

Procesamiento Digital de Imágenes: Un Manual Exhaustivo de Técnicas, Aplicaciones y la Revolución del Deep Learning

1. Fundamentos del Dominio Visual Digital

1.1. Definición y Objetivos del PDI: Más allá de "Mejorar" Imágenes

El Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) se define formalmente como el conjunto de técnicas y procesos computacionales aplicados a imágenes digitales con el fin de descubrir, resaltar o extraer información contenida en ellas.¹ En esencia, implica la manipulación de señales bidimensionales (imágenes) mediante algoritmos ejecutados en una computadora.³ Los objetivos del PDI son multifacéticos y van mucho más allá de la simple mejora estética. Se pueden clasificar en tres categorías fundamentales: restauración y reconstrucción de imágenes, reconocimiento de patrones e interpretación física.¹

Esto revela una dualidad central en el campo del PDI: sirve a dos propósitos distintos que pueden ser, a veces, contradictorios. Por un lado, el PDI busca la mejora subjetiva para la percepción humana. Como se ha señalado, "hacer que una imagen luzca mejor es un proceso puramente subjetivo".¹ Este es el caso de un radiólogo que necesita un mayor contraste en una resonancia magnética para facilitar el diagnóstico visual.⁴

Por otro lado, el PDI sirve como un preprocesamiento fundamental para el análisis maquinal, donde el objetivo es cuantitativo, no subjetivo. El reconocimiento de patrones o la extracción de información⁵ no requiere que una imagen "luzca mejor" para un ojo humano, sino que sus características sean matemáticamente más separables y robustas para un algoritmo. Por lo tanto, el PDI actúa como el puente entre la información visual cruda y dos tipos de consumidores: el observador humano y el algoritmo de visión por computadora.

1.2. Anatomía de una Imagen Digital: Píxeles, Espacios de Color e Intensidad

La unidad fundamental de cualquier imagen digital es el *píxel* (contracción de *picture element*).⁶ Una imagen digital no es una entidad continua, sino una representación discreta: una matriz bidimensional donde cada celda (píxel) tiene un valor (o un conjunto de valores) que representa su intensidad y color.⁷

La calidad y el contenido de esta representación se definen por varios factores clave:

- **Dimensiones de Píxeles (Resolución):** El número de píxeles en la matriz (ancho x alto). Una mayor resolución permite una "mejor definición de los detalles"⁸, pero a costa de un mayor tamaño de archivo.
- **Profundidad de Color (Profundidad de bits):** La cantidad de información almacenada en cada píxel.⁹ Una imagen binaria (blanco y negro) requiere 1 bit por píxel. Una imagen en escala de grises de 8 bits puede representar 256 niveles de intensidad. Una imagen a color "True Color" de 24 bits utiliza 8 bits para cada uno de los tres canales (Rojo, Verde, Azul), permitiendo millones de colores.
- **Relaciones de Píxeles:** Ningún píxel existe en el vacío. Las operaciones de PDI dependen de las "relaciones básicas entre pixels"⁷, como la adyacencia (vecinos de 4 u 8 píxeles), que forman la base de casi todas las operaciones espaciales.

Esta estructura digital introduce un compromiso fundamental: "Calidad vs. tamaño de archivo".⁹ Las imágenes de alta resolución y gran profundidad de color contienen una inmensa cantidad de datos, lo que exige el uso de técnicas de PDI como la *compresión*⁹ para su almacenamiento y transmisión eficientes.

1.3. La Herramienta de Diagnóstico Esencial: El Histograma

El histograma de una imagen es una gráfica que representa la distribución de las intensidades de los píxeles. Es quizás la herramienta de diagnóstico más importante en el PDI.

Un histograma revela el carácter de una imagen: una imagen oscura tendrá su histograma agrupado en el extremo inferior (negros); una imagen de bajo contraste tendrá su histograma agrupado en una banda estrecha. Su forma (unimodal, bimodal, etc.) es un indicador crítico que dicta la estrategia de procesamiento más adecuada.¹¹ Es la base para técnicas de realce fundamentales como la "corrección del histograma"¹³ y la "ecualización de histograma".¹⁴

1.4. Delimitación de Disciplinas: PDI vs. Visión por Computadora vs. Inteligencia Artificial

Estos tres términos a menudo se usan indistintamente, pero representan conceptos distintos, aunque profundamente interconectados:

- **Procesamiento Digital de Imágenes (PDI):** Es el proceso. La entrada de un algoritmo de PDI es una imagen, y su salida es, típicamente, otra *imagen*.¹⁵ Los ejemplos incluyen

- la aplicación de un filtro, la mejora del contraste o la restauración de ruido.¹⁵
- **Visión por Computadora (CV):** Es el objetivo. La entrada de un sistema de CV es una imagen, y su salida es *información, comprensión* o una *decisión*.¹⁶ Su meta es "EXTRAER INFORMACIÓN".⁵ La CV *utiliza* el PDI como un paso (a menudo el primero) para lograr el "reconocimiento y análisis automático" de una escena.¹⁵
- **Inteligencia Artificial (IA) / Deep Learning (DL):** Es el *método*. La IA, y específicamente su subcampo del Deep Learning, es un conjunto de técnicas estadísticas¹⁸ que ha demostrado ser la herramienta más poderosa para ejecutar tareas tanto de PDI (p. ej., eliminación de ruido avanzada¹⁹) como de CV (p. ej., clasificación de objetos²⁰).

Históricamente, el PDI era un conjunto de pre-requisitos deterministas (filtros manuales) que alimentaban a un sistema de CV. Sin embargo, el auge del Deep Learning ha fusionado estas disciplinas. Las "Técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el procesamiento de imágenes"²¹ son ahora comunes. El PDI ya no es solo un conjunto de operaciones manuales y deterministas¹⁸; ahora incluye modelos estadísticos¹⁸ que *aprenden* a procesar imágenes de maneras óptimas. La IA no solo *consume* el PDI, sino que se ha *convertido* en la forma más avanzada de PDI.⁶

2. Técnicas Clásicas de PDI: El Dominio Espacial

Las técnicas del dominio espacial operan directamente sobre los valores de los píxeles de la imagen.

2.1. Realce y Preprocesamiento: Transformaciones Puntuales y Contraste

La categoría más simple de operación de PDI es la "Transformaciones punto-a-punto".¹³ En esta operación, el nuevo valor de un píxel se calcula basándose *únicamente* en su propio valor original, sin considerar a sus vecinos. La aplicación más común es el "Aumento de Contraste"¹³, que re-escalas las intensidades de los píxeles para que ocupen un rango dinámico más amplio, haciendo que los detalles oscuros sean más oscuros y los claros más claros.²²

2.2. Ecualización del Histograma: Optimización del Rango Dinámico

La ecualización del histograma es la transformación puntual más avanzada. Su objetivo es redistribuir las intensidades de los píxeles para que el histograma de la imagen resultante sea lo más plano posible (uniforme).

Matemáticamente, esto se logra utilizando la Función de Distribución Acumulada (CDF) del histograma original como la función de transformación.¹² Es "particularmente útil con imágenes de rango dinámico reducido" (es decir, imágenes de bajo contraste)¹², ya que expande las intensidades más frecuentes para cubrir todo el rango disponible. Sin embargo, esta técnica tiene una contrapartida. Aunque "ha mejorado el contraste" general, puede hacerlo a expensas de la variedad en los niveles de gris medios, haciendo que la imagen resultante parezca "más artificial".¹⁴ Esto subraya de nuevo la naturaleza subjetiva de la "mejora" de la imagen.

2.3. Filtrado Espacial y Convolución

El filtrado espacial avanza más allá de las operaciones puntuales al considerar el *vecindario* de un píxel. El valor de un píxel de salida se determina mediante una operación que involucra a sus píxeles vecinos.

La herramienta central para esto es la **convolución**. Un filtro se define como un "núcleo o máscara de convolución"²³, que es una pequeña matriz de pesos (p. ej., 3x3). Esta máscara se desliza sobre cada píxel de la imagen de entrada, y el valor del píxel de salida se calcula como la suma ponderada de sus vecinos, según los pesos de la máscara.⁷

Estos filtros se dividen en dos familias principales:

1. **Filtros Lineales:** Realizan una suma ponderada, como el filtro de media o el filtro Gaussiano.²³ El "operador de suavizado más simple es la convolución de media".²⁴
2. **Filtros No Lineales:** El valor de salida se basa en los vecinos, pero no mediante una suma ponderada. El ejemplo más famoso es el filtro de mediana.²³

2.4. Consejo Práctico: Comparativa de Filtros de Suavizado: Media vs. Mediana vs. Gaussiano

Un objetivo común del PDI es el "suavizado" (eliminación de ruido) mediante filtros de paso bajo. La elección del filtro adecuado es un consejo práctico fundamental.

