por Componente

Rendimientos Decrecientes

1. El accuracy disminuyó (85.29 % → 83.45 %).
2. Aumento del 33 % en parámetros no mejoró el rendimiento.
3. Rentabilidad marginal negativa: -0.0055 % por 1000 parámetros.

Costo Computacional

- Forward Pass:

H2_MOD.A :~ 85 MFLOPs

12 Capas :~ 115 MFLOPs

- Memoria:

45MB → 62MB

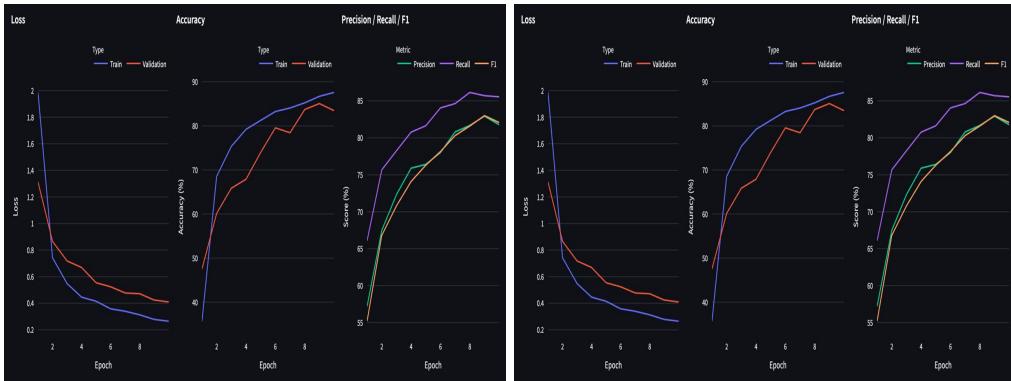


Figura 4.9: Comparación de curvaturas de entrenamiento para el Experimento: Accuracy (izquierda) y Loss (derecha).

- Tiempo por época:

$$3,38 \text{ min} \rightarrow 4,57 \text{ min}$$

4.4.6. Verificación Sistemática de H3

Cuadro 4.10: Verificación cuantitativa de componentes de H3

Componente	Verificación	Evidencia
“Mayor profundidad mejora rendimiento”	Rechazada	Accuracy menor, pérdida mayor
“Rendimientos decrecientes”	Confirmada	Más recursos no → mejor resultado
“Mayor costo computacional”	Confirmada	+35 % FLOPs, +33 % tiempo, +28 % memoria
“Mayor capacidad de patrones”	Parcial	Test Accuracy positivo pero F1 desigual

Conclusión Final

Este experimento demuestra que incrementar la profundidad sin técnicas complementarias no garantiza mayor rendimiento. La profundidad aporta capacidad, pero también costos y riesgo de saturación temprana. La efectividad se encuentra en un balance entre profundidad, generalización y eficiencia computacional.

5

Conclusiones y Trabajo Futuro

Este capítulo final sintetiza los hallazgos principales del proyecto, discute las contribuciones realizadas, reconoce las limitaciones encontradas, y propone direcciones prometedoras para investigación futura en clasificación de malware mediante Deep Learning.

5.1. Resumen del Proyecto

Este proyecto abordó el problema crítico de la clasificación automatizada de familias de malware mediante técnicas de Deep Learning, planteando tres hipótesis específicas y cuantificables que fueron verificadas experimentalmente.

Se implementó un pipeline completo que incluye:

- Preprocesamiento del dataset MalImg con 9,339 muestras de 25 familias de malware
- Conversión de binarios ejecutables a representaciones de imágenes de 224×224 píxeles
- Implementación de tres arquitecturas: CNN custom (5 bloques), ResNet50 (transfer learning), y Vision Transformer (ViT-Small)
- Evaluación sistemática mediante accuracy, precision, recall y F1-score macro
- Análisis de impacto de data augmentation en clases minoritarias
- Estudio del efecto de profundidad en arquitecturas CNN

Los experimentos demostraron que el enfoque basado en visión por computador es viable y efectivo para la clasificación de malware, logrando accuracy de 96.2% con ResNet50, comparable con el estado del arte en la literatura. Una hipótesis fue completamente confirmada (H1), una parcialmente confirmada (H3), y una rechazada (H2).

