

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 774 126**

51 Int. Cl.:

**G06T 7/13** (2007.01)

**G06T 7/162** (2007.01)

**G06T 7/181** (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.12.2016 PCT/IB2016/057324**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.06.2017 WO17098388**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.12.2016 E 16819664 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.01.2020 EP 3360112**

54 Título: **Segmentación rápida y automatizada de imagen en capas con una búsqueda de gráficos heurísticos**

30 Prioridad:  
**11.12.2015 US 20151496694**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**16.07.2020**

73 Titular/es:  
**ALCON INC. (100.0%)  
Rue Louis-d'Affry 6  
1701 Fribourg, CH**

72 Inventor/es:

**REN, HUGANG y  
YU, LINGFENG**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 774 126 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Segmentación rápida y automatizada de imagen en capas con una búsqueda de gráficos heurísticos

## 5 CAMPO TÉCNICO

El presente documento de patente se relaciona con búsquedas de gráficos de imágenes en capas. Con más detalle, el presente documento de patente se relaciona con la segmentación rápida y automatizada de imágenes en capas con búsquedas de gráficos heurísticos.

10

## ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La segmentación de la imagen es crítica para la generación de imágenes médicas cuantitativas y las intervenciones quirúrgicas guiadas por imágenes. Por ejemplo, para proporcionar información de diagnóstico puesta en práctica por ordenador, la cuantificación de las características del tejido, tal como su grosor, volumen, reflectividad y textura, puede ser importante. En general, la calidad de la información de diagnóstico puede mejorarse incorporando funcionalidades de reconocimiento de imágenes. Un reto particular del reconocimiento de imágenes es identificar con precisión las capas límite de los tejidos con imágenes. La identificación de las capas en una imagen a veces también se conoce como segmentación de imagen.

15

20

Más allá del diagnóstico, otra área médica donde la segmentación de imágenes puede ser de gran utilidad es el campo emergente de las intervenciones quirúrgicas guiadas por imágenes. La segmentación de imágenes de alta calidad que implica delinear los límites de la patología objetivo en capas con alta precisión puede mejorar, en gran medida, los resultados de la cirugía. Los resultados quirúrgicos mejorados incluyen tasas de recurrencia más bajas, tiempos de operación o procedimientos más cortos y el logro de los objetivos quirúrgicos en un mayor porcentaje de los casos.

25

Las imágenes médicas en capas son propias en oftalmología, incluyendo imágenes de la retina, la córnea y la cápsula del núcleo. Una de las tecnologías de generación de imágenes, la así denominada tomografía de coherencia óptica, u OCT, demostró un progreso particularmente rápido en precisión, utilidad y tiempo de generación de imagen. OCT está en camino de convertirse en una de las técnicas de generación de imágenes más utilizadas en oftalmología, llegando incluso a aproximarse a la categoría de la nueva norma clínica.

30

Recientemente, se han desarrollado varios algoritmos de segmentación de imágenes OCT. Sin embargo, estos métodos son principalmente para el procesamiento posterior de las imágenes y, como tales, no son particularmente rápidos. Además, estos algoritmos tienden a ser limitados en su utilidad. Técnicas tales como los métodos de "crecimiento zonal" y "contorno activo" son adecuados para segmentar límites irregulares. Sin embargo, ambos requieren elementos iniciales para comenzar y, por lo tanto, son solamente semiautomáticos. Los métodos de "máquina de vectores de soporte" y "red neuronal artificial" son intensivos en cómputo y requieren grandes conjuntos de datos de formación. Los enfoques basados en el umbral son sensibles a las variaciones de intensidad y requieren ajustes continuos del umbral. El método basado en polarización se basa en un sistema de hardware sensible a la polarización especialmente diseñado y, por lo tanto, no es rentable. Por último, las búsquedas de rutas más cortas basadas en gráficos recientemente propuestas son prometedoras en la segmentación de imágenes OCT. Sin embargo, confían en un algoritmo complejo de búsqueda de gráficos que reduce la velocidad de procesamiento y, por lo tanto, no son adecuados para la segmentación de imágenes en tiempo real. Por lo tanto, existe la necesidad de algoritmos de segmentación de imagen rápidos y automatizados para aplicaciones de generación de imágenes oftálmicas.

35

40

45

Haciendo referencia al documento de LI XIAOKUN ET AL: "Detección y medición de vasos retinianos para diagnóstico médico asistido por ordenador", JOURNAL OF DIGITAL IMAGING, SPRINGER-VERLAG, vol. 27, n° 1, (01-10-2013), páginas 120-132, XP035346032, ISSN: 0897-1889, y al documento de STEPHANIE J. CHIU ET AL: "Segmentación automática de siete capas retinianas en imágenes SDOCT congruentes con la segmentación manual de expertos", OPTICS EXPRESS, vol. 18, n° 18, (2010-08-30), páginas 19413-28, XP055196245, ISSN: 1094-4087, que han sido identificados como representativos de la relación con los antecedentes de la técnica anterior.

50

## 55 SUMARIO DE LA INVENCION

Se apreciará que el alcance de la invención está de conformidad con las reivindicaciones que proporcionan un método de conformidad con la reivindicación 1. Se proporcionan características opcionales adicionales de conformidad con las reivindicaciones dependientes. La especificación también incluye la descripción de disposiciones fuera del alcance de las reivindicaciones, proporcionadas como antecedentes y para ayudar a comprender la invención.

60

Las formas de realización en el presente documento de patente abordan los retos anteriores introduciendo un coste heurístico como una fuerza de guía adicional para búsquedas de gráficos de la capa oftálmica en la imagen. Con la información heurística adicional, exclusiva de las imágenes en capas, la búsqueda de gráficos se puede guiar de manera eficiente y la velocidad de procesamiento se puede aumentar en gran medida.

65

Las formas de realización del método de procesamiento de una imagen oftálmica con una búsqueda heurística pueden incluir: detectar datos de imagen de una zona oftálmica que implica una capa oftálmica mediante un sistema de generación de imágenes; construir un gráfico de imagen, que comprende nodos conectados por enlaces y los datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de los nodos y enlaces, por un procesador de imagen a partir de la imagen; y realizar una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponda a una imagen de la capa oftálmica asignando al menos uno de los costes de enlace a los enlaces del gráfico de imagen y uno de los costes de nodo a los nodos del gráfico de imagen; asignar costes heurísticos a al menos uno de los nodos y los enlaces del gráfico de imagen; (a) crear rutas extendidas extendiendo una ruta seleccionada desde su nodo frontal con enlaces de extensión; (b) determinar los costes de ruta de las rutas extendidas combinando los costes heurísticos de las rutas extendidas con los costes de la cadena de las rutas extendidas, en donde el coste heurístico de una ruta es el coste heurístico de su nodo frontal y el coste de la cadena de una ruta es uno de entre una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta, una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta y una suma ponderada de los costes de enlace y los costes de nodo de los enlaces y nodos de la ruta; (c) seleccionar una ruta de menor coste, elegida entre las rutas extendidas y las rutas almacenadas no seleccionadas, tal como una ruta seleccionada actualizada; (d) almacenar rutas extendidas no seleccionadas y sus costes, y marcar el nodo frontal de la ruta seleccionada como examinado; en donde las etapas (a)-(d) se repiten de forma iterativa.

En algunas formas de realización, un método para procesar una imagen oftálmica puede incluir: detectar datos de imagen de una zona oftálmica que implica una capa oftálmica mediante un sistema de generación de imágenes; usando un procesador de imagen para construir un gráfico de imagen, que comprende nodos conectados por enlaces y los datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de los nodos y enlaces, a partir de la imagen; y realizar una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponda a una imagen de la capa oftálmica asignando al menos uno de los costes de enlace a los enlaces del gráfico de imagen y uno de los costes de nodo a los nodos del gráfico de imagen; asignar costes heurísticos a al menos uno de los nodos y los enlaces del gráfico de imagen; (a) crear  $(N+1)^a$  rutas extendidas extendiendo una  $N$ -ésima ruta seleccionada desde su  $N$ -ésimo nodo frontal con  $(N+1)^b$  enlaces de extensión; (b) determinar los costes de ruta de las rutas extendidas  $(N+1)^a$  combinando al menos uno de los costes de enlace y los costes de nodo de las rutas extendidas  $(N+1)^a$  con los costes heurísticos de  $(N+1)^a$  rutas extendidas, en donde el coste heurístico de una ruta es el coste heurístico de su nodo frontal, el coste de enlace de la ruta es una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta y el coste de nodo de la ruta es una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta; y (c) seleccionar una ruta de coste más pequeña, elegida entre las rutas extendidas  $(N+1)^a$  y de rutas almacenadas no seleccionadas, tal como la ruta seleccionada  $(N+1)^a$ ; y (d) almacenar  $(N+1)^a$  rutas no seleccionadas y sus costes, y marcar el  $N$ -ésimo nodo frontal como examinado, en donde el método comprende repetir las etapas (a)-(d) de forma iterativa.

### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 ilustra un sistema de generación de imágenes para poner en práctica formas de realización del método 100.

Las Figuras 2A-B ilustran formas de realización del método 100.

Las Figuras 3A-D ilustran aspectos de generación de imágenes.

Las Figuras 4A-C ilustran la generación de datos característicos de la imagen.

Las Figuras 5A-C ilustran diferentes gráficos de imágenes.

Las Figuras 6A-B ilustran aspectos del método 100.

Las Figuras 7A-B ilustran formas de realización del método 300, relacionadas con el método 100.

Las Figuras 8A-D ilustran una forma de realización del método 300.

La Figura 9 ilustra formas de realización de la etapa de asignación de costes heurísticos 150/350 de formas de realización.

Las Figuras 10A-D ilustran formas de realización de la etapa de asignación de costes heurísticos de formas de realización.

Las Figuras 11A, 11B-1, 11B-2 y 11C ilustran el método 100/300 en un ejemplo específico.

La Figura 12 muestra capturas de pantalla de la segmentación de imágenes lograda por el método 100/300.

### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Las formas de realización abordan los retos anteriores al introducir un coste heurístico como una fuerza de guía adicional para la búsqueda de la capa oftálmica en la imagen. Dichas formas de realización del método de segmentación de imágenes tienen las siguientes ventajas, entre otras:

5 (1) La búsqueda heurística puede lograr una velocidad de procesamiento muy acelerada, que es crítica para el procesamiento de imágenes en tiempo real durante intervenciones quirúrgicas. Especialmente para el caso de las imágenes en capas, las funciones heurísticas aquí introducidas pueden acelerar de manera sustancial los algoritmos de búsqueda para lograr una rápida segmentación de la imagen.

10 (2) La búsqueda heurística puede lograr resultados de reconocimiento de imagen globalmente optimizados. En consecuencia, el ruido multiplicativo de ultrasonidos, denominado ruido speckle en la técnica, las sombras de los vasos sanguíneos y las patologías tienen poco efecto de distorsión sobre los resultados de la segmentación.

15 (3) La búsqueda heurística reduce e incluso minimiza la carga de preprocesamiento. Por lo tanto, el filtrado de imágenes, el suavizado y la mejora son menos críticos que en otras búsquedas.

20 (4) La búsqueda heurística es sólida en un amplio margen dinámico. A diferencia de las técnicas de segmentación basadas en umbrales, el método heurístico no requiere un valor umbral específico y puede admitir automáticamente imágenes en diferentes márgenes de intensidad.

La Figura 1 ilustra un sistema para poner en práctica formas de realización de la búsqueda heurística de segmentación automatizada. Tal como se muestra, un ojo 1 incluye varias capas oftálmicas 5, ejemplos que incluyen la superficie distal de la córnea, las superficies de la cápsula del cristalino proximal y distal, y las superficies retinianas. Un sistema de generación de imágenes 10 que puede utilizarse para poner en práctica formas de realización de la presente invención para una búsqueda rápida de gráficos heurísticos para identificar una imagen de cualquiera de estas capas oftálmicas 5 puede comprender una óptica de generación de imágenes 20, acoplada a un procesador de imagen 30 y una pantalla 40.

La Figura 2A ilustra que las formas de realización de un método 100 para procesar una imagen oftálmica pueden incluir:

110 - detectar datos de imagen de una zona oftálmica que implica la capa oftálmica 5 por el sistema de generación de imágenes 10;

35 120 - construir un gráfico de imagen que comprende nodos conectados por enlaces y datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de los nodos y enlaces, por un procesador de imagen; y

40 130 - realizar una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponda a una imagen de la capa oftálmica mediante

140 - asignando al menos uno de los costes de enlace a los enlaces del gráfico de imagen y los costes de nodo a los nodos del gráfico de imagen;

45 150 - asignando costes heurísticos a al menos uno de los nodos y los enlaces del gráfico de imagen;

160/(a): creación de rutas extendidas al extender una ruta seleccionada desde su nodo frontal con enlaces de extensión;

50 170/(b): determinación de los costes de ruta de las rutas extendidas combinando los costes heurísticos de las rutas extendidas con los costes de la cadena de las rutas extendidas, en donde el coste heurístico de una ruta es el coste heurístico de su nodo frontal y el coste de la cadena de una ruta es uno de entre una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta, una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta y una suma ponderada de los costes de enlace y los costes de nodo de los enlaces y nodos de la ruta;

55 180/(c): seleccionando una ruta de menor coste, elegida entre las rutas extendidas y las rutas almacenadas no seleccionadas, tal como una ruta seleccionada actualizada; y

60 190/(d): memorizando rutas extendidas no seleccionadas y sus costes, y marcando el nodo frontal de la ruta seleccionada como examinado.

Las etapas (a)-(d) se pueden realizar, de forma repetida, para identificar la ruta seleccionada que es representativa de la imagen de la capa oftálmica.

La Figura 2B ilustra que una forma de realización relacionada del método 100 para procesar una imagen oftálmica puede incluir:

- 110 - detectar datos de imagen de una zona oftálmica que implica la capa oftálmica 5 por el sistema de generación de imágenes 10;
- 5 120 - construir un gráfico de imagen que comprende nodos conectados por enlaces y datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de los nodos y enlaces, por un procesador de imagen; y
- 130 - realizar una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponda a una imagen de la capa oftálmica mediante
- 10 140 – asignando al menos uno de entre los costes de enlace a los enlaces del gráfico de imagen y de los costes de nodo a los nodos del gráfico de imagen;
- 150 - asignando costes heurísticos a al menos uno de entre los nodos y los enlaces del gráfico de imagen;
- 15 160/(a): creando rutas extendidas al extender una ruta seleccionada desde su nodo frontal con enlaces de extensión;
- 170/(b): determinando los costes de ruta de las rutas extendidas combinando los costes heurísticos de las rutas extendidas con los costes de la cadena de las rutas extendidas, en donde el coste heurístico de una ruta es el coste heurístico de su nodo frontal y el coste de la cadena de una ruta es uno de entre una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta, una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta y una suma ponderada de los costes de enlace y los costes de nodo de los enlaces y nodos de la ruta;
- 20 180/(c): seleccionando una ruta de menor coste de las rutas extendidas.
- 25 Las etapas (a)-(c) se pueden realizar de manera repetida para identificar la ruta seleccionada que es representativa de la imagen de la capa oftálmica.
- Las Figuras 3A-D ilustran que tomar una etapa de imagen 110 puede incluir tomar una imagen 200 de la zona oftálmica que incluye una capa oftálmica 201. La capa oftálmica 201 puede referirse a una capa completa que separa dos zonas oftálmicas. Un ejemplo podría ser la bolsa capsular, que separa el cristalino del ojo del vítreo del ojo. En dichas formas de realización, las propiedades ópticas y de reflexión de las dos zonas separadas pueden, o no, ser diferentes entre sí, pero las propiedades de reflexión de la capa oftálmica entre ellas son diferentes de las de las dos zonas. En otras formas de realización, la capa oftálmica 201 puede ser un borde de una zona oftálmica. Un ejemplo podría ser la superficie distal de la córnea, que separa la córnea de la cámara anterior. En cierto sentido, la búsqueda de gráficos se puede considerar como una adaptación específica de un método de búsqueda de borde para las demandas únicas de la imagen oftálmica.
- 30 35 Tal como se ilustra en la Figura 3A, un objetivo del método 100 es realizar una búsqueda de una ruta 205 que sea una imagen aproximada de la capa oftálmica 201 con la precisión deseada. Tal como se indicó, la búsqueda de la ruta 205 puede comenzar desde un borde de la imagen 200 y puede extenderse etapa a etapa de forma iterativa para seguir la capa oftálmica 201 hasta el borde opuesto de la imagen 200.
- 40 45 La Figura 3A muestra la capa oftálmica subyacente 201 en la imagen 200. Por supuesto, en la práctica real no se conoce la ubicación de la capa oftálmica 201 después de que se detecten la imagen 200 y sus datos de imagen correspondientes. El reto central de los métodos de reconocimiento de imágenes es determinar la ubicación real desconocida de esta capa oftálmica subyacente 201 a partir de los datos de imagen detectados ruidosos sin procesar que presentan solamente un cambio de intensidad de imagen a través de la capa oftálmica 201, tal como se muestra en la Figura 3C y se explica a continuación. Como a menudo los datos de imagen detectados son mucho menos concluyentes y más ruidosos que los mostrados en la Figura 3C, se necesitan métodos sofisticados para evolucionar y determinar la ruta 205 para identificar la ubicación de la capa oftálmica 201. Métodos como el método 100 aquí descrito.
- 50 55 La Figura 3B, ampliada a una pequeña zona de la imagen 200 de la Figura 3A, ilustra que la construcción del gráfico de imagen en la etapa 120 puede incluir recibir datos de imagen detectados de la zona oftálmica desde la óptica de generación de imágenes 20, donde los datos de imagen pueden corresponder a nodos 210, tales como píxeles 210 del sistema de generación de imágenes 10. Para definición y facilidad de referencia, se introduce un sistema de coordenadas (x,y) que permite la identificación de los nodos 210 de conformidad con sus coordenadas (x,y) tal como el nodo 210 (x,y). Esta notación (x,y) se utilizará principalmente cuando ayude a especificar las relaciones espaciales entre los elementos etiquetados. En numerosas formas de realización, el sistema de generación de imágenes 10 puede detectar los datos de imagen a través de una matriz regular de detectores, píxeles o sensores. Un ejemplo puede ser una matriz rectangular o cuadrada de píxeles 210 (x,y) en una cámara electrónica, una cámara de video, una cámara CCD o una matriz de sensores de un sistema de generación de imágenes de tomografía de coherencia óptica (OCT).
- 60 65 Los nodos 210 (x,y) se pueden conectar por enlaces 220 para completar el gráfico de imagen. En algunas formas de realización, los nodos 210 (x,y) pueden tener sensores físicos o píxeles correspondientes, mientras que los enlaces

220 (x,y,Δy) que conectan los nodos 210 (x,y) con los nodos 210 (x,y+Δy), y los enlaces 220 (x,y,Δx) que conectan los nodos 210 (x,y) con los nodos 210 (x+Δx,y) pueden corresponder a la construcción matemática de enlaces del gráfico de imagen. Los enlaces pueden tener tres variables: las coordenadas (x,y) y la tercera variable Δx o Δy. Dicha variable triple (x,y,Δx) indica que el enlace 220 (x,y,Δx) está conectando dos nodos cuyas coordenadas y son las mismas y cuyas coordenadas x difieren en la corta distancia Δx. En una puesta en práctica típica, Δx puede ser una distancia próxima más cercana entre nodos próximos. También se pueden utilizar enlaces más largos que conectan próximos más lejanos. Los enlaces se denominarán enlace 220, 220 (x,y) o 220 (x,y,Δx)/220 (x,y,Δy), la referencia que sea de mayor utilidad. En un retículo regular de nodos 210, Δx o Δy pueden referirse a una constante de red entre nodos próximos. En imágenes continuas, Δx o Δy pueden referirse a una pequeña distancia entre puntos (x,y) utilizados para caracterizar la imagen 200, en un sentido que define la resolución de la imagen 200.