- **Filtro de Media:** Reemplaza cada píxel por el promedio aritmético de su ventana de vecinos.²⁵ Es rápido, pero tiene un inconveniente significativo: tiende a crear un "efecto borroso" que degrada los bordes y detalles nítidos.²⁵
- **Filtro de Mediana:** Reemplaza cada píxel por el valor *mediano* (el valor central) de su ventana de vecinos después de ordenarlos.²⁵ Como filtro no lineal, "reduce el efecto borroso"²⁵ y es excepcionalmente eficaz contra el "ruido impulsivo" (conocido como "ruido de sal y pimienta").²⁷
- **Filtro Gaussiano:** Es un filtro lineal más sofisticado que el de media. Es una convolución de media ponderada donde los pesos "Simulan una distribución gaussiana".²⁵ Los píxeles centrales en la ventana tienen más peso que los lejanos, lo que

resulta en un desenfoque más "natural" y controlable.

La elección del filtro es, en realidad, una elección implícita sobre el modelo de ruido que se está combatiendo. El ruido en los sensores de las cámaras a menudo sigue una distribución gaussiana²⁸, resultado de la suma de muchas pequeñas fuentes de error (un análogo del Teorema del Límite Central). Para este tipo de ruido, el filtro Gaussiano²⁵ es un atenuador lineal óptimo.

Sin embargo, el "ruido impulsivo"²⁷ no es Gaussiano; son errores abruptos, o *outliers*, que aparecen como píxeles blancos o negros aleatorios. Aquí, el modelo Gaussiano falla. El filtro de Mediana²⁵, al ser no lineal, es robusto a estos *outliers*. Al ordenar los valores de los píxeles de la ventana, los valores extremos (sal y pimienta) simplemente se mueven a los extremos de la lista y no son seleccionados como la mediana, preservando la estructura de la imagen de manera mucho más efectiva.

Tabla 2.1: Comparativa de Filtros de Suavizado (Paso Bajo)

Tipo de Filtro	Metodología	Tipo de Ruido Ideal	Ventaja/Desventaja Clave
Media	Promedio aritmético (Lineal) ²⁵	Ruido Gaussiano leve	Rápido, pero causa "efecto borroso" y desenfoca bordes ²⁵
Mediana	Valor mediano (No Lineal) ²⁵	Ruido Impulsivo (Sal y Pimienta) ²⁷	Preserva mejor los bordes ²⁵ , más lento computacionalmente
Gaussiano	Promedio ponderado (Lineal) ²⁵	Ruido Gaussiano ²⁸	Desenfoque controlable y "natural", más eficaz que la media ²⁵

3. Técnicas Clásicas de PDI: El Dominio de la Frecuencia

Este paradigma de PDI implica transformar la imagen del dominio espacial (píxeles) al dominio de la frecuencia, realizar operaciones allí y luego transformarla de nuevo.

3.1. La Transformada de Fourier: Interpretando la Imagen a través de sus Frecuencias

El "Filtrado Frecuencial"⁷ se basa en la Transformada de Fourier. Este teorema fundamental postula que cualquier señal (incluida una imagen) puede descomponerse en una suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias y amplitudes.

En el PDI, esto significa que una imagen puede ser representada por sus componentes de frecuencia:

- **Bajas Frecuencias:** Corresponden a cambios lentos y suaves (áreas de color uniforme, fondos).
- **Altas Frecuencias:** Corresponden a cambios rápidos y abruptos (bordes, detalles finos, ruido).

Aplicando la "transformada rápida de Fourier" (FFT)¹, la imagen se convierte en un espectro de frecuencia. Un consejo práctico vital al visualizar este espectro es usar una escala logarítmica.³⁰ Esto se debe a que la magnitud de los componentes de baja frecuencia (el centro de la imagen de frecuencia) es exponencialmente mayor que la de los componentes de alta frecuencia; en una escala lineal, "el contraste es muchísimo" y los detalles de alta frecuencia serían invisibles.³⁰

Una vez en el dominio de la frecuencia, se pueden realizar filtros simplemente multiplicando (o enmascarando) áreas: eliminar las altas frecuencias (filtro paso bajo) suaviza la imagen, mientras que eliminar las bajas frecuencias (filtro paso alto) realza los bordes.

3.2. La Transformada de Coseno Discreta (DCT): La Piedra Angular de la Compresión JPEG

Una "variación de la transformada discreta de Fourier"³¹, la Transformada de Coseno Discreta (DCT) es una de las técnicas de PDI más impactantes jamás desarrolladas. Es "la herramienta clave en el estándar de compresión JPEG".³¹

La compresión JPEG es una aplicación magistral del PDI optimizada para la biología humana. La DCT se utiliza en "compresión con pérdida"³², lo que significa que se descarta información para reducir el tamaño del archivo.⁹ La DCT es excelente para "descorrelacionar" los datos de la imagen, concentrando la mayor parte de la energía visual en unos pocos coeficientes (baja frecuencia).

El algoritmo JPEG utiliza esta propiedad para "eliminar redundancia psicovisual".³² El sistema visual humano es mucho más sensible a los cambios de *brillo* (luminancia) que a los cambios de *color* (crominancia) o a los detalles de altísima frecuencia.³³ JPEG explota esto: aplica una cuantificación agresiva (descartando precisión) a los coeficientes de alta frecuencia y de color, mientras preserva los coeficientes de baja frecuencia y luminancia. El resultado es una reducción masiva del tamaño del archivo con una pérdida de calidad que es, para el ojo humano, casi imperceptible. Es la solución de ingeniería óptima al compromiso de "Calidad vs. tamaño de archivo".⁹

4. Morfología Matemática: El Álgebra de las Formas

La morfología matemática es un paradigma de PDI completamente diferente, basado en la "teoría de conjuntos" y la geometría, en lugar de la aritmética de la convolución.³⁴ Utiliza una forma predefinida llamada "elemento estructural" (EE) —como un pequeño disco o un cuadrado— para probar, sondear y modificar la geometría de los objetos en una imagen.³⁵

4.1. Operaciones Fundamentales: Erosión y Dilatación

Las dos operaciones base de la morfología son:

- **Erosión ($A \setminus B$):** Define la operación como el conjunto de todos los píxeles donde el EE, centrado en ese píxel, *cabe completamente* dentro del objeto de primer plano.³⁵ El efecto visual es "reducir la imagen" o encoger los objetos.³⁵
- **Dilatación ($A \oplus B$):** Define la operación como el conjunto de todos los píxeles donde el EE, centrado en ese píxel, *toca* (interseca) al menos un píxel del objeto.³⁵ El efecto visual es "expandir la imagen" o engrosar los objetos.³⁵

4.2. Operaciones Compuestas y sus Usos: Apertura (Opening) y Cierre (Closing)

La verdadera potencia de la morfología proviene de la secuenciación de estas operaciones:

- **Apertura (Opening):** Se define como una Erosión *seguida* de una Dilatación, usando el mismo EE.³⁵ La erosión inicial elimina cualquier objeto o protuberancia más pequeña que el EE. La dilatación posterior restaura el tamaño de los objetos más grandes que sobrevivieron. El efecto neto es "suavizar los contornos", "romper uniones estrechas" y eliminar pequeños puntos de ruido (tipo "pimienta").³⁵
- **Cierre (Closing):** Se define como una Dilatación *seguida* de una Erosión.³⁵ La dilatación inicial rellena pequeños agujeros y conecta brechas estrechas. La erosión posterior restaura el tamaño de los objetos. El efecto neto es "unir separaciones estrechas", "eliminar golfos estrechos" y "eliminar huecos" (tipo "sal").³⁵

Combinadas, la apertura y el cierre son un filtro no lineal extremadamente potente para la "eliminación de ruido tipo sal y pimienta".³⁵ A diferencia de la convolución (que es aritmética), la morfología es geométrica. No calcula promedios; responde a preguntas lógicas ("¿Encaja? ¿Toca?"). Esto la convierte en la herramienta superior para el análisis de *formas*, la extracción de esqueletos y la limpieza de imágenes binarias, como las producidas por la segmentación por umbral.³⁵

5. Segmentación: La Tarea Crítica de Aislamiento

5.1. El Objetivo: Particionar la Imagen para la Comprensión

La segmentación es posiblemente la tarea más crítica en el PDI y la Visión por Computadora. Se define como el proceso que "subdivide una imagen en sus partes constituyentes u objetos, con el fin de separar las partes de interés del resto de la imagen".³⁷ Es el acto de trazar límites.