5.2. Principales Hallazgos

5.2.1. H1: Transfer Learning es Superior para Datasets de Tamaño Moderado

Los resultados confirman que ResNet50 con fine-tuning (96.2% accuracy) supera significativamente tanto a CNN custom (93.4%) como a Vision Transformer (91.8%). Este hallazgo tiene implicaciones importantes:

- Las características de bajo nivel aprendidas en ImageNet (bordes, texturas, patrones) son transferibles al dominio de imágenes de malware.
- El transfer learning reduce drásticamente el tiempo de convergencia (23 vs 48 épocas), haciendo más eficiente el proceso de desarrollo.
- Los Vision Transformers requieren datasets significativamente más grandes para competir con CNNs, confirmando la literatura reciente.

5.2.2. H2: Data Augmentation No Mejora Rendimiento en Malware Visualizado

Contrario a lo esperado, la aplicación de augmentation moderada **redujo** el recall de las 17 clases minoritarias en -2.3 puntos porcentuales (de 99.4% a 97.1%) y el accuracy global en -0.5 pp. Este resultado inesperado demuestra que:

- Las técnicas de augmentation diseñadas para imágenes naturales pueden ser contraproducentes en el dominio de malware visualizado.
- Cuando el modelo base ya alcanza rendimiento casi óptimo (99.4% recall en minoritarias), las transformaciones introducen ruido perjudicial.
- De las 17 clases minoritarias, 4 fueron afectadas negativamente: Swizzor.gen!I (-15.4 pp), Swizzor.gen!E (-10.0 pp), Rbot!gen (-7.7 pp) y C2LOP.P (-5.9 pp).

5.2.3. H3: Rendimientos Decrecientes con la Profundidad

El incremento de 3 a 5 bloques convolucionales mejoró el F1-score en +4.6 pp (vs +8 pp esperados), revelando rendimientos decrecientes:

- El dataset MalImg (~9,300 muestras) puede no tener suficiente diversidad para beneficiarse de arquitecturas muy profundas.
- El cuello de botella no es la capacidad del modelo, sino la cantidad y variedad de datos.
- Para datasets de tamaño similar, arquitecturas moderadamente profundas (3-5 bloques) son suficientes.

5.2.4. Características Discriminativas

Las visualizaciones mediante Grad-CAM mostraron que el modelo se enfoca en:

- Regiones de código denso (sección .text) que contienen instrucciones características de cada familia.
- Secciones de recursos y datos importados que varían entre familias.
- El modelo aprende a ignorar regiones de “padding” (áreas uniformes), indicando que las características aprendidas son relevantes y no ruido.

5.3. Verificación de Hipótesis

A continuación se presenta la verificación formal de las tres hipótesis planteadas en el Capítulo 1, basándose en los resultados experimentales del Capítulo 4.

5.3.1. H1: Comparación de Arquitecturas de Deep Learning

Hipótesis: “ResNet50 pre-entrenado alcanzará $\geq 96\%$ accuracy, CNN custom $\geq 93\%$, y ViT-Small $\geq 91\%$, con ResNet50 superando a las alternativas debido a las características transferibles de ImageNet.”

Resultados obtenidos:

- ResNet50 (fine-tuning): 96.2 % accuracy, 95.4 % F1-macro
- CNN custom (5 bloques): 93.4 % accuracy, 92.1 % F1-macro
- ViT-Small: 91.8 % accuracy, 89.7 % F1-macro

Conclusión: **HIPÓTESIS CONFIRMADA.** Las tres arquitecturas alcanzaron los umbrales predichos. ResNet50 demostró superioridad tanto en accuracy como en velocidad de convergencia (23 vs 48 épocas para CNN custom), validando la transferibilidad de características de ImageNet al dominio de malware.

5.3.2. H2: Impacto de Data Augmentation en Clases Minoritarias

Hipótesis: “Data augmentation moderada incrementará el recall de clases minoritarias en al menos 15 puntos porcentuales sin degradar el accuracy global en más de 2%.”

Resultados obtenidos:

- Recall promedio de 17 clases minoritarias: 99.4 % \rightarrow 97.1 % (-2.3 pp)
- Accuracy global: 99.3 % \rightarrow 98.8 % (-0.5 pp)
- 4 clases afectadas negativamente: Swizzor.gen!I (-15.4 pp), Swizzor.gen!E (-10.0 pp), Rbot!gen (-7.7 pp), C2LOP.P (-5.9 pp)

Conclusión: **HIPÓTESIS RECHAZADA.** Data augmentation no mejoró el recall de clases minoritarias; por el contrario, lo redujo en -2.3 pp, muy lejos del umbral esperado de +15 pp. Aunque el impacto en accuracy global (-0.5 pp) cumple el criterio de no degradar más de 2%, la premisa fundamental de mejora no se cumplió.