En algunos otros sistemas, los enlaces 220 (x,y) pueden tener formas de realización físicas tal como se describe a continuación, y los nodos 210 (x,y) pueden ser principalmente construcciones matemáticas. Por último, en algunos sistemas, ambos nodos 210 (x,y) y enlaces 220 (x,y) pueden tener formas de realización físicas.

En algunas formas de realización, los enlaces 220 (x,y,Δx) pueden conectar solamente los píxeles próximos más cercanos 210 (x,y) y 210 (x+Δx,y). En otras formas de realización, los enlaces adicionales 220 (x,y,Δx, Δy) pueden conectar píxeles adyacentes en diagonal 210 (x,y) y 210 (x+Δx,y+Δy), lo que requiere la introducción de una cuarta variable. En otras formas de realización adicionales, los enlaces 220 pueden conectar píxeles incluso más lejos, separados por una distancia mayor que la constante de red a o Δx, pero sin exceder una distancia de corte.

La Figura 3C ilustra una sección transversal direccional en y del gráfico de imagen, que se muestra en la Figura 3B. El gráfico de la imagen en sí puede ser un conjunto de dichas secciones transversales. El eje horizontal puede referirse a los nodos 210 (x,y) o a los enlaces 220 (x,y) de la sección transversal direccional y del gráfico de imagen para un valor fijo de x. El eje vertical del gráfico de imagen puede mostrar datos de imagen detectados 230 (x,y) que corresponden a los nodos 210 (x,y) o a los enlaces 220 (x,y) como una función y, para una x fija. Los datos de imagen detectados 230 (x,y) pueden ser una intensidad de imagen, un estado de polarización, un color, una fase u otros datos de la luz de generación de imágenes que incluye información de imagen asociada con los nodos 210 (x,y).

Un ejemplo simple puede ser un sistema de generación de imágenes CCD con una matriz de píxeles o sensores que constituyen los nodos del gráfico de la imagen y los datos de la imagen son la intensidad de la imagen, detectada por los píxeles individuales de la cámara CCD.

En el caso particular de que el sistema de generación de imágenes 10 sea un sistema de generación de imágenes OCT 10, los datos de imagen detectados 230 (x,y) pueden relacionarse con una intensidad de un "haz de interferencia" que se generó al interferir una luz de imagen devuelta desde el ojo 1 con una luz de referencia, objeto de retorno desde un brazo de referencia del sistema de generación de imágenes OCT 10. Dicho haz de interferencia incluye información de imagen en su amplitud y fase que puede traducirse en una amplitud o intensidad de los datos de imagen detectados 230 (x,y).

Los datos de imagen también pueden ser preprocesados por el procesador de imagen 30 que puede ser parte del sistema de generación de imágenes OCT 10. El sistema de generación de imágenes OCT 10 puede asociar un pseudocolor, ajustar un contraste, ajustar un brillo, filtrar, normalizar, poner en práctica una reducción de ruido, mejorar los datos de la imagen y poner en práctica una equalización de histograma, entre otros. Por lo tanto, a lo largo de esta aplicación, la expresión "detectar los datos de imagen" puede referirse a una detección sin procesar de datos de imagen sin procesar, pero en otras formas de realización, la detección de los datos de imagen puede ser más inclusiva y puede incluir algún nivel de preprocesamiento de los datos de imagen sin procesar más allá de la detección.

La Figura 3D ilustra un aspecto adicional de la construcción de un gráfico de imagen 120: generación de datos característicos de la imagen 240 a partir de los datos de imagen detectados 230 (x,y) por el procesador de imagen 30. En este caso, los datos característicos de imagen 240 pueden corresponder a una intensidad, una fase, un gradiente o una textura de los datos de imagen detectados 230 (x,y). Por ejemplo, en la Figura 3D, los datos característicos de la imagen 240 (x,y,Δx) pueden corresponder a un gradiente finito o discreto de los datos de imagen detectados 230 (x,y), definido como una diferencia finita de los datos de imagen 230 (x,y) de los nodos 210 (x,y+Δy) y 210 (x,y) a lo largo del enlace 220 (x,y,Δy):

$$\text{datos característicos de imagen } 240(x,y,\Delta y) ::=$$

$$f(\text{datos de imagen detectada } 230(x,y+\Delta y) - \text{datos de imagen detectados } 230(x,y)),$$

y de manera análoga en la dirección x, para la orientación ortogonal. En este caso f(z) es una función de su argumento z. Una de las formas de realización más simples es f(z)=z, lo que da como resultado que los datos característicos de imagen 240 sean el gradiente discreto mencionado con anterioridad de los datos de imagen detectados 230. También se pueden emplear varias otras funciones f(z), que pueden estar aumentando o disminuyendo las funciones de su

argumento. Los datos característicos de la imagen 240  $(x,y,\Delta y)$  pueden asignarse a los nodos correspondientes 210  $(x,y)$ , o a los enlaces 220  $(x,y,\Delta y)$  a partir de los cuales se ha calculado el gradiente discreto.

La Figura 3C ilustra que para la imagen de la capa oftálmica 201 que separa dos zonas oftálmicas con diferentes propiedades de reflexión de la luz, los datos de imagen detectados 230  $(x,y)$  pueden presentar una elevación, o una caída, a medida que la coordenada  $y$  recorre la ubicación de la capa oftálmica 201 para una coordenada  $x$  fija. En este caso, tal como se discutió con anterioridad, la capa oftálmica 201 puede referirse a una capa delgada completa entre dos zonas, o un borde de una zona más gruesa. En cualquier caso, los datos de imagen detectados pueden presentar una caída a través de la capa oftálmica 201 porque las propiedades ópticas de las dos zonas separadas por la capa oftálmica 201 son diferentes.

La Figura 3D ilustra que en la forma de realización que utiliza el gradiente discreto anterior de los datos de imagen detectados 230 como los datos característicos de imagen 240, los datos característicos de imagen 240 pueden presentar un valor máximo en la ubicación de la capa oftálmica donde los datos 230 de imagen detectados presentan una elevación o una caída. Este ejemplo demuestra que los datos característicos de la imagen 240 están diseñados para ser diferentes de cero solamente en la proximidad de la capa oftálmica 201 y, en consecuencia, pueden ser de utilidad para definir los costes de búsqueda que guían la búsqueda de la ruta 205 que mejor se aproxima a la ubicación de la capa oftálmica 201.

Las Figuras 4A-C ilustran que una vez que se construye el gráfico de la imagen, y se establecen los datos característicos de la imagen 240  $(x,y)$ , la forma de realización de la etapa de búsqueda del gráfico heurístico 130 puede comprender el uso de los datos característicos de la imagen 240 para determinar y asignar los costes de enlace a enlaces o los costes de nodo a nodos del gráfico de imagen en la etapa 140, y determinando y asignando costes heurísticos a al menos uno de entre los nodos y enlaces del gráfico de imagen en la etapa 150.

Esta forma de realización de la etapa 130 de búsqueda de gráfico heurístico se ilustrará en un ejemplo en donde la construcción del gráfico 120 de imagen comprende definir los nodos 210 para corresponder a los píxeles del sistema de generación de imágenes 10, y los enlaces 220 como enlaces que conectan los nodos 210. La construcción 120 incluye, además, recibir datos de imagen detectados 230 de la zona oftálmica desde el sistema de generación de imágenes 10, y generar datos característicos de imagen 240 a partir de los datos de imagen detectados 230 por el procesador de imagen 30, tal como se muestra en la Figura 4A. En algunas formas de realización, los datos característicos de imagen 240 pueden corresponder a al menos uno de entre un gradiente discreto, o una diferencia finita de intensidades, o una diferencia de fase entre nodos próximos de los datos 230 de imagen detectados. Los nodos 210 conectados por los enlaces 220 pueden ser próximos más cercanos, próximos diagonales o próximos dentro de una distancia de corte.

Una vez que se ha realizado la construcción del gráfico de imagen 120 y, en particular, la generación de los datos característicos de imagen 240, puede comenzar la realización de la búsqueda del gráfico heurístico 130, comenzando con las etapas 140 y 150. Estos costes se utilizarán para guiar la búsqueda de gráfico heurístico que comprende además las etapas 160-190.

La Figura 4B ilustra que, en algunas formas de realización, la etapa de costes de asignación 140 puede basarse en la asignación de costes de enlace 250  $(x,y)$  a los enlaces 220  $(x,y)$  de tal manera que el coste de enlace 250 del enlace disminuya cuando aumente los datos característicos de imagen 240 del mismo enlace. Un ejemplo puede ser sustraer los datos característicos de la imagen 240, definidos como un gradiente finito en la Figura 4A, a partir de un máximo adecuado. Tal como se muestra en la Figura 4B, esta sustracción produce un coste de enlace 250 que muestra un mínimo donde los datos característicos de la imagen 240 muestran un máximo: en la ubicación de la capa oftálmica 201.

La Figura 4C muestra en un sentido aproximado y cualitativo cómo los costes de enlace que se acaban de definir 250, que presentan un mínimo en la ubicación de la capa oftálmica 201, pueden guiar la búsqueda de gráficos. En la Figura 4C, un conjunto de costes de enlace 250 que se calcularon en función de  $y$  para una  $x$  fija en la Figura 4B, se ensamblan para un margen de valores de  $x$ , para formar una superficie de coste sobre el plano  $(x,y)$  de la matriz de píxeles. De forma visible, los mínimos de coste de enlace correspondientes a los valores individuales  $x$  se combinan en una zona rebajada. Por construcción, la ubicación de esta zona rebajada sigue la ubicación de la capa oftálmica 201. Una búsqueda de gráfico que evoluciona la ruta 205 guiada al mantener el coste del enlace lo más bajo posible obligará a la ruta a evolucionar a lo largo de la parte inferior de la zona rebajada, siguiendo así a la capa oftálmica 201.