Las tres técnicas clásicas para la segmentación son la umbralización, la detección de bordes y el crecimiento de regiones.³⁷

5.2. Técnica 1: Umbralización (Thresholding)

La umbralización es el método de segmentación más simple. Su objetivo es "convertir una imagen en escala de grises a una nueva con sólo dos niveles" (una imagen binaria).¹¹

- **Cómo Funciona:** Se selecciona un valor de intensidad (el "umbral", T). Cada píxel de la imagen se compara con T . Si $\text{viejo_píxel} > T$, el píxel se asigna al "primer plano" (objeto), típicamente con un valor de MAX (blanco). De lo contrario, se asigna al "fondo" (MIN, negro).¹¹
- **Cuándo Aplicar:** Es más útil cuando la imagen tiene un alto contraste entre el objeto y el fondo. En un escenario ideal, esto produce un "histograma bimodal" (dos picos distintos).¹¹ El umbral T se puede seleccionar manualmente en el valle entre los dos picos para una "separación perfecta".¹¹
- **Técnicas Avanzadas:** En lugar de elegir T manualmente, se pueden usar algoritmos. El "Método de Otsu" es un enfoque estadístico popular que encuentra automáticamente el umbral óptimo que minimiza la varianza intra-clase (haciendo que los píxeles de "fondo" y "objeto" sean lo más homogéneos posible internamente).⁴⁰

5.3. Técnica 2: Detección de Bordes

Este enfoque define los objetos encontrando sus límites, que se manifiestan como "discontinuidades en la intensidad".⁴¹

5.3.1. Operadores de Gradiente: Sobel

El operador de Sobel es uno de los detectores de bordes "más comúnmente usados".⁴² Es un método "simple basada en gradientes".⁴⁰ Funciona aplicando dos núcleos de convolución: uno que mide el gradiente (cambio de intensidad) en la dirección horizontal y otro que lo mide en la dirección vertical.²⁵ La magnitud combinada de estos dos gradientes da la "fuerza" del borde en ese píxel.

5.3.2. El Algoritmo Canny: El Estándar de Oro

El detector de bordes Canny no es un simple operador; es un "proceso de varias etapas"⁴⁰ que mejora drásticamente los resultados de Sobel.⁴³ Sus pasos son:

1. **Suavizado de Ruido:** El primer paso es aplicar un filtro Gaussiano (ver Sección 2.4) para eliminar el ruido, que de otro modo sería detectado falsamente como un borde.⁴³
2. **Cálculo del Gradiente:** Se utiliza el operador Sobel (ver 5.3.1) para encontrar la magnitud y dirección del gradiente en cada píxel.⁴³
3. **Supresión de No-Máximos:** Este paso crucial *adelgaza* los bordes. Revisa los píxeles a lo largo de la dirección del gradiente y suprime (pone a cero) cualquier píxel que no sea un máximo local. Esto da como resultado "thinner, more precise edges".⁴⁴
4. **Umbralización por Histéresis:** En lugar de un solo umbral, Canny utiliza un "Double threshold method" (un umbral alto y uno bajo).⁴⁴ Los píxeles por encima del umbral alto se consideran bordes "fuertes". Los píxeles por debajo del umbral bajo se descartan. Los píxeles "débiles" (entre los dos umbrales) se mantienen *solo si* están conectados a un borde "fuerte". Este "Edge tracking by hysteresis" conecta los bordes en contornos continuos.⁴³

5.3.3. Consejo Práctico: Cuándo usar Canny vs. Sobel

Para casi todas las aplicaciones serias, Canny es la opción superior.¹³⁰ lo resume: "Canny is built on top of Sobel operator... I would say Canny."

El operador Sobel es adecuado para "basic edge detection tasks" (tareas básicas), pero es "More sensitive to noise" (más sensible al ruido) y produce "thicker edges" (bordes gruesos).⁴⁴ El algoritmo Canny es adecuado para "applications requiring high precision" (aplicaciones que requieren alta precisión) porque es "Less sensitive due to initial Gaussian smoothing" (menos sensible debido al suavizado Gaussiano inicial) e implementa un seguimiento de bordes para asegurar la conectividad.⁴⁴

Estas técnicas revelan una dualidad en la segmentación: se puede definir un objeto buscando *discontinuidad* (bordes, como en Sobel/Canny) o buscando *continuidad* (regiones, como en la umbralización o el crecimiento de regiones).

Tabla 5.1: Comparativa de Detección de Bordes: Sobel vs. Canny

Característica	Operador Sobel	Algoritmo Canny
Metodología	Convolución de gradiente simple ⁴⁰	Algoritmo multi-etapa ⁴⁰
Manejo de Ruido	Sensible al ruido ⁴⁴	Menos sensible (incluye suavizado Gaussiano) ⁴⁴
Precisión del Borde	Bordes gruesos ⁴⁴	Bordes finos (Supresión de No-Máximos) ⁴⁴
Umbralización	Umbral único (difícil de ajustar) ⁴⁴	Umbral doble (Histéresis) ⁴⁴
Conectividad	Sin conectividad explícita ⁴⁴	Seguimiento de bordes para contornos continuos ⁴⁴
Cuándo Usar	Tareas básicas, velocidad pura ⁴⁴	Alta precisión, pre-requisito para otras tareas ⁴⁴

5.4. Técnica 3: Crecimiento de Regiones (Region Growing)

Este es el tercer enfoque principal de³⁷, que agrupa "píxeles similares en regiones coherentes".⁴⁵

El proceso es iterativo:

1. Se seleccionan uno o más "puntos de semilla" (seed points) dentro del objeto de interés.⁴⁶
2. Se examinan los píxeles vecinos de estas semillas (adyacencia de 4 u 8).⁴⁷
3. Un vecino se añade a la región si cumple un criterio de similitud predefinido (p. ej., su valor de intensidad es similar al de la semilla, o su "textura" es similar).⁴⁷
4. El proceso se repite, creciendo hacia afuera desde las semillas hasta que no se puedan añadir más píxeles.

La principal debilidad de este método es que su resultado "depends upon the selection of the seed point" (depende de la selección del punto de semilla) y puede ser lento ("large execution time").⁴⁹

6. Restauración y Reconstrucción de Imágenes

La restauración de imágenes es un campo del PDI que intenta revertir la degradación de una imagen y devolverla a su estado original.²⁷ Esto implica modelar primero el proceso de

degradación.

6.1. Modelos de Degradación: Ruido

La degradación más común es el ruido, que se introduce durante la adquisición o transmisión de la imagen. Las causas incluyen "condiciones de poca luz, ajustes ISO altos, tiempos de exposición prolongados y el calor generado por el sensor de la cámara".⁵⁰

Los tipos de ruido más comunes incluyen:

- **Ruido de Luminancia y Color:** El ruido de luminancia aparece como un "apariencia granulada", mientras que el ruido de color aparece como "motas de color aleatorias".⁵¹
- **Ruido Gaussiano:** Distribución aleatoria de ruido que surge del sensor.²⁸ Se mitiga mejor con filtros de media o Gaussianos.
- **Ruido de Poisson:** Vinculado a la aleatoriedad de los fotones, común en condiciones de "poca luz".²⁸
- **Ruido Impulsivo (Sal y Pimienta):** "valores extremos" o "alteraciones abruptas".²⁷ Se mitiga mejor con un **filtro de mediana**.²⁶

6.2. Deconvolución: Revirtiendo el Desenfoque (Blur)

El desenfoque (por movimiento o por óptica desenfocada) es otra degradación común. Se modela matemáticamente como una "convolución con un núcleo K" (donde K es el núcleo de desenfoque).⁵²

El proceso de restauración para revertir esto se llama **deconvolución**.¹ Es un problema matemáticamente "mal puesto" (difícil de resolver) que es muy sensible al ruido. Requiere técnicas avanzadas como la "regularización de Tikhonov"⁵² o el uso de la "transformada rápida de Fourier"¹ para resolver la ecuación en el dominio de la frecuencia, donde la convolución se convierte en una simple multiplicación.

6.3. Inpainting: Reconstrucción de Oclusiones y Áreas Dañadas

El *inpainting* (o restauración digital) aborda la forma más extrema de degradación: la pérdida total de datos en una región (occlusiones, rayones, texto superpuesto).¹⁹ Su objetivo es la "recuperación de fotografías o piezas de arte dañadas" o la "remoción o reemplazo de objetos".⁵³

Los algoritmos clásicos de inpainting intentan llenar el "agujero" propagando información desde el exterior hacia el interior. Lo hacen calculando "las prioridades de las regiones de la frontera" y luego propagando "estructuras y bordes" hacia la región faltante.⁵³

Esta técnica es el puente conceptual perfecto entre el PDI clásico y el PDI generativo

moderno. Los métodos clásicos son, en efecto, "parches" algorítmicos; son buenos para llenar líneas finas o pequeños agujeros copiando texturas cercanas. Sin embargo, si la región oculta es grande y semánticamente compleja (p. ej., un ojo humano completo), la propagación de textura falla.

Aquí es donde el Deep Learning (DL) ha tomado el control.¹⁹ Los modelos de IA generativa modernos, como los Modelos de Difusión (ver Sección 7.4), no *copian* la textura; ellos *entienden* el contexto de la imagen y *generan* un nuevo ojo semánticamente coherente desde cero. Han aprendido el concepto de "ojos" a partir de sus datos de entrenamiento.⁵⁴ Este problema de restauración ha sido ahora casi completamente absorbido por la IA generativa.

7. La Revolución del Deep Learning en el PDI

En la última década, el campo del PDI ha sido completamente transformado por el Deep Learning (DL), un subcampo de la Inteligencia Artificial.