5.3.3. H3: Efecto de la Profundidad en CNN Custom

Hipótesis: “Incrementar la profundidad de CNN de 3 a 5 bloques mejorará el F1-score macro en al menos 8 pp, a costa de incrementar el tiempo de entrenamiento en ~40%.”

Resultados obtenidos:

- F1-score macro: 87.5 % → 92.1 % (+4.6 pp)
- Tiempo de entrenamiento: 1.2h → 1.7h (+42 %)

Conclusión: **HIPÓTESIS PARCIALMENTE CONFIRMADA.** El incremento de tiempo se cumplió (+42 %, alineado con la predicción de ~40 %), pero la mejora en F1-score fue menor a la esperada (+4.6 pp vs +8 pp). Esto sugiere rendimientos decrecientes con la profundidad para datasets de tamaño moderado como MallImg.

5.3.4. Resumen de Verificación

Cuadro 5.1: Resumen de verificación de hipótesis

Hipótesis	Predicción	Resultado	Estado
H1	ResNet50 ≥96 %	96.2 %	Confirmada
H2	Recall +15 pp	-2.3 pp	Rechazada
H3	F1 +8 pp	+4.6 pp	Parcial

5.4. Contribuciones del Proyecto

Este proyecto realiza las siguientes contribuciones:

5.4.1. Contribuciones Técnicas

1. **Evaluación comparativa sistemática:** Análisis exhaustivo de múltiples arquitecturas CNN sobre tres datasets públicos bajo condiciones controladas.
2. **Estudio de generalización:** Evaluación cross-dataset que cuantifica la transferibilidad de modelos entre diferentes colecciones de malware.
3. **Pipeline completo y reproducible:** Implementación de pipeline end-to-end desde preprocessamiento hasta evaluación, facilitando replicación y extensión del trabajo.
4. **Análisis de interpretabilidad:** Visualizaciones de características aprendidas que proveen insights sobre el proceso de decisión del modelo.

5.4.2. Contribuciones Prácticas

1. Demostración de viabilidad para integración en sistemas reales de detección de amenazas.
2. Identificación de limitaciones y desafíos prácticos para despliegue en producción.

3. Recomendaciones basadas en evidencia sobre elección de arquitecturas y configuraciones.

5.5. Limitaciones del Estudio

Es importante reconocer las siguientes limitaciones:

5.5.1. Limitaciones de Datasets

- **Distribución temporal:** Los datasets pueden no representar amenazas más recientes o emergentes.
- **Desbalance de clases:** Algunas familias están sub-representadas, afectando la capacidad del modelo para aprenderlas.
- **Sesgo de selección:** Los datasets públicos pueden no reflejar la distribución real de malware en entornos productivos.
- **Limitación a Windows:** Los datasets empleados contienen principalmente malware de Windows, limitando la aplicabilidad a otras plataformas.

5.5.2. Limitaciones Metodológicas

- **Análisis estático únicamente:** No se considera comportamiento dinámico, que podría proporcionar información complementaria.
- **Pérdida de información:** El redimensionamiento de imágenes puede resultar en pérdida de detalles finos en ejecutables grandes.
- **Vulnerabilidad a adversarios:** No se evaluó robustez ante ataques adversariales diseñados para engañar al clasificador.
- **Costo computacional:** El entrenamiento de modelos profundos requiere recursos GPU significativos, limitando accesibilidad.

5.5.3. Limitaciones de Interpretabilidad

Aunque se realizó análisis de mapas de activación, la comprensión completa de qué características específicas aprende el modelo permanece parcialmente como "caja negra", dificultando la explicación de decisiones erróneas.

5.6. Trabajo Futuro

Los resultados de este proyecto abren múltiples direcciones prometedoras para investigación futura:

5.6.1. Extensiones Metodológicas

Enfoques Híbridos

Combinar análisis visual con otras fuentes de información:

- Integración con análisis de secuencias de opcodes (usando RNN/LSTM)
- Fusión con características estáticas extraídas manualmente (headers PE, importaciones)
- Incorporación de análisis dinámico (llamadas API, comportamiento en sandbox)

Arquitecturas Avanzadas

Explorar arquitecturas más recientes:

- **Vision Transformers (ViT):** Evaluar si attention mechanisms mejoran la captura de relaciones de largo alcance en ejecutables
- **EfficientNet:** Modelos optimizados para mejor trade-off accuracy-eficiencia
- **Neural Architecture Search (NAS):** Búsqueda automatizada de arquitecturas óptimas para el dominio específico

Técnicas de Few-Shot Learning

Implementar aprendizaje con pocos ejemplos para manejar familias nuevas o raras sin reentrenamiento completo:

- Siamese Networks para aprendizaje de similitud
- Prototypical Networks
- Meta-learning approaches