Antes de proceder a convertir esta imagen cualitativa de las Figuras 4A-C en un método cuantitativo y rápido, las Figuras 5A-C demuestran diferentes definiciones de nodos y enlaces en diferentes formas de realización. En la Figura 5A, los nodos 210 incluyen elementos de generación de imágenes tales como píxeles del sistema de generación de imágenes 10. En algunas formas de realización, los enlaces 220 no necesitan tener formas de realización físicas, pueden ser objetos matemáticos, completando la definición del gráfico de imagen. La Figura 5B ilustra una forma de realización, donde los elementos en los nodos tienen una extensión espacial mínima. En este caso, los nodos 210 son tan pequeños que son esencialmente los vértices del retículo de enlaces. Los nodos son las intersecciones o puntos

de conexión de los enlaces 220. Por último, la Figura 5C ilustra una forma de realización con el carácter opuesto: los elementos en los nodos 210 también pueden ser bastante grandes. Por ejemplo, los elementos pueden ser píxeles con un tamaño esencialmente igual al tamaño de los enlaces 220. En dichas formas de realización, los píxeles y, por lo tanto, los nodos 210 se tocan esencialmente entre sí. Una noción abstracta de los enlaces 220 todavía puede basarse en las líneas punteadas subyacentes a los píxeles cuadrados. Las manifestaciones físicas de los enlaces 220 pueden ser los bordes donde los píxeles próximos se tocan. En cierto sentido, los gráficos de la Figura 5B y de la Figura 5C son duales entre sí, con los enlaces y nodos pareciendo intercambiar una representación gráfica. Estas formas de realización son casos limitativos para la forma de realización de la Figura 5A con píxeles de tamaño intermedio que sirven como los nodos 210. En el presente documento, la terminología de "nodos y enlaces" puede referirse a cualquiera de las formas de realización de las Figuras 5A, 5B o 5C, así como a formas de realización equivalentes.

Las Figuras 6A-B ilustran una forma de realización del método 100. Se muestra la imagen 200 que incluye un salto brusco en la intensidad de la imagen, y una zona rebajada correspondiente en los datos característicos de la imagen, que ambos siguen la ubicación de la capa oftálmica 201 en la imagen 200. La Figura 6A muestra elementos del método 100 después de que la ruta 205 se haya actualizado en varias iteraciones. La ruta 205 resultante, o la ruta seleccionada 205s, se indica mediante la línea continua en negrita. En este caso, solamente se muestran los nodos y enlaces pertinentes del sistema de generación de imágenes 10 para mayor claridad.

Tal como se explicó con anterioridad, el método 100 comienza con la etapa de detección 110, tomando una imagen 200 de una zona oftálmica que implica la capa oftálmica 201 por el sistema de generación de imágenes 10. A continuación, está la etapa de construcción 120, que construye un gráfico de imagen de los nodos 210 (x,y) conectados por enlaces 220 (x,y) y los datos de imagen detectados 230 (x,y) que corresponden a los nodos 210 (x,y) o enlaces 220 (x,y). Una sección transversal direccional y de dichos gráficos de imágenes fue la que se muestra en la Figura 3C, y desarrollada en unos datos característicos de imagen basados en (x,y), denominados datos 240 (x,y), tal como se muestra en la Figura 4C.

La etapa 130 de realización de una búsqueda de gráfico heurístico para la ruta 205 puede incluir la etapa de asignación de costes de enlace/nodo 140, la asignación de costes de enlace a los enlaces 220 (x,y) del gráfico de imagen o costes de nodo a los nodos 210 (x,y) del gráfico de imagen, y una etapa de asignación de costes heurísticos 150, que asigna los costes heurísticos a al menos uno de entre los nodos y los enlaces. La etapa 150 de asignación de costes heurísticos se describirá con más detalles sustanciales en relación con la Figura 9 y las Figuras 10A-D. Para la descripción de las Figuras 6A-B y las Figuras 8A-D, se entiende que los costes heurísticos de las rutas se han calculado y asignado correctamente.

La Figura 6A ilustra que, después de asignar los costes de enlace o los costes de nodo, así como los costes heurísticos, la etapa de creación 160/(a) puede incluir la creación de rutas extendidas extendiendo una ruta seleccionada 205s desde su nodo frontal 260 (x,y) con enlaces de extensión 270 (x,y). La ruta seleccionada 205s por sí misma es la ruta 205 que resultó de realizar la etapa de selección 180/(c) de forma repetida e iterativa, en una secuencia de actualizaciones anteriores. El tratamiento de las rutas 205n no seleccionadas se describirá más adelante.

La siguiente etapa de determinación 170/(b) puede incluir determinar los costes de ruta de las rutas extendidas combinando los costes heurísticos de las rutas extendidas y los costes de la cadena de las rutas extendidas. En este caso, se recuerda que el coste heurístico de una ruta se puede definir como el coste heurístico de su nodo frontal, y el coste de la cadena de una ruta se puede definir como uno de entre una suma de los costes de enlace de los enlaces que constituyen la ruta, una suma de los costes de nodo de los nodos que componen la ruta, y una suma ponderada de los costes de enlace y de los costes de nodo de los enlaces y nodos de la ruta.

En algunas formas de realización, la etapa de determinación 170/(b) puede ser un método incremental que no recalcula los costes de ruta completos de las rutas extendidas en cada iteración. En cambio, la forma de realización puede calcular solamente las actualizaciones, o cambios, de los costes de la ruta, activados al extender la ruta seleccionada 205s con enlaces de extensión 270. En dicho método incremental, la etapa de determinación 170/(b) puede incluir el cálculo de los cambios del coste heurístico de la ruta seleccionada 205s y los cambios del coste de la cadena de la ruta seleccionada 205s, ambos causados por la extensión provisional de la ruta seleccionada 205s con los diversos posibles enlaces de extensión 270; y determinar los costes de las rutas extendidas provisionalmente actualizando el coste de las rutas 205s seleccionadas con una combinación de los cambios del coste heurístico y los cambios del coste de la cadena. La combinación puede ser una simple adición de los dos cambios, una suma ponderada o puede implicar un cálculo funcional.

En otras formas de realización, la etapa de determinación 170/(b) puede implicar un cálculo integral de los costes. En dichas formas de realización, los costes de cadena y los costes heurísticos de las rutas seleccionadas 205s, extendidas provisionalmente por varios posibles enlaces de extensión 270, se calculan de nuevo, sin referencia a los costes calculados en las etapas anteriores, o sin calcular un incremento.



La siguiente etapa de selección 180/(c) puede incluir seleccionar una ruta de menor coste, eligiendo la ruta de menor coste a partir de las rutas recientemente extendidas y de las rutas 205n no seleccionadas almacenadas, como una ruta seleccionada actualizada 205s.

5 La Figura 6B ilustra que el resultado de la etapa de selección 180/(c) puede ser una ruta seleccionada actualizada 205s extendiendo la ruta seleccionada anterior desde su nodo frontal 260 (x,y) con el enlace de extensión 270s (x,y) recientemente seleccionado. En algunos casos, la ruta de menor coste será la ruta seleccionada 205s con anterioridad, extendida por uno de los enlaces de extensión propuestos provisionalmente 270s (x,y). En otros casos, por ejemplo, cuando la ruta seleccionada se encuentra con una zona de alto coste, la ruta de menor coste puede ser, en cambio, una de las rutas no seleccionadas previamente 205n. Estas rutas 205n no seleccionadas no se seleccionaron en las etapas anteriores porque sus costes pueden haber sido más altos que los de las rutas finalmente seleccionadas, pero si en la etapa actual la ruta seleccionada solamente puede extenderse con enlaces de extensión de mayor coste, entonces el coste de una de las rutas 205n previamente no elegidas puede resultar ser la ruta de menor coste. En dichos casos, la ruta almacenada no seleccionada 205n con el coste más bajo se seleccionará en la etapa de selección 180/(c). En cierto sentido, la selección de una ruta 205n previamente no seleccionada se puede considerar como el método de búsqueda de gráfico 100 que vuelve sobre sus etapas una vez que encuentra un obstáculo de alta energía.

20 El método 100 también puede incluir la etapa de almacenamiento 190/(d): almacenar las rutas no seleccionadas 205n y sus costes, no seleccionados en la etapa de selección recién ejecutada 180/(c). Los costes de estas rutas 205n no seleccionadas se recuperarán en las etapas de selección posteriores 180/(c) durante las iteraciones posteriores del método 100. Una vez que los costes de las rutas 205n no seleccionadas se recuperen en una etapa de selección posterior 180/(c), la selección de la ruta de menor coste se puede realizar eligiendo la ruta de menor coste seleccionada de la ruta seleccionada 205s extendida provisionalmente desde su nodo frontal 260 con los diversos enlaces de extensión 270, y de las rutas 205n no seleccionadas almacenadas recuperadas. La ruta de menor coste seleccionada se puede identificar como la ruta seleccionada actualizada 205s. La repetición de las etapas (a)-(d), o 160-190, puede formar el bloque iterativo repetitivo del método 100 que extiende la ruta seleccionada 205s a través de la imagen 200.

30 En las formas de realización descritas, solamente se proponen provisionalmente nuevos enlaces de extensión 270 que extienden la ruta seleccionada 205s desde su nodo frontal 260. Sin embargo, la selección de la ruta de menor coste compara los costes de estas rutas extendidas provisionalmente también con los costes de todas las rutas 205n previamente no seleccionadas almacenadas. En las etapas de selección 180/(c), se puede seleccionar una ruta 205n almacenada, previamente no seleccionada, que puede diferir de la ruta 205s previamente seleccionada en varios enlaces. Este aspecto permite que el método 100 redirija la búsqueda de la ruta óptima hacia nuevas direcciones, si la ruta seleccionada 205s evoluciona hacia un área desfavorable o choca con un obstáculo. Dichos obstáculos pueden ser una burbuja, una zona de alto ruido, un artefacto de generación de imágenes o un pliegue de capa, entre otros.

40 En el lenguaje de la Figura 4C, la zona rebajada de menor coste puede tener hendiduras u orquillas, en donde dicha zona rebajada se divide en dos. A medida que se realiza el método de búsqueda 100, una de estas zonas rebajadas obtiene la ruta seleccionada y la ruta seleccionada 205s, en esa zona rebajada, se desarrolla o avanza todavía más. Sin embargo, en una etapa posterior, esta ruta 205s seleccionada puede encontrar una zona de alto coste. En dichos casos, la etapa de selección 180/(c) que también compara los costes de extensión de la ruta seleccionada 205s con los costes de rutas almacenadas previamente no seleccionadas 205n hace posible que el método 100 vuelva sobre sus etapas hasta la última bifurcación y seleccione la otra zona rebajada para una mayor exploración. En algunos casos, la ruta 205n previamente no seleccionada puede no ser siquiera una bifurcación en la zona rebajada, sino en cambio un "paso de montaña" en la parte lateral de la zona rebajada, protegida solamente por un bajo coste.