7.1. El Cambio de Paradigma: Aprendizaje de Características vs. Diseño Manual

El PDI clásico (Secciones 2-6) se basa casi por completo en el *diseño manual de características*. Un ingeniero o científico diseña a mano un filtro (un núcleo de convolución, como el de Sobel) para detectar una característica específica (un borde).²⁰

El Deep Learning invierte este paradigma. Utiliza el *aprendizaje de características*.²⁰ En lugar de que un humano diseñe los filtros, se le da a una red neuronal los datos de entrada y la salida deseada, y la red *aprende* los filtros óptimos por sí misma durante el entrenamiento. Es un "Aprendizaje de principio a fin": el modelo "combina la extracción de características y la clasificación en una única canalización".⁵⁶

Matemáticamente, el "filtro de convolución" (Sección 2.3) y el "filtro" (o *kernel*) en una Red Neuronal Convolutacional (Sección 7.2) son la misma operación.²⁰ La diferencia radical es quién define los pesos de ese filtro. En el PDI clásico, un humano los escribe (p. ej., un filtro Gaussiano²⁵). En una CNN, los pesos del filtro son *variables aprendidas*.⁵⁷ Una CNN es, en efecto, un pipeline de PDI que se auto-diseña, aprendiendo jerarquías de filtros para detectar bordes, texturas, formas y, finalmente, objetos.²⁰

7.2. Redes Neuronales Convolucionales (CNNs): El Nuevo Estándar

Las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) son el "tipo de red neuronal diseñada para procesar datos estructurados en forma de cuadrículas, como imágenes".⁵⁷

7.2.1. Arquitectura y Funcionamiento

Aunque las arquitecturas modernas son complejas, se basan en tres tipos principales de capas²⁰:

1. **Capa Convolucional:** El bloque de construcción principal. Aplica un conjunto de *filtros aprendidos* (kernels) a la imagen de entrada. Cada filtro se especializa en detectar una característica (como un borde vertical, una textura específica, etc.), y su salida se llama *mapa de características*.²⁰
2. **Capa de Activación (ReLU):** Después de la convolución, se aplica una función no lineal, comúnmente la "unidad lineal rectificada (ReLU)".²⁰ Esto es crucial, ya que permite a la red aprender relaciones complejas (la mayoría de los problemas del mundo real no son lineales).
3. **Capa de Agrupación (Pooling):** Es una operación de *submuestreo*²⁰, como el "Max Pooling". Reduce la dimensión (ancho y alto) de los mapas de características, "disminución del número de parámetros".²⁰ Esto hace que la red sea más eficiente y la ayuda a generalizar (haciéndola robusta a pequeñas traslaciones).
4. **Capa Totalmente Conectada:** Al final de la red, las características 2D se apllanan en un vector 1D, y esta capa realiza la *tarea de clasificación* final.²⁰

7.2.2. Tarea: Clasificación de Imágenes

La tarea fundamental de una CNN es la clasificación.⁵⁸ Dado un conjunto de imágenes etiquetadas (p. ej., "gato", "perro"), la red aprende a asignar la etiqueta correcta a una imagen nueva.⁶⁰

El rendimiento se mide con métricas clave⁶¹:

- **Loss (Pérdida):** Mide "qué tan equivocada está la red". El objetivo del entrenamiento es minimizarla.
- **Accuracy (Precisión):** La "proporción de predicciones correctas".
- **Val_loss (Pérdida de Validación):** La pérdida medida en un conjunto de datos "nuevo" que la red no vio durante el entrenamiento. Es la métrica más importante para evaluar cómo la red "generaliza" a datos del mundo real.

7.3. PDI Avanzado con Deep Learning

Las CNNs han evolucionado para realizar tareas de PDI mucho más complejas que la simple clasificación.

7.3.1. Detección de Objetos

La detección de objetos responde a dos preguntas: qué hay en la imagen (clasificación) y dónde está (localización).⁶²

- **R-CNN (Region-based CNN):** Un modelo pionero que fusionó el PDI clásico con el DL.⁶³ Su flujo^{63:}
 1. *Generar Propuestas de Región:* Utiliza un método clásico (como la Búsqueda Selectiva) para identificar ~2000 áreas potenciales ("propuestas de región") que podrían contener un objeto.
 2. *Extracción de Características:* Ejecuta una CNN sobre *cada una* de esas ~2000 propuestas para extraer sus características.
 3. *Clasificación y Refinamiento:* Utiliza un clasificador (como un SVM) sobre esas características para etiquetar la región y aplica una "regresión de cuadros delimitadores" para ajustar la precisión de la caja.
- **Modelos Modernos (YOLO, SSD):** El enfoque de R-CNN era muy lento (2000 pasos de CNN). Modelos modernos como YOLO (You Only Look Once) y SSD (Single Shot MultiBox Detector) son mucho más rápidos ("real time detection").⁶³ Analizan la imagen "una sola vez" en un único paso de la red para predecir todas las cajas delimitadoras y etiquetas simultáneamente.⁶³

7.3.2. Segmentación Semántica

Esta es la tarea de PDI más granular y exigente. La segmentación semántica "asocia una etiqueta o categoría a *cada píxel* presente en una imagen".⁶⁵ El resultado no es solo una caja delimitadora; es una máscara a nivel de píxel que "identificar las ubicaciones precisas de diferentes tipos de información visual, así como dónde comienza y termina".⁶⁶

Arquitecturas especializadas como "U-Net"⁶⁷ y "Mask R-CNN"⁶⁵ están diseñadas específicamente para esta tarea, siendo cruciales en medicina (delinear tumores) y vehículos autónomos (identificar la carretera, peatones, y otros vehículos píxel por píxel).

7.4. La Nueva Frontera: Generación de Imágenes

El PDI ha pasado de *analizar* imágenes a *crearlas*. Los modelos generativos son redes neuronales que aprenden la distribución estadística de un conjunto de datos (p. ej., caras humanas) y pueden *muestrear* de esa distribución para crear nuevas caras que nunca existieron.

7.4.1. Redes Generativas Antagónicas (GANs)

Las GANs⁶⁸ popularizaron la generación de imágenes. Funcionan como un juego de dos

jugadores: un "Generador" que crea imágenes falsas y un "Discriminador" que intenta distinguir las imágenes falsas de las reales. El Generador aprende hasta que sus falsificaciones son tan buenas que engañan al Discriminador.

7.4.2. Modelos de Difusión

Los Modelos de Difusión⁶⁹ son la tecnología de vanguardia que ha superado a las GANs en muchos aspectos. Su concepto se inspira en la "física" y la termodinámica.⁷²

- **Proceso Directo (Difusión):** Durante el entrenamiento, el modelo toma una imagen real y "inyectando iterativamente ruido gaussiano" en ella, paso a paso, hasta que la imagen se destruye y se convierte en "ruido puro".⁷²
- **Proceso Inverso (Denoising):** El modelo (una red neuronal) se entrena para revertir este proceso. Aprende a tomar una imagen ruidosa y predecir una versión *ligeramente menos ruidosa*, "eliminando el ruido" de forma incremental.⁷²
- **Generación de Imágenes:** Para crear una imagen nueva, el modelo comienza con una muestra de "ruido puro" y aplica el proceso inverso aprendido cientos o miles de veces, transformando gradualmente la estética en una imagen coherente y fotorrealista.⁷²

Estudios han demostrado que los Modelos de Difusión pueden "superar" a las GANs en "calidad de muestra" y "diversidad" (evitando el colapso de modo).⁶⁹ Su principal desafío histórico ha sido la velocidad; el "muestreo lento y computacionalmente costoso" (requiriendo miles de pasos de denoising) era un inconveniente, aunque la investigación reciente ha reducido drásticamente este problema.⁶⁹

8. Catálogo de Usos: El PDI en Acción

El PDI es una tecnología habilitadora fundamental en casi todas las industrias científicas y tecnológicas.¹

8.1. Medicina y Bioingeniería: El Dominio de Mayor Impacto

El PDI es una piedra angular del diagnóstico médico moderno.¹

- **Diagnóstico:** Se utiliza para la "Mejora de la nitidez" en "Rayos X" para visualizar fracturas y la "Segmentación de tejidos" en "Resonancia Magnética (MRI)" para "identificar tumores o lesiones".⁴
- **Imágenes 3D:** El PDI permite la reconstrucción de "imágenes 3D" a partir de múltiples cortes 2D (como en una Tomografía Computarizada o MRI), permitiendo a los cirujanos visualizar la anatomía desde cualquier ángulo.⁷⁵
- **Análisis por IA:** Las CNNs se aplican cada vez más al "análisis de imágenes de

resonancias magnéticas o rayos X" para la "detección temprana de la demencia"⁵⁷ y la identificación de patologías.

8.2. Seguridad y Biometría: Identificación y Verificación

El PDI es el motor de los sistemas biométricos, que utilizan rasgos físicos únicos (huellas dactilares, rostro, iris) "interpretados por ordenadores" para verificar la identidad.⁷⁸

El proceso es una pipeline de PDI⁷⁸:

1. **Captura en vivo:** Se adquiere una imagen del rasgo (p. ej., una foto del rostro).
2. **Preprocesamiento:** Se aplica PDI para normalizar la imagen, incluyendo "corrección de escala de grises, el filtrado de ruido" y alineación geométrica.⁸⁰
3. **Extracción de Plantillas:** Se utiliza PDI avanzado (a menudo una CNN) para procesar la imagen y extraer una "plantilla numérica" (un vector de características) que representa únicamente ese rasgo.
4. **Comparación:** La "plantilla numérica" se compara con una base de datos.