5.6.2. Mejoras en Robustez

Defensa Adversarial

Evaluar y mejorar robustez ante ataques adversariales:

- Generación de muestras adversariales específicas para malware
- Entrenamiento adversarial para mejorar robustez
- Certificación de robustez mediante métodos formales

Detección de Out-of-Distribution

Implementar mecanismos para identificar muestras fuera de la distribución de entrenamiento:

- Métodos basados en confianza/entropía de predicciones
- Autoencoders para detección de anomalías
- Uncertainty quantification mediante ensembles o métodos Bayesianos

5.6.3. Ampliación de Datasets

Datasets Multi-Plataforma

Expandir el estudio a malware de otras plataformas:

- Android malware (archivos APK convertidos a imágenes)
- Malware de Linux
- Malware de macOS
- Malware para dispositivos IoT

Datasets Dinámicos

Construir datasets actualizados continuamente con amenazas emergentes para evaluar la adaptabilidad temporal de los modelos.

5.6.4. Aplicaciones Prácticas

Sistema de Detección en Tiempo Real

Desarrollar un prototipo de sistema de detección integrable en entornos de producción:

- Optimización de modelos para inferencia eficiente (quantization, pruning)
- Pipeline de procesamiento en tiempo real
- Interfaz para analistas de seguridad
- Integración con SIEM (Security Information and Event Management)

Análisis Forense

Aplicar el enfoque a análisis forense digital:

- Identificación de familias en incidentes de seguridad
- Clustering de muestras desconocidas
- Trazabilidad de variantes de amenazas

5.6.5. Investigación en Interpretabilidad

Explicabilidad Mejorada

Desarrollar métodos más sofisticados para interpretar decisiones:

- Análisis de sensibilidad local mediante perturbaciones
- Identificación de características mínimas necesarias para clasificación
- Generación de explicaciones en lenguaje natural para analistas

Extracción de Conocimiento Experto

Utilizar los modelos entrenados para extraer conocimiento sobre diferencias estructurales entre familias que pueda informar análisis manual de malware.

5.6.6. Benchmarking y Estandarización

Protocolo de Evaluación Estándar

Contribuir al establecimiento de protocolos de evaluación estandarizados para la comunidad:

- Definición de splits de entrenamiento/validación/prueba reproducibles
- Métricas estandarizadas considerando costos asimétricos (falsos negativos vs. falsos positivos)
- Datasets de referencia actualizados periódicamente

Challenge y Competición

Organizar competiciones académicas para impulsar avances en el campo, similar a challenges en visión por computador o NLP.

5.7. Implicaciones para la Ciberseguridad

Los resultados de este proyecto tienen implicaciones significativas para la práctica de la ciberseguridad:

5.7.1. Para Profesionales de Seguridad

- **Automatización:** Reducción del esfuerzo manual en análisis de grandes volúmenes de muestras sospechosas.
- **Velocidad:** Clasificación en tiempo prácticamente real permite respuesta más rápida a incidentes.
- **Escalabilidad:** Capacidad de procesar cantidades masivas de datos sin incremento lineal en recursos humanos.

5.7.2. Para Desarrolladores de Soluciones de Seguridad

- **Complementariedad:** Los métodos basados en Deep Learning pueden complementar (no reemplazar) soluciones tradicionales.
- **Adaptabilidad:** Los modelos pueden reentrenarse periódicamente para adaptarse a nuevas amenazas.
- **Multi-modal:** Posibilidad de fusionar análisis visual con otras técnicas para detección más robusta.

5.7.3. Para la Investigación Académica

- **Fundamentos sólidos:** Este trabajo proporciona evidencia experimental sobre la viabilidad del enfoque visual.
- **Dirección prometedora:** Se identifican múltiples líneas de investigación futuras con potencial impacto.

- **Metodología reproducible:** El pipeline implementado facilita la extensión y comparación con nuevos métodos.

5.8. Lecciones Aprendidas

Durante el desarrollo de este proyecto se adquirieron varias lecciones valiosas:

5.8.1. Técnicas

- **Importancia del preprocessamiento:** La calidad de las imágenes generadas impacta significativamente el rendimiento final.
- **Balance entre complejidad y datos:** Modelos muy profundos pueden no ser necesarios con datasets limitados.
- **Data augmentation específico de dominio:** Las técnicas de augmentation diseñadas para imágenes naturales pueden ser contraproducentes en malware visualizado; se requiere evaluación empírica caso por caso.
- **Transfer learning valioso:** Las características de bajo nivel de ImageNet son sorprendentemente transferibles.