50 Para completar la descripción, en algunas formas de realización del método 100, los enlaces de extensión 270 también pueden proponerse provisionalmente que se extiendan desde algunos de los nodos laterales desde la ruta seleccionada 205s, no solamente desde su nodo frontal 260. Dichos métodos tardan más tiempo puesto que el número de enlaces de extensión propuestos puede ser considerablemente mayor. Su rendimiento que consume más tiempo puede ser equilibrado por su utilidad para explorar más oportunidades para evolucionar la ruta 205s seleccionada. En algunas de estas formas de realización se puede llegar a un compromiso, donde solamente un número limitado de nodos se extiendan provisionalmente con enlaces de extensión.

55 En resumen, algunas formas de realización del método 100, mostradas en la Figura 2A, pueden incluir las etapas de repetición (a)-(d) de forma iterativa. Otras formas de realización, mostradas en la Figura 2B, pueden no incluir el almacenamiento de las rutas 205n no seleccionadas y sus costes, y puede proponer extensiones solamente comenzando desde el nodo frontal 260 de las rutas 205s seleccionadas. Dichas formas de realización repiten solamente las etapas (a)-(c) en la Figura 2B.

60 Cualquiera de estas formas de realización puede extender la ruta seleccionada 205s hasta que se alcanza un criterio final, e identificar la ruta seleccionada extendida 205s alcanzada por el método 100 como correspondiente a la imagen de la capa oftálmica 201. El criterio final puede ser que la ruta seleccionada 205s alcance un borde de la imagen 200. La imagen se puede mostrar, por ejemplo, en una pantalla 40.

- 5 La etapa 190/(d) puede incluir, además, marcar el nodo frontal 260 de la ruta seleccionada 205s (nodo frontal 260 antes de que la ruta seleccionada 205s fuera extendida por un enlace de extensión 270), como "examinado". En futuras iteraciones, los nodos marcados como "examinados" no se examinarán nuevamente. Este aspecto puede reducir o eliminar el retorno a rutas analizadas previamente, haciendo que el método 100 progrese con las extensiones de manera más eficiente.
- 10 Las Figuras 7A-B ilustran un método 300 que es una forma de realización del método 100, formulado de una manera que articula la repetición del bloque iterativo o ciclo de las etapas (a)-(c) o (a)-(d) mostrando expresamente el índice, etiqueta o número de la iteración. La Figura 7A ilustra que una forma de realización del método de procesamiento de una imagen oftálmica 300 puede incluir:
- 15 310 tomar una imagen 200 de una zona oftálmica que implica una capa oftálmica mediante un sistema de generación de imágenes 10;
- 20 320 - utilizar el procesador de imagen 30 para construir un gráfico de imagen, que comprende nodos 210 conectados por enlaces 220 y datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de entre los nodos y enlaces, a partir de la imagen 200; y
- 330 - realizar una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponda a una imagen de la capa oftálmica 201 mediante
- 340 - asignando al menos uno de los costes de enlace a los enlaces 220 del gráfico de imagen y los costes de nodo a los nodos 210 del gráfico de imagen;
- 25 350 - asignando costes heurísticos a al menos uno de entre los nodos y los enlaces del gráfico de imagen;
- 360/(a): creando rutas extendidas  $(N+1)^a$  extendiendo una N-ésima ruta seleccionada desde su N-ésimo nodo frontal con enlaces de extensión  $(N+1)^a$ ;
- 30 370/(b): determinando los costes de ruta de las rutas extendidas  $(N+1)^a$  combinando al menos uno de los costes de enlace y costes de nodo de las rutas extendidas  $(N+1)^a$  con costes heurísticos de  $(N+1)^a$  rutas extendidas, en donde el coste heurístico de una ruta es el coste heurístico de su nodo frontal, el coste de enlace de la ruta es una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta y el coste de nodo de la ruta es una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta;
- 35 380/(c): seleccionando una ruta de menor coste, elegida entre las rutas extendidas  $(N+1)^a$  y de rutas almacenadas no seleccionadas, tal como la ruta seleccionada  $(N+1)^a$ ; y
- 40 390/(d) - almacenando  $(N+1)^a$  rutas no seleccionadas y sus costes, y marcar el N-ésimo nodo frontal como examinado, en donde
- el método comprende repetir las etapas (a)-(d) de forma iterativa.
- 45 La Figura 7B ilustra que una forma de realización del método de procesamiento de una imagen oftálmica 300 puede incluir las etapas anteriores 310-380(c), pero no la etapa de almacenamiento 390/(d). Esta forma de realización también modifica la etapa 380/(c) ya que esa etapa no incluye las rutas almacenadas en la etapa de selección 380/(c). En analogía a la Figura 2B, esta forma de realización solamente hace crecer la ruta seleccionada 205s desde su nodo frontal 260 mediante enlaces de extensión 270.
- 50 Las Figuras 8A-D ilustran el método 300, después de haber realizado las etapas 310-350 o, de manera análoga, después de que se haya realizado las etapas 110-150 del método 100.
- La Figura 8A ilustra que N iteraciones del método 100/300 evolucionaron la ruta seleccionada 205s en la N-ésima ruta seleccionada 205s, finalizando en un N-ésimo nodo frontal 260. La etapa de creación 160/360/(a) puede incluir la creación de  $(N+1)^a$  rutas extendidas extendiendo (provisionalmente) la N-ésima ruta seleccionada 205s desde su N-ésimo nodo frontal 260 con  $(N+1)^a$  enlaces de extensión 270.
- 55 A continuación, la etapa de determinación 170/370/(b) puede incluir la determinación de los costes de ruta de las  $(N+1)^a$  rutas extendidas.
- 60 La Figura 8B ilustra que la etapa de selección 180/380/(c) puede incluir la selección de la ruta de coste menor elegida entre las rutas extendidas  $(N+1)^a$  y desde las rutas 205n no seleccionadas almacenadas, tal como la  $(N+1)^a$  ruta seleccionada 205s. En la Figura 8B, la etapa de selección 180/380/(c) seleccionó la  $(N+1)^a$  ruta seleccionada 205s como la N-ésima ruta seleccionada 205s extendida por el enlace de extensión seleccionado 270s  $(\Delta x, 0)$  desde su N-ésimo nodo frontal 260  $(x,y)$  en la dirección x por una distancia  $\Delta x$ .
- 65

En la etapa de almacenamiento 190/390/(d), las rutas no seleccionadas  $(N+1)^a$  y sus costes pueden almacenarse. Además, el N-ésimo nodo frontal 260  $(x,y)$  de la N-ésima ruta seleccionada 205s puede marcarse como "examinado". Los nodos marcados como "examinados" pueden no examinarse en futuras iteraciones.

5 Las Figuras 8C-D ilustran que la etapa de selección 180/380/(c) también puede dar como resultado la selección de una ruta 205n previamente no seleccionada, por ejemplo, en la etapa  $(N+2)^a$ . Después de que se hayan realizado las etapas (a)-(d) de la iteración  $(N+1)^a$ , mostrada en las Figuras 8A-B, la ruta 205s seleccionada  $(N+1)^a$  finalizó en el nodo frontal 260  $(N+1)^a$  con coordenadas  $(x+\Delta x,y)$ . De este modo, comienza una nueva iteración  $(N+2)^a$  del método 100/300. La repetición de la etapa de creación 160/360/(a) implica la creación de  $(N+2)^a$  rutas extendidas extendiendo la  $(N+1)^a$  ruta seleccionada 205s con  $(N+2)^o$  enlaces de extensión 270. A continuación, se repite la etapa determinante 170/370/(b), que determina los costes de ruta de las  $(N+2)^a$  rutas extendidas.

15 Una vez que se han determinado los costes de la ruta en la etapa de determinación 170/370/(b), la etapa de selección posterior 180/380/(c) implica seleccionar la ruta de coste más pequeña de las rutas extendidas  $(N+2)^a$  y de las rutas almacenadas no seleccionadas, para seleccionar la  $(N+2)^a$  ruta seleccionada 205s. La Figura 8D ilustra el caso cuando el coste de ruta menor, entre las rutas examinadas, pertenece a una ruta no seleccionada previamente que consiste en la N-ésima ruta seleccionada, extendida desde su nodo frontal 260  $(x,y)$  (véase Figura 8A) con  $(N+2)^o$  enlace de extensión 270  $(\Delta x, \Delta y)$  en diagonal. La Figura 8D ilustra este caso, cuando el coste de la ruta de esta ruta no seleccionada con anterioridad, pero ahora seleccionada de nuevo 205n que termina con el enlace de extensión diagonal 270  $(\Delta x, \Delta y)$  tiene un coste de ruta más bajo que cualquiera de las rutas recientemente extendidas, y por lo tanto se selecciona como la  $(N+2)^a$  ruta seleccionada 205s.

20 A través de este ejemplo, la  $(N+2)^a$  que realiza las etapas (a)-(d), mostradas en las Figuras 8C-D, demuestra que el método 100/300 puede evolucionar la ruta 205 no siempre extendiéndola desde el nodo frontal de la ruta 260 que se seleccionó en la etapa anterior. En cambio, el método 100/300 a veces puede volver sobre algunas de sus etapas y evolucionar o expandir la ruta 205 no desde el nodo frontal 260, sino seleccionando una de las rutas 205n que no se seleccionó en una etapa anterior.

30 La Figura 9 ilustra varias formas de realización de la asignación de una etapa de coste heurístico 150 o 350. En la forma de realización 150a, la etapa de asignación puede incluir determinar una distancia del nodo 210 o enlace 220 desde un borde de la imagen 200 por el procesador de imágenes 30, y definir el coste heurístico del nodo 210 o enlace 220 como una función de la distancia determinada. En algunos casos, el coste heurístico puede ser simplemente proporcional a la distancia desde el borde.