Este método proporciona "Rapidez y eficiencia" y "Alta precisión" en la autenticación.⁸¹

8.3. Industria 4.0: Inspección Automatizada y Control de Calidad

En la fabricación moderna, el PDI habilita la "Inspección óptica automatizada" (AOI) y la "inspección automatizada".⁸² Los sistemas de visión artificial utilizan "cámaras de alta resolución" para "detectar incluso los defectos más pequeños" en las líneas de producción, una tarea que es demasiado rápida, tediosa o minuciosa para los inspectores humanos.⁸⁴ En estas aplicaciones, el PDI se utiliza como una herramienta de *metrología* (medición) cuantitativa. Transforma datos visuales cualitativos en datos numéricos cuantitativos que pueden alimentar un sistema de control de calidad.⁸⁵ Algunos ejemplos específicos incluyen⁸⁷:

- **Agricultura (Papas):** Inspección automática de "Color, tamaño, clasificación" de productos.
- **Alimentos (Chocolates):** "Verificación de llenado de cajas" para asegurar que el empaque es correcto.
- **Alimentos (Jamón):** Inspección de la superficie para "determinar el porcentaje de grasa" midiendo la "proporción del color blanco".
- **Electrónica:** "medir dimensiones" de componentes, verificar la integridad de los puntos de soldadura.⁸⁴

8.4. Teledetección y Geociencia: Análisis de Imágenes Satelitales

El PDI es crucial para interpretar "imágenes satelitales" y datos de teledetección.⁸⁸ Las imágenes crudas del espacio no son utilizables sin un preprocesamiento de PDI significativo⁹⁰:

- **Corrección Atmosférica:** El PDI se usa para eliminar los efectos de la atmósfera, como la "Dispersión Rayleigh" (que causa una bruma azulada que reduce el contraste).
- **Corrección Topográfica y Calibración:** Se ajustan los valores de los píxeles para tener en cuenta el ángulo del sol y la pendiente del terreno.
- **Análisis Multiespectral:** El PDI se aplica "en paralelo" a múltiples bandas (incluyendo infrarrojo y ultravioleta) para clasificar el uso del suelo, monitorear la deforestación o evaluar la salud de los cultivos.³

8.5. Ingeniería y Transporte: Tráfico y Vehículos Autónomos

En la "Ingeniería de tráfico"⁷³, el PDI se utiliza para el monitoreo y control en "Ciudades inteligentes".⁹² Las aplicaciones incluyen:

- **Cumplimiento de la Ley:** "fotomultas" que capturan simultáneamente la imagen de un vehículo y la luz roja del semáforo, o sistemas que "detectar e infraccionar" a vehículos que "excedan los límites de velocidad".⁷³
- **Vehículos Autónomos:** Son fundamentalmente sistemas de PDI y CV en tiempo real. Utilizan la segmentación semántica (Sección 7.3.2) para entender la escena y la detección de objetos (Sección 7.3.1) para identificar peatones, carriles y otros vehículos.⁹³

8.6. Fotografía Computacional: PDI en el Momento de la Captura

La fotografía computacional es un campo donde el PDI no solo procesa una imagen, sino que la crea.⁹⁴ Utiliza la computación para "escapar de las limitaciones de las cámaras de película tradicionales".⁹⁴

El ejemplo más conocido es el "**High-dynamic-range (HDR) imaging**".⁹⁵ Una cámara tradicional no puede capturar el brillo del cielo y los detalles de las sombras en una sola toma. La fotografía computacional toma múltiples "imágenes expuestas de manera diferente" (una oscura, una media, una brillante) y utiliza algoritmos de PDI para fusionarlas en una sola imagen que contiene detalles en todos los rangos de iluminación.⁹⁵ Otros ejemplos incluyen el "modo retrato" (que utiliza segmentación para desenfocar el fondo) y el apilamiento de enfoque.

9. Guía Práctica: Herramientas, Recursos y Consejos

9.1. El Ecosistema de Software: MATLAB vs. Python

Existen dos ecosistemas dominantes para el desarrollo de PDI profesional.

9.1.1. MATLAB

MATLAB es un entorno de computación numérica comercial, tradicionalmente dominante en ingeniería y academia.²³ Su fortaleza reside en su "Image Processing Toolbox".⁷⁶ Esta caja de herramientas es una solución integral que proporciona funciones robustas y validadas para "segmentation, morphology... 3D image processing" e incluso "Deep Learning".⁷⁶ Una de sus características más potentes es la "C/C++ code generation" (generación de código C/C++), que permite a los ingenieros diseñar prototipos de algoritmos en MATLAB y luego desplegarlos eficientemente en "embedded vision system deployment" (sistemas de visión embebidos).⁹¹ También puede interoperar con otras bibliotecas como OpenCV.¹⁰⁰

9.1.2. Python

Python es el lenguaje de código abierto dominante, especialmente para el desarrollo de Inteligencia Artificial y Deep Learning.¹⁰¹ Para el PDI, Python no es una sola herramienta, sino un ecosistema de bibliotecas especializadas que trabajan juntas.¹⁰³ Las bibliotecas esenciales incluyen:

- **NumPy:** La biblioteca fundamental para la computación numérica. Es la base de todo lo demás, ya que la imagen se representa como un "NumPy array".¹⁰⁴
- **OpenCV:** La biblioteca de facto para la Visión por Computadora en tiempo real.¹⁰³
- **Scikit-Image:** Una biblioteca enfocada en algoritmos de PDI para uso científico.¹⁰⁴
- **Pillow (PIL):** Una biblioteca para manipulación y operaciones de archivos de imagen más simples.¹⁰³
- **Matplotlib:** La biblioteca principal para la visualización y trazado de imágenes e histogramas.¹⁰³

9.2. Consejo Práctico: El Arsenal de Python: Cuándo Usar Pillow, OpenCV o Scikit-Image

Para un desarrollador de Python, una decisión práctica clave es qué biblioteca usar. Aunque tienen superposiciones, sus fortalezas están en dominios diferentes.¹⁰⁴

- **Pillow (PIL):** Es la sucesora de la Python Imaging Library (PIL). Es "ideal for beginners" (ideal para principiantes).¹⁰⁷ Su enfoque principal es la manipulación de archivos y operaciones simples "Image->Image".¹¹¹ Es la herramienta perfecta para tareas "perfect for simpler, lightweight tasks" (ligeras y simples) como abrir, guardar, redimensionar, recortar o rotar una imagen.¹¹⁰
- **OpenCV (cv2):** Es una "powerful open-source library for real-time computer vision" (potente biblioteca de código abierto para visión por computadora en tiempo real).¹⁰³ Su enfoque *no* es solo el PDI, sino la Visión por Computadora en general.¹¹² Está escrita en C++ (con *bindings* de Python) y está altamente optimizada para la velocidad. Es la opción preferida para "complex and performance-intensive applications" (aplicaciones complejas y de rendimiento intensivo), *streaming* de vídeo, "object detection" (detección de objetos) e "Integration with ML frameworks" (integración con *frameworks* de ML).¹¹⁰
- **Scikit-Image (skimage):** Se autodefine como "a collection of algorithms for image processing" (una colección de algoritmos para PDI).¹⁰⁴ Es "The Scientist's Toolbox" (la caja de herramientas del científico).¹⁰⁹ Su enfoque está en el "Research and advanced analysis" (investigación y análisis avanzado), proporcionando "high-quality, peer-reviewed code" (código de alta calidad revisado por pares) para tareas como "segmentation, feature extraction, denoising" (segmentación, extracción de características, eliminación de ruido).¹⁰⁴

En la práctica, los proyectos profesionales no eligen una biblioteca, sino que las utilizan conjuntamente en un pipeline. Un flujo de trabajo común, como se describe en ¹⁰⁹, podría ser:

1. Usar **Pillow** para cargar y normalizar la imagen de entrada (manipulación simple).
2. Usar **OpenCV** para ejecutar una detección de objetos rápida (CV en tiempo real).
3. Usar **Scikit-Image** para realizar un análisis morfológico detallado o una segmentación precisa de las regiones de interés detectadas (análisis científico).

Tabla 9.1: Guía de Decisión: Bibliotecas de PDI en Python

Biblioteca	Enfoque Principal	Audiencia Objetivo	Fortalezas	Caso de Uso Típico
Pillow (PIL)	Manipulación de archivos y operaciones simples ¹¹⁰	Desarrolladores Web, Principiantes ¹⁰⁷	API simple, ideal para abrir/guardar, recortar, redimensionar ¹¹⁰	"Redimensionar un avatar subido por un usuario".
OpenCV (cv2)	Visión por Computadora en Tiempo Real ¹⁰³	Ingenieros de CV, Desarrolladores de Robótica	Alta velocidad (C++), detección de objetos, ML integrado ¹¹⁰	"Contar personas en un stream de cámara de seguridad".