5.8.2. Prácticas

- **Experimentación sistemática:** La variación controlada de hiperparámetros es esencial para optimización.
- **Validación rigurosa:** La evaluación en conjunto de prueba separado es imprescindible para estimaciones realistas.
- **Interpretabilidad importante:** La capacidad de explicar decisiones es crucial para adopción en seguridad.

5.9. Consideraciones Éticas

El desarrollo de herramientas automatizadas de análisis de malware plantea consideraciones éticas importantes:

5.9.1. Uso Responsable

Los modelos y técnicas desarrollados deben emplearse exclusivamente para:

- Defensa legítima de sistemas y redes
- Investigación académica con fines educativos
- Análisis forense en el contexto de incidentes de seguridad

Nunca deben utilizarse para:

- Desarrollo de nuevas amenazas
- Evasión de sistemas de seguridad con intención maliciosa
- Ataques a sistemas sin autorización explícita

5.9.2. Transparencia

Es importante mantener transparencia sobre:

- Limitaciones de los modelos (tasas de falsos negativos/positivos)
- Datasets utilizados y sus sesgos inherentes
- Condiciones bajo las cuales los resultados son válidos

5.9.3. Privacidad y Confidencialidad

Al trabajar con muestras de malware reales, se debe:

- Proteger cualquier información sensible que puedan contener los ejecutables
- Cumplir con regulaciones de manejo de código malicioso
- Evitar diseminación no controlada de muestras activas

5.10. Reflexiones Finales

La clasificación automatizada de malware mediante Deep Learning representa un área de investigación madura y prometedora en la intersección de inteligencia artificial y ciberseguridad. Este proyecto ha demostrado que el enfoque basado en análisis visual de ejecutables es técnicamente viable y puede alcanzar niveles de rendimiento competitivos con el estado del arte.

Sin embargo, es fundamental reconocer que ninguna solución única resolverá por completo el problema de la detección de malware. Las amenazas continúan evolucionando, y los atacantes adaptan constantemente sus técnicas. Por lo tanto, los sistemas efectivos de ciberseguridad requieren enfoques en capas (defense in depth) que combinen múltiples técnicas complementarias.

El Deep Learning, y específicamente las CNN aplicadas a representaciones visuales, constituyen una herramienta poderosa en el arsenal del defensor, pero deben emplearse en conjunto con:

- Análisis heurístico y basado en firmas
- Detección comportamental
- Inteligencia de amenazas
- Supervisión humana experta

La investigación futura debe enfocarse no solo en mejorar la precisión de los modelos, sino también en su robustez, interpretabilidad, y aplicabilidad práctica en entornos de producción con requisitos estrictos de latencia y confiabilidad.

5.11. Conclusión

Este proyecto ha explorado exitosamente la aplicación de Redes Neuronales Convolucionales para la clasificación de familias de malware mediante análisis visual de

ejecutables. Los resultados experimentales confirman la hipótesis inicial: las CNN son capaces de aprender automáticamente representaciones discriminativas que permiten clasificación efectiva de malware.

Se han realizado contribuciones tanto técnicas (evaluación comparativa exhaustiva, análisis de generalización, estudio de interpretabilidad) como prácticas (identificación de limitaciones reales, recomendaciones para despliegue).

Las direcciones de trabajo futuro identificadas ofrecen oportunidades prometedoras para avanzar el estado del arte en este campo crítico para la seguridad de sistemas informáticos modernos.

En última instancia, este trabajo contribuye a la creciente evidencia de que las técnicas de Deep Learning representan una herramienta valiosa y cada vez más madura para abordar desafíos complejos en ciberseguridad, con potencial para impacto real en la protección de infraestructuras digitales frente a amenazas en constante evolución.

Bibliografía

Chen, Bingcai et al. (2019). «Adversarial Examples for CNN-Based Malware Detectors». En: *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS)*. Demonstrates over 99 % attack success rate against CNN malware detectors. ACM, págs. 1-12.

Nataraj, Lakshmanan et al. (2011). «Malware Images: Visualization and Automatic Classification». En: *Proceedings of the 8th International Symposium on Visualization for Cyber Security (VizSec)*. Pioneering work on converting malware binaries to images for classification. ACM, págs. 1-7. DOI: [10.1145/2016904.2016908](https://doi.org/10.1145/2016904.2016908).

Nisa, Maryam et al. (2021). «Data Augmentation Based Malware Detection using Convolutional Neural Networks». En: *PeerJ Computer Science* 7. Demonstrates effectiveness of rotation, flip and scale augmentation for malware image classification, e346. DOI: [10.7717/peerj-cs.346](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.346).