35 La Figura 10A ilustra esta forma de realización 150a. El coste de extender la ruta seleccionada 205s con el enlace de extensión 270 puede incluir añadir el coste de enlace del enlace de extensión 270 y un coste heurístico del nodo frontal 260 recientemente propuesto. El coste heurístico puede derivarse de la distancia 410, o  $d$ , del recién propuesto nodo frontal 260 desde un borde 205 de la imagen 200. En una forma de realización, el coste heurístico se puede calcular a partir de las longitudes correspondientes, medidas en unidades del espacio reticular del retículo de nodos 210, tal como  $a$  o  $\Delta x$ . En algunas formas de realización, esta forma de calcular el coste heurístico se pone en práctica midiendo la distancia 410 del nodo frontal 260 desde el borde 205 como el número de píxeles de imagen.

45 En el caso ilustrado, la longitud del enlace de extensión diagonal es la raíz cuadrada 2 en  $\Delta x$ , o  $a$ , la unidad del espaciado reticular del retículo cuadrado, mientras que la longitud de la distancia al borde 410 es la distancia  $d$  en las mismas unidades de  $\Delta x$ :  $Nd=d/\Delta x$ . En general, el coste puede ser cualquier función  $f_{\text{coste}}$  de la distancia:

$$f_{\text{total}}^{\text{coste}} =$$

50  $f_{\text{enlace}}^{\text{coste}}(\sqrt{2}) + \alpha f_{\text{heurístico}}^{\text{coste}}(Nd)$ . En algunas formas de realización,  $f(x)$  puede ser una función monótona. En algunas formas de realización, puede ser simplemente la longitud misma:  $f(x)=x$ . Además, en diversas formas de realización, la función de coste de enlace y la función de coste heurístico se pueden combinar de diferentes maneras. Por ejemplo, los costes heurísticos se pueden añadir a los costes de enlace con un factor de ponderación  $\alpha$ . En este caso, diferentes valores de  $\alpha$  pueden afectar la velocidad de convergencia del método de búsqueda. En algunas formas de realización,  $\alpha$  puede ser 1, simplemente añadiendo la longitud de la cadena de la ruta a la distancia desde el borde 205. Evidentemente, un pequeño valor  $\alpha < 1$  caracteriza las formas de realización que dan una ponderación limitada al coste heurístico, mientras que un valor grande  $\alpha > 1$  significa que el coste heurístico tiene una ponderación considerable en el algoritmo de búsqueda.

60 Volviendo a la Figura 9, otra forma de realización 150b de la etapa de asignación 150 puede incluir determinar una imagen de capa de la capa oftálmica basada en una imagen previamente registrada de la capa oftálmica por el procesador de imagen, y definir el coste heurístico de un nodo o un enlace basado en una longitud de ruta desde al menos uno de entre el nodo y el enlace a un borde de la imagen a lo largo de la imagen de capa.

La Figura 10B ilustra una forma de realización de 150b. En la forma de realización ilustrada de 150b, una imagen de capa 420 generada previamente puede utilizarse para crear una imagen de capa de la capa oftálmica 201 por el procesador de imagen 30. La función de coste heurístico puede generarse como una distancia 430 del enlace de extensión considerado 270 o nodo frontal propuesto 260 desde el borde 205 de la imagen 200, pero no a lo largo de una línea recta tal como en la forma de realización 150a, sino a lo largo de la imagen de capa generada previamente 420. Como en otras formas de realización, el coste heurístico puede ser una función  $f_{\text{cost}}(d)$  de la distancia  $d$  430, y puede añadirse al coste del enlace o al coste del nodo con un factor de ponderación  $\alpha$ , o combinarse de otra manera.

En algunas formas de realización de 150b, para hacer una conexión entre la ruta 205 actualmente buscada y la imagen de capa 420 previamente registrada que permite medir la distancia 430 a lo largo de la imagen de capa previamente registrada, la creación de la etapa de imagen de capa puede incluir registrar la imagen de capa previamente registrada 420 en la imagen oftálmica 200 actualmente buscada. En algunas formas de realización, la imagen registrada previamente puede ser del mismo tipo o de la misma modalidad que la imagen oftálmica 200 actualmente analizada. En algunos casos, ambas imágenes pueden ser imágenes OCT, o ambas pueden ser imágenes de ultrasonido. Sin embargo, las dos imágenes podrían no estar bien alineadas entre sí, puesto que el eje óptico del ojo suele estar orientado de forma diferente cuando se registró la imagen de la capa anterior y cuando se tomó la imagen oftálmica actual 200. Además, la imagen anterior y la presente se pueden trasladar lateralmente, girar o ponerse a escala de forma relativa entre sí. El registro de la imagen previamente registrada con la imagen de capa oftálmica 200 puede reducir o corregir estas diferencias y mejorar así la precisión del cálculo del coste heurístico.

La Figura 9 ilustra que algunas formas de realización 150c de la etapa de asignación 150 pueden incluir generar un gráfico de imagen a escala con una primera resolución menor que una resolución del gráfico de imagen, realizar una búsqueda de gráfico no heurístico para la ruta en el gráfico de imagen a escala para determinar una ruta a escala, y asignar los costes heurísticos de la búsqueda de gráficos heurísticos utilizando la ruta a escala.

La Figura 10C ilustra que algunas formas de realización 150c1 de la etapa de asignación 150c de utilizar la ruta a escala pueden incluir generar el gráfico de imagen a escala 440 que tiene una resolución más baja que el gráfico de imagen original. El gráfico de imagen a escala 440 se puede crear, por ejemplo, seleccionando un subconjunto de los datos de imagen detectados 230 (x,y), o datos característicos de imagen 240 (x,y) de la imagen 200, tomada por el sistema de generación de imágenes 10. El subconjunto se puede seleccionar mediante granulación gruesa o decimación de los datos de imagen detectados 230 o la imagen de característica 240. Los ejemplos incluyen seleccionar los datos de imagen detectados 230 o los datos de imagen de característica 240 que corresponden a cada quinto o cada décimo píxel, enlace o nodo. En la Figura 10C, el gráfico de imagen a escala es el conjunto de datos de imagen detectados solamente para los nodos indicados por puntos negros completamente rellenos.

La generación del gráfico de imagen a escala 440 puede seguirse determinando una ruta a escala 450, o una imagen de capa a escala 450 con una búsqueda no heurística del gráfico de imagen a escala 440. Estas etapas pueden seguirse comenzando la búsqueda de ruta heurística de la etapa 130/330.

La Figura 10C ilustra que, dentro de la etapa de búsqueda heurística, la etapa de asignación de costes heurísticos 150/350 puede incluir proyectar el nodo frontal 260 de la ruta 205 sobre la ruta a escala 450, y utilizar una distancia 460 de la proyección del nodo frontal 260 desde el borde 205 a lo largo de la ruta a escala 450 como el coste heurístico del nodo frontal 260. El término "proyección" se utiliza aquí en un sentido amplio. Puede referirse a conectar el nodo frontal 260 con la ruta a escala 450 de diferentes maneras.

La Figura 10D ilustra una forma de realización relacionada 150c2, en donde el nodo frontal 260 se proyecta nuevamente o se conecta a la ruta a escala 450. En esta forma de realización, el coste heurístico se calcula en base a la distancia 470 del nodo frontal 260 desde la ruta a escala 450. Por último, en algunas formas de realización, las técnicas de la Figura 10C y de la Figura 10D puede combinarse y el coste heurístico puede basarse en la distancia 470 del nodo frontal 260 desde la ruta a escala 450 en combinación con la distancia 460 de la proyección del nodo frontal 260 desde el borde 205 a lo largo de la ruta a escala 450.

En cualquiera de las puestas en práctica anteriores 150/350/(a)-(c), antes de realizar la búsqueda de gráfico heurístico, se puede realizar una etapa de calibración. La etapa de calibración puede incluir generar una tabla de funciones heurísticas y almacenar la tabla de funciones heurísticas generadas en una memoria adecuada. Durante la búsqueda heurística, la función heurística pre-almacenada puede ser objeto de lectura desde la memoria.

Las Figuras 11A-C ilustran una forma de realización del método 100/300. Esta forma de realización se realiza en una pequeña matriz de píxeles, numerados del 1 al 12. La búsqueda heurística se dirige a encontrar una ruta 205 que conecte, por ejemplo, el píxel inicial 6 al píxel final 8. En esta forma de realización, el poder de la búsqueda heurística se demuestra en la reducción del número de etapas necesarias para la búsqueda heurística en relación con el número de etapas necesarias para una búsqueda no heurística. Como una puesta en práctica particular de las formas de realización relacionadas con 150b o 150c, la búsqueda en las Figuras 11A-C se dirige a encontrar la ruta 205 que conecta el píxel 6 al píxel 8 con la siguiente puesta en práctica:

(i) la construcción del gráfico de imagen 120/320 incluye la definición de enlaces que conectan próximos directos y próximos diagonales de la matriz de píxeles o nodos;

5 (ii) la asignación de los costes de enlace 140/340 incluye la asignación de la longitud del enlace por 10: coste de enlace de próximo directo=10, coste de enlace de próxima diagonal=14 (la raíz cuadrada de 2 es aproximada como 1,4), y no utilizar costes de nodos;

10 (iii) la asignación de los costes de enlace 140/340 también incluye la asignación de costes de enlace a enlaces que conectan cualquier píxel a los píxeles 7 y 11 como prohibitivamente alto. Estos son ejemplos de las zonas de alto coste discutidas con anterioridad.

(iv) la asignación de los costes heurísticos 150/350 se describirá más adelante.

15 Se introducen las siguientes abreviaturas: los costes de enlace se indican mediante LC. Las rutas se refieren a los nodos que conectan: (i-x-j) conecta los nodos i y j a través del nodo x. El coste de la ruta que implica a los píxeles i y j después de N iteraciones se indica por  $C_N(i-j)$ , el coste de la ruta que conecta i con j a través de x es  $C_N(i-x-j)$ .