Scikit-Image	Análisis Científico y Algorítmico ¹⁰⁹	Investigadores, Científicos de Datos ¹⁰⁹	Algoritmos robustos, revisados por pares, segmentación, morfología ¹⁰⁴	"Medir el tamaño de las células en una imagen de microscopio".
---------------------	--	---	---	--

9.3. Desafíos Comunes: Cómo Abordar el Ruido y la Iluminación no Uniforme

- **Manejo del Ruido:** Como se detalló en la Sección 2.4, la estrategia depende del tipo de ruido. Para "ruido de sal y pimienta" (impulsivo), el "Filtro mediano" es la herramienta de elección.²⁸ Para el ruido de sensor (Gaussiano), los "Filtros gaussianos" son superiores.²⁵
- **Iluminación no Uniforme:** Este es un problema común (p. ej., una habitación con una sombra en una esquina). La herramienta principal para manejar esto es la "ecualización del histograma" (Sección 2.2), que expande el rango dinámico.¹² Es particularmente útil para "mejorar las imágenes con poca luz".⁴⁰

9.4. Recursos para el Aprendizaje Continuo

9.4.1. Textos Fundacionales

El texto de referencia global y estándar de oro en este campo es *Digital Image Processing* de **Gonzalez & Woods**.¹¹³ Citado incluso en la investigación fundamental ¹, este libro ha sido el "world leader in its field for more than 30 years" (líder mundial en su campo por más de 30 años).¹¹⁵ Las ediciones recientes, como la 4^a edición, han sido actualizadas para incluir cobertura de "deep learning and deep neural networks, including convolutional neural nets" (deep learning y redes neuronales profundas, incluidas las redes neuronales convolucionales).¹¹³

Otros textos en español, como los publicados por Trillas o RA-MA, a menudo se centran en aplicaciones prácticas, como el "Procesamiento digital de imágenes con MATLAB y Simulink".¹¹⁷

9.4.2. Plataformas Educativas

- **Coursera:** Ofrece un curso de "Procesamiento de Imágenes" de nivel intermedio.¹²⁰ El curso utiliza Python y cubre 8 módulos que abarcan los fundamentos, el dominio espacial y de frecuencia, el color, la morfología y la segmentación.¹²⁰
- **Udemy:** Proporciona cursos prácticos como "Procesamiento digital de imágenes con Python y OpenCV", que se enfoca en la construcción de proyectos del mundo real, como un "sistema de video vigilancia".¹²¹
- **Tutoriales y Manuales:** Existen numerosos manuales prácticos (como los del software SPRING²²) y tutoriales de vídeo¹²² disponibles para el aprendizaje autodirigido.

10. Conclusión y Tendencias Futuras

10.1. El Futuro del PDI: IA Generativa, Procesamiento en Tiempo Real y en el Borde (Edge Computing)

El Procesamiento Digital de Imágenes ha evolucionado de un conjunto de operaciones matemáticas estáticas a un campo dinámico que es fundamental para la inteligencia artificial. Las tendencias emergentes¹²⁴ indican una trayectoria clara:

1. **IA Generativa:** Como se vio en las Secciones 6.3 y 7.4, el PDI ha pasado de ser una disciplina puramente analítica a una creativa. La generación de imágenes¹²⁴ y el *inpainting* basado en IA¹²⁶ están redefiniendo lo que es posible en la restauración y creación de medios.
2. **Tiempo Real y en el Borde (Edge):** El PDI se está moviendo de los servidores y computadoras de escritorio a los dispositivos en el borde. La necesidad de "procesar grandes volúmenes de imágenes en tiempo real"¹²⁹ es primordial. El "procesamiento en tiempo real mejorado" y la "computación en el borde"⁹³ son avances esenciales que permiten aplicaciones que van desde "la conducción autónoma hasta la atención médica personalizada".⁹³
3. **IA Perceptiva y Activa:** La visión más futurista es aquella en la que el PDI se convierte en un sentido activo. Los sistemas del futuro no solo "procesar datos", sino que serán "capaces de percibir e *influir de forma activa sobre el entorno*".¹²⁷

El futuro del PDI no es la *imagen* en sí misma, sino la *acción* que permite. El PDI clásico era *reactivo*: un humano miraba una imagen procesada y tomaba una decisión.¹ El PDI automatizado moderno es *decisivo*: una máquina en una línea de fábrica mira una imagen e identifica un "defecto".⁸⁴ El PDI futuro es *activo e invisible*: un vehículo autónomo⁹³ o un sistema robótico *percibe* el mundo a través de un flujo constante de PDI y CV, e *influye* en ese mundo al frenar, girar o actuar, todo en un bucle de retroalimentación en tiempo real. El PDI se ha convertido, en efecto, en el sentido de la vista de la inteligencia artificial.

10.2. Síntesis Final

El Procesamiento Digital de Imágenes ha recorrido un largo camino desde sus orígenes en operaciones matemáticas manuales²³ y mejoras subjetivas.¹ Se ha convertido en un campo riguroso, cuantitativo y esencial, que sirve como la principal herramienta de metrología para la ciencia y la industria, y como el núcleo perceptivo de la inteligencia artificial moderna. Ha evolucionado de *mejorar imágenes a comprenderlas* (CV), *crearlas* desde cero (IA generativa⁷²) y, en última instancia, *actuar basándose en ellas*.¹²⁷ Es, sin duda, una de las disciplinas más fundamentales e impactantes de la era tecnológica moderna.

Fuentes citadas

1. acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.iisue.unam.mx/perfiles/articulo/1996-72-procesamiento-digital-de-imagenes.pdf>
2. acceso: noviembre 10, 2025,
<https://academia.com/articulos/procesamiento-de-imagenes-tipos-aplicaciones/#:~:text=El%20procesamiento%20de%20im%C3%A1genes%20es,%2C%20color%2C%20formas%20u%20objetos.>
3. Procesamiento digital de imágenes utilizando PDICalc - SEDICI - UNLP, acceso: noviembre 10, 2025, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/21814>
4. Aplicaciones prácticas en Ingeniería Biomédica | Notion, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://didyde.notion.site/Aplicaciones-pr-cticas-en-Ingenier-a-Biom-dica-17359ba9b65a802b8d7fce7933110bfa>
5. Filtros de Pdi | PDF | Visión por computador | Inteligencia artificial - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.scribd.com/presentation/259206513/Filtros-de-Pdi>
6. Procesamiento digital de imágenes - Inteligencia Artificial, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://inteligenciaartificial.tech/2024/08/19/procesamiento-digital-de-imagenes/>
7. Fundamentos básicos del procesamiento de imágenes - FaMAF, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cim/cap2.html>
8. (PDF) Procesamiento Digital de Imágenes. Fundamentos y Practicas con Matlab (Digital image processing. Fundamentals and practices with Matlab) - ResearchGate, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/229828279_Procesamiento_Digital_de_imagenes_Fundamentos_y_Practicas_con_Matlab_Digital_image_processing_Fundamentals_and_practices_with_Matlab
9. ¿Qué es el procesamiento de imágenes? - Azion, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.azion.com/es/learning/performance/que-es-el-procesamiento-de-imagenes/>

10. ¿Qué es el procesamiento de imágenes? - CEI, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://cei.es/procesamiento-de-imagenes-en-lineal/>
11. La umbralización, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/sonificacion/cabroa_archivos/umbralizacion.html
12. 2.2 ecualización del histograma - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.youtube.com/watch?v=BC31_smmFEs
13. Procesamiento Digital de Imágenes Tema 5: Filtrado y mejora de calidad, acceso: noviembre 10, 2025, <https://pascua.iit.comillas.edu/palacios/dip/chap05.pdf>
14. Técnicas de Realce de Imágenes | PDF | Histograma | Transformada de Fourier - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.scribd.com/document/356017208/Capitulo3-Tecnicas-de-Realce-de-Imagenes>
15. Presentación Pdi | PDF | Visión por computador | Percepción visual - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://fr.scribd.com/presentation/714805617/Presentacion-pdi>
16. Visión artificial, procesamiento de imágenes y computer vision - Secmotic, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://secmotic.com/vision-artificial-procesamiento-de-imagenes-y-computer-vision/>
17. Visión Artificial vs. Procesamiento de Imágenes: Diferencias Clave - Ultralytics, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ultralytics.com/es/blog/computer-vision-vs-image-processing-the-key-differences>
18. Optimal Learning and Self-Awareness Versus PDI - MDPI, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.mdpi.com/1999-4893/13/1/23>
19. Restauración de Imágenes en Python o "Image Inpainting Restoration" basado en Deep Learning OpenCV - Melt Studio, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.meltstudio.co/post/restauracion-de-imagenes-en-python-o-image-inpainting-restoration-basado-en-deep-learning-opencv>
20. ¿Qué son las redes neuronales convolucionales? | IBM, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/convolutional-neural-networks>
21. Técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el procesamiento de imágenes y su aplicación en el análisis de pavimentos - SciELO Colombia, acceso: noviembre 10, 2025,
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372019000100189
22. Manual de prácticas de procesamiento digital de imágenes con el programa SPRING 5.2.1 - UN Spider, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualSPRING_web.pdf
23. Procesamiento digital de imágenes - Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso: noviembre 10, 2025,
https://es.wikipedia.org/wiki/Procesamiento_digital_de_im%C3%A1genes
24. Convolución y Filtrado - lapi - UNAM, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://lapi.fi-p.unam.mx/assets/img/materias/PDI/materialesTemario/6-Filtros-y->