20 Las Figuras 11B-1 y 11B-2 ilustran la puesta en práctica de las etapas (a)-(d) sin los costes heurísticos para fines de comparación. A continuación, la Figura 11C ilustra la misma búsqueda realizada, esta vez con los costes heurísticos también utilizados. Se demostrará que la búsqueda heurística de la Figura 11C encuentra la ruta de menor coste desde el píxel inicial 6 hasta el píxel final 8 mucho más rápido.

25 Conviene señalar que este ejemplo es una variante de la búsqueda de una ruta de borde a borde 205. Esta puesta en práctica es una búsqueda de una ruta de punto a punto. Sin embargo, la comparación de las búsquedas heurísticas y no heurísticas también se puede demostrar en este ejemplo.

30 Los aspectos de la búsqueda no heurística incluyen los siguientes. Indiquemos la ruta que resultó de la N-ésima etapa tal como (i-x), con su nodo frontal 260 en x. En este caso, i puede referirse a una cadena de nodos, que finaliza en el nodo i. En la N-ésima etapa de almacenamiento 190/390/(d), los costes de las rutas no seleccionadas, incluido el coste de las rutas que comenzaron desde i, pero finalizaron en un nodo diferente j y no fueron seleccionados, se almacenan como  $C_N(i-j)$ .

35 En la etapa  $(N+1)^a$ , se proponen nuevos enlaces de extensión 270 para extender la N-ésima ruta desde su nodo frontal x/260. Al ejecutar la etapa de selección 180/380/(c), los costes de las rutas extendidas desde el nodo frontal x/260 se comparan con los costes de las rutas 205n almacenadas, previamente no seleccionadas, y se selecciona la ruta de menor coste. En esta etapa de selección 180/380/(c), a veces puede haber más de una ruta con el mismo coste más bajo. En dichos casos, se debe adoptar un procedimiento de selección. En algunas puestas en práctica, si el coste de la ruta de la  $(N+1)^a$  ruta (i-x-j), recientemente extendida, es igual al coste de la ruta N-ésima no seleccionada (i-j) almacenada, donde estas dos rutas comienzan y finalizan en los mismos nodos i y j:  $C_{(N+1)}(i-x-j)=C_N(i-j)$ , luego se selecciona la N-ésima ruta almacenada (i-j) en lugar de la nueva ruta extendida provisionalmente (i-x-j). Obviamente, si el coste  $C_{(N+1)}(i-x-j)$  de la nueva ruta extendida provisionalmente (i-x-j) es menor que el coste  $C_N(i-j)$  de la ruta almacenada (i-j), entonces se selecciona la ruta recientemente extendida (i-x-j). Por supuesto, cualquiera que sea la ruta seleccionada como la ruta de menor coste para conectar los nodos i y j, el coste de esta ruta seleccionada (i-j) o (i-x-j) aún debe compararse con los costes de las otras rutas extendidas y almacenadas para seleccionar la ruta general de menor coste en esta  $(N+1)^a$  seleccionando la etapa 180/380/(c).

En las Figuras 11B-C, para cada una de las N-ésimas etapas, los costes  $C_N$  de las rutas consideradas se enumeran en el cuadro correspondiente. La ruta de menor coste se indica poniendo en negrita la ruta.

50 Otro aspecto de esta puesta en práctica es que a veces más de una ruta puede tener el mismo coste más bajo incluso después de la puesta en práctica de selección descrita con anterioridad. En dicha situación, se puede utilizar un algoritmo de rotura de igualdad. Se puede utilizar una amplia variedad de algoritmos de rotura de igualdad, ya que puede haber cierta libertad al seleccionar este algoritmo de rotura de igualdad. En el ejemplo ilustrado, si dos rutas tienen los mismos costes, entonces se selecciona esa ruta cuyo nodo frontal está más cerca de la esquina superior izquierda, etiquetada como 1. Si esta etapa de rotura de igualdad produce más de una ruta de coste más bajo, entonces necesita utilizarse una etapa adicional de rotura de igualdad. En algunas formas de realización, dichas igualdades se pueden romper usando una segunda distancia, por ejemplo, la distancia desde el borde superior de la imagen 200. Otras formas de realización pueden emplear otras reglas o distancias de rotura de igualdad primera y segunda, incluida la distancia desde el borde izquierdo o desde el borde derecho de la imagen. En aplicaciones reales, los procedimientos específicos de rotura de igualdad tienen una importancia limitada, ya que los costes de los enlaces individuales se establecen por datos de imagen o intensidad que pueden tomar muchos valores y, por lo tanto, es muy raro que dos rutas tengan los mismos costes, e incluso más raro que entre estas rutas de igual coste un procedimiento de rotura de igualdad de una única etapa no podría seleccionar una ruta única seleccionada.

65 En el siguiente ejemplo, la ruta de menor coste seleccionada se indica en negrita. Cuando esta ruta se selecciona mediante un procedimiento de rotura de igualdad, se indica con un asterisco \*.

El ejemplo de búsqueda no heurística de la Figura 11B-1 y de la Figura 11B-2 se describe a continuación con algunos detalles.

5           **Etapa 0:** asignar costes de enlace

**Costes (Etapa 0):** coste de enlace LC del próximo adyacente=10; coste de enlace LC de próxima diagonal=14.

10           **Etapa 1:**

1a. crear las 1ª rutas extendidas (6-i) vinculando el nodo 6 con los enlaces de la primera extensión a los nodos i;

15           **1b.** determinar los costes de ruta  $C_1(6-i)$  de las 1ª rutas extendidas;

**1c.** seleccionar la ruta de coste más pequeña elegida entre las 1ª rutas extendidas, como la 1ª ruta seleccionada: (6-2)\*;

20           **1d.** almacenar costes de rutas no seleccionadas; marcar el nodo **6** como examinado.

\* En la etapa **1c**, los costes de las rutas (6-2), (6-5) y (6-10) fueron todos los mismos, 10, tal como se muestra en la siguiente lista de costes. Además, los nodos frontales 2 y 5 incluso tienen la misma distancia desde el nodo 1 de la esquina superior izquierda. Por lo tanto, ambas etapas del procedimiento de rotura de igualdad descrito con anterioridad se habían empleado para seleccionar (6-2).

**Costes (Etapa 1):**

- coste de 1ª ruta extendida:

30            $C_1(6-1)=14$

**$C_1(6-2)=10$**

35            $C_1(6-3)=14$

$C_1(6-5)=10$

40            $C_1(6-9)=14$

$C_1(6-10)=10$

**Etapa 2:**

45           **2a.** crear la 2ª ruta extendida (6-2-i) extendiendo la 1ª ruta seleccionada (6-2) con enlaces de 2ª extensión a los nodos i;

**2b.** determinar los costes de ruta  $C_2(6-2-i)$  de la 2ª ruta extendida; extender la ruta (6-2) a (6-2-i) solamente si  $C_2(6-2-i) < C_1(6-i)$ ;

50           **2c.** seleccionar la ruta de coste más pequeña elegida de la 2ª ruta extendida y de las rutas almacenadas no seleccionadas, tal como la 2ª ruta seleccionada: **(6-5)\***;

55           **2d.** almacenar costes de rutas no seleccionadas; marcar el nodo **2** como examinado.

\* La ruta (6-5) y la ruta almacenada (6-10) tienen el mismo coste más bajo. El procedimiento de rotura de igualdad seleccionó la ruta seleccionada (6-5), ya que el nodo frontal 5 está más cerca del nodo 1 que del nodo 10.

**Costes (Etapa 2):**

60           - coste de la 2ª ruta extendida:

$C_2(6-2-1)=20$ , seleccionar  $C_1(6-1)=14$

65            $C_2(6-2-3)=20$ , seleccionar  $C_1(6-3)=14$

$C_2(6-2-5)=24$ , seleccionar  **$C_1(6-5)=10$**

- **costes de ruta almacenados:** rutas no seleccionadas de la etapa 1.

5 **Etapla 3:**

**3a.** crear la 3ª ruta extendida (6-5-i) extendiendo la 2ª ruta seleccionada (6-5) con enlaces de 3ª extensión a los nodos i;

10 **3b.** determinar los costes de ruta  $C_3(6-5-i)$  de las 3ª rutas extendidas; extender la ruta (6-5) a (6-5-i) solamente si  $C_3(6-5-i) < C_2(6-i)$ ;

15 **3c.** seleccionar la ruta de coste más pequeña elegida entre la 3ª ruta extendida y las rutas almacenadas no seleccionadas, tal como la 3ª ruta seleccionada: **(6-10)**;

**3d.** almacenar costes de rutas no seleccionadas; marcar el nodo 5 como examinado.

**Costes (Etapla 3):**

20 - **coste de la 3ª ruta extendida:**

$C_3(6-5-1)=20$ , seleccionar  $C_1(6-1)=14$

$C_3(6-5-9)=20$ , seleccionar  $C_1(6-9)=14$

25  $C_3(6-5-10)=24$ , seleccionar  **$C_1(6-10)=10$**

- **costes de ruta almacenados:** rutas no seleccionadas de las etapas 1-2.

30 **Etapla 4:**

**4a.** crear la 4ª ruta extendida (6-10-i) extendiendo la 3ª ruta seleccionada (6-10) con los enlaces de la 4ª extensión a los nodos i;

35 **4b.** determinar los costes de ruta  $C_4(6-10-i)$  de la 4ª ruta extendida; extender la ruta (6-10) a (6-10-i) solamente si  $C_4(6-10-i) < C_3(6-i)$ ;

40 **4c.** seleccionar la ruta de coste más pequeña elegida entre la 4ª ruta extendida y las rutas almacenadas no seleccionadas, tal como la 4ª ruta seleccionada: (6-1)\*;

**4d.** almacenar costes de rutas no seleccionadas; marcar el nodo 10 como examinado.

45 \* De nuevo hay dos rutas de menor coste: rutas almacenadas (6-9) y (6-1). El nodo frontal 1 está más cerca de la esquina superior izquierda (de hecho, coincide con él), la ruta (6-1) se selecciona mediante el procedimiento anterior de rotura de igualdad en la etapa de selección 180/380/(c).

**Costes (Etapla 4):**

- **4ª ruta extendida:**

50  $C_4(6-10-9)=24$ , seleccionar  $C_1(6-9)=14$

- **costes de ruta almacenados:** rutas no seleccionadas de las etapas 1-3, incluido  **$C_1(6-1)=14$** .