[morfologia.pdf](#)

25. Tema 6 - Técnicas de filtrado, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema06.pdf>
26. Visión por Computadora: Eliminación de Ruido en Imágenes - Datelo Tech, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.datelo.tech/blog/python-para-ia-4/vision-por-computadora-eliminacion-de-ruido-en-imagenes-3>
27. Restauración de imágenes con ruido UAB Barcelona, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.uab.cat/web?cid=1096481466568&pagename=UABDivulga%2FPage%2FTemplatePageDetailArticleInvestigar&lm1=1190098749310>
28. Ruido de la imagen - Dataconomy ES, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.dataconomy.com/2025/03/04/ruido-de-la-imagen/>
29. Procesamiento Digital de Imágenes - INAOE, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www-optica.inaoep.mx/~gurcid/urcmatespdi.html>
30. MatLAB Tutorial 19 / Transformadas de FOURIER discretas 2D, fft2 - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Q2qmlFhx4UY>
31. La transformada discreta del coseno, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://grupo.us.es/gtocoma/pid/pid5/pid56.htm>
32. Procesamiento Digital de Imagenes | PDF | Transformada discreta de Fourier - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.scribd.com/document/283910480/Procesamiento-digital-de-imagenes>
33. Procesamiento Digital de Imágenes - lapi - UNAM, acceso: noviembre 10, 2025,
https://lapi.fi-p.unam.mx/wp-content/uploads/PDI_Cap1_Introduccion.pdf
34. Fuzzy Mathematical Morphology Toolbox and Graphical Interface - CONICET, acceso: noviembre 10, 2025,
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/25316/CONICET_Digital_Nro.5ee0d778-9bdb-4728-bd73-14b6c937b218_A.pdf?sequence=2
35. Tema 5: Morfología, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://grupo.us.es/gtocoma/pid/tema5-1.pdf>
36. S07 - s1 - PDI - Operaciones Morfológicas | PDF - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.scribd.com/document/751890396/S07-s1-PDI-Operaciones-Morfologicas-7>
37. Técnicas de Segmentación en Procesamiento Digital de Imágenes - Revistas UNMSM, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/sistem/article/download/3299/27491>
38. Simple Thresholding (Umbralización) OpenCV en Python » omes-va.com, acceso: noviembre 10, 2025, <https://omes-va.com/simple-thresholding/>
39. Explicación del umbralizado en el procesamiento de imágenes - Ultralytics, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ultralytics.com/es/blog/thresholding-in-image-processing>
40. 18 algoritmos esenciales de visión artificial: desde la detección de bordes hasta los transformadores - AI Superior, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://aisuperior.com/es/computer-vision-algorithms/>

41. Edge Detection in Image Processing: An Introduction - Roboflow Blog, acceso: noviembre 10, 2025, <https://blog.roboflow.com/edge-detection/>
42. Comparing Edge Detection Methods - Medium, acceso: noviembre 10, 2025, <https://medium.com/@nikatsanka/comparing-edge-detection-methods-638a2919476e>
43. Sobel vs. Canny Edge Detection Techniques: Step by Step Implementation | by Lina Haidar, acceso: noviembre 10, 2025, <https://medium.com/@haidarlina4/sobel-vs-canny-edge-detection-techniques-step-by-step-implementation-11ae6103a56a>
44. Sobel Edge Detection vs. Canny Edge Detection in Computer Vision ..., acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.geeksforgeeks.org/computer-vision/sobel-edge-detection-vs-canny-edge-detection-in-computer-vision/>
45. Técnicas de segmentación de imágenes en IA visual - Innovatiana, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.innovatiana.com/es/post/image-segmentation-in-ai>
46. Función Crecimiento de región—ArcGIS Pro | Documentación, acceso: noviembre 10, 2025, <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/region-grow-function.htm>
47. Region growing - Wikipedia, acceso: noviembre 10, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Region_growing
48. Algoritmo de Crecimiento de Regiones con características de texturas: una aplicación en biopsias de médula ósea - Sedici UNLP, acceso: noviembre 10, 2025, https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22925/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
49. Module 2.2: Region Growing | Concept Overview | Image Segmentation | DIP - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=fOp-7W4uJWQ>
50. Ruido en Fotografía: Qué Es y Cómo Controlarlo - Capture the Atlas Academy, acceso: noviembre 10, 2025, <https://capturetheatlasc.com/es/ruido-en-fotografia/>
51. Ruido en la fotografía digital: comprenderlo y gestionarlo - PRO EDU, acceso: noviembre 10, 2025, <https://proedu.com/es-mx/blogs/photography-fundamentals/noise-in-digital-photography-understanding-and-managing-it>
52. Restauración de imágenes borrosas usando un modelo regularizado de programación lineal - Dialnet, acceso: noviembre 10, 2025, <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8142324.pdf>
53. IMPAINTING DIGITAL APPLICADO A LA RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES DE ULTRASONIDO - Notables de la Ciencia - CONICET, acceso: noviembre 10, 2025, https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/33632/CONICE_T_Digital_Nro.b8490ad4-e7ee-449a-b85e-94a4d45f3cee_D.pdf?sequence=5&isAllowed=y
54. Tutorial completo de Inpainting - Todas las configuraciones explicadas más

solución de problemas comunes : r/StableDiffusion - Reddit, acceso: noviembre 10, 2025,

https://www.reddit.com/r/StableDiffusion/comments/12vc9xb/comprehensive_inpainting_tutorialall_settings/?tl=es-419

55. Image Occlusion Enhanced – ¿editando imágenes? : r/Anki - Reddit, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.reddit.com/r/Anki/comments/17asfza/image_occlusion_enhanced_editing_images/?tl=es-419
56. Algoritmos de reconocimiento de imágenes: CNN, R-CNN, YOLO explicados - FlyPix AI, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://flypix.ai/es/blog/image-recognition-algorithms/>
57. Red neuronal convolucional - CNN - Foqum, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://foqum.io/blog/termino/red-neuronal-convolucional-cnn/>
58. ¿Qué son las redes neuronales convolucionales? - MATLAB & Simulink - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://la.mathworks.com/discovery/convolutional-neural-network.html>
59. Uso de PyTorch para entrenar el modelo de clasificación de imágenes - Microsoft Learn, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://learn.microsoft.com/es-es/windows/ai/windows-ml/tutorials/pytorch-train-model>
60. Redes Neuronales Convolucionales - Clasificación avanzada de imágenes con IA / ML (CNN) - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=4sWhhQwHqug>
61. Clasificación de imágenes con redes profundas | by Raul Perez - Medium, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://medium.com/@raulpzs/clasificaci%C3%B3n-de-im%C3%A1genes-con-redes-profundas-3a3b747489dc>
62. Object Detection and Object Recognition using CNN - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Vij2UkBzOZg>
63. R-CNN Explicado: Descripción general de la detección de objetos ..., acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ultralytics.com/es/blog/what-is-r-cnn-a-quick-overview>
64. Object Detection Using CNN - | International Journal of Innovative Science and Research Technology, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT24APR715.pdf>
65. Segmentación Semántica con Detectron2 | PDF - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025, <https://es.scribd.com/document/728473650/Segmentacion-semantica>
66. ¿Qué es la segmentación semántica? - IBM, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ibm.com/es-es/think/topics/semantic-segmentation>
67. Segmentación semántica y U-Net • Artículo de LMO - La Máquina Oráculo, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://lamquinaoraculo.com/deep-learning/u-net-y-segmentacion-semantica/>
68. ¿Qué es una GAN? - Explicación sobre las redes generativas antagónicas - Amazon AWS, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://aws.amazon.com/es/what-is/gan/>

69. Improving Diffusion Models as an Alternative To GANs, Part 1 ..., acceso: noviembre 10, 2025,
<https://developer.nvidia.com/blog/improving-diffusion-models-as-an-alternative-to-gans-part-1/>
70. [2302.09378] Modelos Generativos basados en Mecanismos de Difusión - arXiv, acceso: noviembre 10, 2025, <https://arxiv.org/abs/2302.09378>
71. ¿Qué son los modelos de difusión? - IBM, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/diffusion-models>
72. ¿Qué son los modelos de difusión? | IBM, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/diffusion-models>
73. Aplicaciones del procesamiento automático de imágenes en la Ingeniería de tráfico - Instituto Mexicano del Transporte, acceso: noviembre 10, 2025, <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt532.pdf>
74. Procesamiento digital de imágenes y su importancia - MasScience, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.masscience.com/procesamiento-digital-de-imagenes-y-su-importancia/>
75. Resonancia magnética - Mayo Clinic, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/mri/about/pac-20384768>
76. Image Processing Toolbox - MATLAB - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.mathworks.com/products/image-processing.html>
77. Investigadores de la UPM desarrollan una metodología basada en el machine learning para determinar el estado de la enfermedad en pacientes con deterioro cognitivo a partir de series de datos incompletos de resonancias magnéticas y otras técnicas tradicionales de detección., acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.upm.es/investigacion?id=CON13248&prefmt=articulo&fmt=detail>
78. ¿Qué es Biometría? Procesos biométricos - Aware, Inc., acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.aware.com/es/what-are-biometrics-biometric-processes/>
79. Explicando la biometría: qué son y cómo funcionan - Laxton, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.laxton.com/es/blog/explaining-biometrics>
80. Reconocimiento facial e identificación biométrica, acceso: noviembre 10, 2025, <https://hfsecurity.cn/es/reconocimiento-facial-e-identificacion-biometrica/>
81. Autenticación biométrica: qué es, beneficios y aplicaciones - Mitek Systems, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.miteksystems.com/es/blog/biometria-que-es-aplicaciones>
82. Inspección automatizada - Hexagon, acceso: noviembre 10, 2025, <https://hexagon.com/es/solutions/automated-inspection>
83. Inspección visual automatizada: Consejos para agilizar la calidad... - Tulip Interfaces, acceso: noviembre 10, 2025, <https://tulip.co/es/blog/automated-visual-inspection/>
84. Explicación de los sistemas de visión artificial para el procesamiento de imágenes - UnitX, acceso: noviembre 10, 2025, <https://es.unitxlabs.com/image-processing-machine-vision-systems/>
85. Inspección de calidad para un sistema de producción industrial basado en el procesamiento de imágenes - SciELO Colombia, acceso: noviembre 10, 2025,

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2014000300007

86. Vista de Visión y procesamiento de imágenes para control de calidad, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1193/1080>
87. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN LA INDUSTRIA - Consultores | CPM, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.consultorescpm.com.mx/wp-content/uploads/2015/09/64.pdf>
88. Curso Teledetección y Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales con QGIS - Icip, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://icip.edu.pe/curso-teledeteccion-pdi-qgis>
89. Procesamiento digital de imágenes Metodologías y técnicas, acceso: noviembre 10, 2025, <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/135234>
90. Guia de Teledeteccion y PDI ENVI 5.5.3 2020 - Scribd, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.scribd.com/document/544381520/Guia-de-Teledeteccion-y-PDI-ENVI-5-5-3-2020-1-copia>
91. Image Processing Toolbox Documentation - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.mathworks.com/help/images/index.html>
92. ¿Qué es la segmentación de imágenes? - IBM, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.ibm.com/es-es/think/topics/image-segmentation>
93. Las 10 mejores herramientas para ejecutar un proyecto de reconocimiento de imágenes (computer vision) en 2024 - VisionPlatform.ai, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://visionplatform.ai/es/las-10-mejores-herramientas-para-ejecutar-un-proyecto-de-reconocimiento-de-imagenes-computer-vision-en-2024/>
94. Raskar, MIT Media Lab, Computational Photography, Imaging and Video, acceso: noviembre 10, 2025, <https://web.media.mit.edu/~raskar/photo/>
95. Computational photography - Wikipedia, acceso: noviembre 10, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_photography
96. 15-463, 15-663, 15-862 Computational photography, Fall 2025 - Carnegie Mellon Graphics, acceso: noviembre 10, 2025,
<http://graphics.cs.cmu.edu/courses/15-463/>
97. Image Processing Toolbox Product Description - MATLAB & Simulink - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.mathworks.com/help/images/product-description.html>
98. Get Started with Image Processing Toolbox - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.mathworks.com/help/images/getting-started-with-image-processing-toolbox.html>
99. Image Types in the Toolbox - MATLAB & Simulink - MathWorks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.mathworks.com/help/images/image-types-in-the-toolbox.html>
100. Técnicas de visión artificial y procesamiento de imágenes con MATLAB -

YouTube, acceso: noviembre 10, 2025,

https://www.youtube.com/watch?v=sJ2eAW_Xg9M

101. Las 10 mejores bibliotecas de procesamiento de imágenes en Python - Unite.AI, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.unite.ai/es/10-best-image-processing-libraries-in-python/>
102. Las 20 mejores bibliotecas de Python para aprendizaje automático - Carmatec, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.carmatec.com/es_mx/blog/20-mejores-bibliotecas-de-python-para-aprendizaje-automatico/
103. Python Image Processing Libraries - GeeksforGeeks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.geeksforgeeks.org/computer-vision/python-image-processing-libraries/>
104. scikit-image: Image processing in Python — scikit-image, acceso: noviembre 10, 2025, <https://scikit-image.org/>
105. Procesamiento de imágenes con Python y Numpy, acceso: noviembre 10, 2025, https://facundoq.github.io/courses/aa2018/res/04_imagenes_numpy.html
106. Top 8 Image-Processing Python Libraries Used in Machine Learning - neptune.ai, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://neptune.ai/blog/image-processing-python-libraries-for-machine-learning>
107. Top 5 Tools for Image Processing in Python | by Meng Li - Medium, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://medium.com/top-python-libraries/top-5-tools-for-image-processing-in-python-407a894a7230>
108. Scikit-Image, OpenCV, PIL python libraries - Inductive Automation Forum, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://forum.inductiveautomation.com/t/scikit-image-opencv-pil-python-libraries/64646>
109. Python for Image Processing: Pillow, OpenCV, and Scikit-Image Compared | by Ghost writer, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://python.plainenglish.io/python-for-image-processing-pillow-opencv-and-scikit-image-compared-2072a3eae328>
110. Image Processing — OpenCV Vs PIL - GeeksforGeeks, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.geeksforgeeks.org/python/image-processing-opencv-vs-pil/>
111. python - PIL.Image vs skimage.io: When to use each, and which (if ..., acceso: noviembre 10, 2025,
<https://stackoverflow.com/questions/43723214/pil-image-vs-skimage-io-when-to-use-each-and-which-if-one-is-preferred-over-t>
112. Pillow vs OpenCV : r/Python - Reddit, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.reddit.com/r/Python/comments/4u7qlu/pillow_vs_opencv/
113. Digital Image Processing - Rafael C. Gonzalez, Richard Eugene Woods - Google Libros, acceso: noviembre 10, 2025,
https://books.google.es/books?id=XmZvtAEACAAJ&hl=es&source=gbs_book_other_versions_r&cad=1
114. DIGITAL IMAGE PROCESSING (2ND ED) | RAFAEL C. GONZALEZ - Casa del

- Libro, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.casadellibro.com/libro-digital-image-processing-2nd-ed/9780130946508/980956>
115. Digital Image Processing, 3rd edition, acceso: noviembre 10, 2025,
https://sde.uoc.ac.in/sites/default/files/sde_videos/Digital%20Image%20Processing%203rd%20ed.%20-%20R.%20Gonzalez,%20R.%20Woods-ilovepdf-compress.pdf
116. Digital Image Processing - CL72.org, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales.Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf>
117. procesamiento digital de imagenes - Editorial Trillas, acceso: noviembre 10, 2025, https://ettrillas.mx/libro/procesamiento-digital-de-imagenes_8800
118. 9 resultados - Libro Ideas, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.libroideas.com/es/libros-de/procesamiento-de-imagenes-551207/>
119. Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes - Alfaomega Argentina, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://alfaomegaditor.com.ar/producto/procesamiento-y-analisis-digital-de-imagenes/>
120. Procesamiento de Imágenes | Coursera, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.coursera.org/learn/procesamiento-de-imagenes>
121. Procesamiento digital de imágenes con Python de 0 a Master from Udemy - Class Central, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.classcentral.com/course/udemy-procesamiento-digital-de-imagenes-con-python-118823>
122. 02 Procesamiento de Imágenes: Introducción - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=ou1R9UbwP00>
123. Introducción - 1 - Procesamiento Digital de Imágenes - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=EPKyazYi4MI>
124. Tendencias globales en la generación de imágenes y arte con inteligencia artificial - Canva, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.canva.com/es_mx/generador-arte-ia/tendencias-globales-ia/
125. Tendencias emergentes en medios digitales para 2025 - Agencia de Publicidad, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://es.doisz.com/blog/tendencias-emergentes-en-medios-digitales/>
126. ▷ Tendencias Emergentes en Fotografía Móvil 【 2025 】 - Hernán Pérez, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://hernan-perez.com/tendencias-actuales-en-la-fotografia-con-dispositivos-moviles/>
127. Top 10 tendencias tecnológicas 2025 - AuraQuantic, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.auraquantic.com/es/blog/top-tendencias-tecnologicas/>
128. Imágenes libres de regalías de Tecnologías emergentes - Shutterstock, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.shutterstock.com/es/search/tecnolog%C3%ADAs-emergentes>
129. Procesamiento de imágenes: qué es, tipos y aplicaciones - Academia, acceso: noviembre 10, 2025,

<https://acaddemia.com/articulos/procesamiento-de-imagenes-tipos-aplicaciones/>

130. sobel operator or canny operator,which one gives better result - Stack Overflow, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://stackoverflow.com/questions/12544678/sobel-operator-or-canny-operator-which-one-gives-better-result>