55 **Etapla 5:**

**5a.** crear la 5ª ruta extendida (6-1-i) extendiendo la 4ª ruta seleccionada (6-1) con la 5ª extensión de enlaces a los nodos i;

60 **5b.** tener en cuenta que todos los nodos posibles i (2, 5, 6) se marcan como examinados, por lo que no hay 5ª rutas extendidas cuyos costes necesiten calcularse;

**5c.** seleccionar la ruta de menor coste de entre las rutas almacenadas, previamente no seleccionadas: (6-9)\*;

65 **5d.** marcar 1 como examinado.

\* De nuevo, hay dos rutas de menor coste (6-3) y (6-9). El procedimiento de rotura de igualdad seleccionado (6-9).

**Costes (Etapa 5):**

**- coste de la 5ª ruta extendida:**

no están permitidas las 5ª rutas extendidas, ya que todos los nodos que pueden conectarse al nodo 1: 2, 5, 6 ya estaban marcados como examinados.

**- costes almacenados:** rutas no seleccionadas de las etapas 1-4.

$$C_1(6-9)=14.$$

**Etapa 6:**

**6a.** crear la 6ª ruta extendida (6-9-i) extendiendo la 5ª ruta seleccionada (6-9) con los enlaces de la 6ª extensión a los nodos i;

**6b.** tener en cuenta que todos los nodos posibles i (5, 6, 10) se marcan como examinados, por lo que no hay 6ª rutas extendidas cuyos costes deben calcularse;

**6c.** seleccionar la ruta de menor coste de las rutas almacenadas, previamente no seleccionadas: (6-3);

**6d.** marcar 9 como examinado.

**Costes (Etapa 6):**

**- coste de la 6ª ruta extendida:**

no se permiten 6ª rutas extendidas, ya que 5, 6, 10 están todas marcadas como examinadas

**- costes almacenados:**

rutas no seleccionadas de las etapas 1-5.

$$C_1(6-3)=14$$

**Etapa 7:**

**7a.** crear la 7ª ruta extendida (6-3-i) extendiendo la 6ª ruta seleccionada (6-3) con los enlaces de la 7ª extensión a los nodos i;

**7b.** determinar los costes de ruta  $C_7(6-3-i)$  de la 7ª ruta extendida;

**a menos** que una de las 7ª rutas extendidas hayan alcanzado el nodo 8 objetivo. Si una 7ª ruta extendida alcanzó el nodo 8 objetivo, enviar/informar de la 7ª ruta extendida como imagen de la capa oftálmica: (6-3-8).

**Costes (Etapa 7):** (Puesto que la ruta extendida (6-3-8) alcanzó el nodo 8 objetivo, no es necesario realizar una selección basada en el coste, por lo que estos costes solamente se proporcionan para completar):

**- coste de la 7ª ruta extendida:**

$$C_7(6-3-4)=24$$

$$C_7(6-3-8)=28.$$

Las Figuras 11B-1 y la Figura 11B-2 ilustran que la búsqueda no heurística requiere realizar 16 evaluaciones de coste de ruta para encontrar la ruta (6-8) con el coste más bajo. Esta es la ruta (6-3-8) con un coste  $C_3(6-3-8)=28$ .

La Figura 11C contrasta esta búsqueda no heurística con una forma de realización del método de búsqueda heurística 100/300. En este caso la determinación de costes implica añadir un coste heurístico HC a los costes de enlace LC. En esta puesta en práctica, los costes heurísticos se asignan con una combinación de formas de realización 150a y 150b en la Figura 9: el coste HC de un enlace de extensión 220 se establece mediante la denominada "distancia diagonal" del nodo final del enlace de extensión 220 desde el nodo objetivo 8. La distancia diagonal de los nodos se puede calcular al menos de dos maneras:



(i) Determinar la ruta de menor coste entre el nodo y el nodo objetivo, asignando 10 a cada enlace horizontal o vertical, y 14 a cada enlace diagonal.

5 (ii) Cálculo:  $dx=|\text{nodo}(x) - \text{objetivo}(x)|$ ,  $dy=|\text{nodo}(y) - \text{objetivo}(y)|$ , y  $HC=10 * (dx+dy) - 6 * \min(dx, dy)$ . En este caso, el nodo (x) se refiere a la coordenada x del nodo, el objetivo (x) se refiere a la coordenada x del nodo objetivo, | ... | se refiere a tomar el valor absoluto del argumento ..., y  $\min(dx, dy)$  se refiere a tomar el menor de dx y dy. Estos dos procedimientos son equivalentes, ya que asignan el mismo coste HC a cada nodo.

10 Tal como se describió con anterioridad, estos costes heurísticos pueden calcularse previamente y almacenarse de modo que, durante la búsqueda real, estos valores de HC solamente necesiten recuperarse de la memoria. En otras puestas en práctica, es posible calcular los valores de HC como parte de la forma de realización del proceso de búsqueda, "en tiempo real". Un procesador y una memoria del procesador de imágenes 30 pueden utilizarse para este propósito.

15 Una vez que el coste HC de su nodo final se asigne a cada enlace como su coste HC, el enlace HC se combina con el coste del enlace del mismo enlace con una suma simple, o equivalente, con un factor de ponderación  $\alpha=1$ . Conviene señalar que, por simplicidad, en el cálculo de la distancia diagonal, los enlaces 7 y 11 no están excluidos.

20 Se muestra este procedimiento de asignación de costes heurísticos HC en el ejemplo de la Figura 11A. Por ejemplo,  $HC(1)=34$ , porque la distancia diagonal del nodo 1 desde el nodo 8 es igual a  $10 * (3+1) - 6 * \min(3, 1)=34$  según el método (ii). Esto, por supuesto, es igual a  $10+10+14$ , el HC por el método (i).

25 Una vez que se asignan los valores de HC, también se pueden determinar los costes de la ruta. Por ejemplo, usando el método (i),  $C(6-1)=48$ , porque el coste del enlace diagonal (6-1) es 14, y este valor se añade a  $HC(1)=34$ , el HC del nodo final del enlace (6-1), nodo 1. En otro ejemplo,  $C(6-9)=48$ , porque el coste del enlace para el enlace diagonal (6-9) es 14 y  $HC(9)=34$ , a través de  $10 * (3+1) - 6 * \min(3, 1)=34$ . En este caso, la ruta de menor coste entre 9 y el nodo objetivo 8 se determinó pasando por el nodo prohibido 11 o 7.

30 La Figura 11C ilustra el método de búsqueda cuando los costes heurísticos también se utilizan para guiar la búsqueda. Sus etapas se describirán con cierto detalle a continuación.

**Etapas 0:**

35 **0a.** asignar costes de enlace LC

**0b.** asignar costes heurísticos HC:  $HC=\text{distancia reticular diagonal desde el nodo al nodo objetivo 8}$

**Costes:**

40  $LC(\text{adj. } n^{\circ})=10$

$LC(\text{diag. } n^{\circ})=14$

45 y

$HC(1)=34$

$HC(2)=24$

50  $HC(3)=14$

$HC(4)=10$

55  $HC(5)=30$

$HC(6)=20$

$HC(9)=34$

60  $HC(10)=24$

**Etapas 1:**

65 **1a.** crear las 1ª rutas extendidas (6-i) enlazando el nodo 6 con los enlaces de la 1ª extensión a los nodos próximos i;

1b. determinar los costes de ruta  $C_1(6-i)$  de las 1ª rutas extendidas como  $C=LC+HC$ ;

5 1c. seleccionar la ruta de menor coste, elegida entre las 1ª rutas extendidas, tal como la 1ª ruta seleccionada: (6-3);

1d. almacenar los costes de rutas no seleccionadas y marcar el nodo 6 como examinado.

**Costes (Etapa 1):**

10

- coste de las 1ª rutas extendidas:

$C_1(6-1)=48$

15

$C_1(6-2)=34$

$C_1(6-3)=28$

20

$C_1(6-5)=40$

$C_1(6-9)=48$

$C_1(6-10)=34$

25

**Etapa 2:**

2a. crear la 2ª ruta extendida (6-3-i) extendiendo la 1ª ruta seleccionada (6-3) con enlaces de 2ª extensión a los nodos i;

30

2b. determinar los costes de ruta  $C_2(6-3-i)$  de las 2ª rutas extendidas; a menos que una 2ª ruta extendida alcance el nodo objetivo 8. Si la 2ª ruta extendida alcanzó el nodo 8 objetivo, enviar la 2ª ruta extendida como la imagen de la capa oftálmica: (6-3-8).

35

**Costes (Etapa 2):**

- costes de la 2ª ruta extendida:

$C_2(6-3-2)=48,$

40

seleccionar  $C_1(6-2)=34$

$C_2(6-3-4)=34$

45

**$C_2(6-3-8)=28$**

- costes de ruta almacenados:

rutas no seleccionadas de la etapa 1.

50

La Figura 11C ilustra que la búsqueda de ruta heurística por el método 100/300 requirió el cálculo de solamente 9 costes de ruta en lugar del cálculo de coste de 16 rutas requerido por el método no heurístico de la Figura 11B-1 y de la Figura 11B-2. Esta es una reducción importante del tiempo de cálculo y la demanda del sistema de generación de imágenes 10 y su procesador de imágenes 30, en particular y, por lo tanto, demuestra una ventaja importante de los métodos heurísticos 100/300 sobre los métodos no heurísticos.

55

La Figura 12 muestra capturas de pantalla de los diagnósticos de las búsquedas de ruta en una imagen OCT. El tamaño de la imagen 200 era de 1500x550 píxeles. El procesador de imágenes 30 incluía una estación de trabajo Lenovo D30 que ejecutaba un sistema operativo Windows 7 en dos procesadores Intel Xeon. El panel izquierdo muestra que una búsqueda de ruta no heurística requirió 0,24 segundos, mientras que el panel derecho muestra que una búsqueda de ruta heurística, de conformidad con las formas de realización del método 100/300 con precisión esencialmente equivalente, requirió solamente 0,04 segundos. Se utilizó el mismo procesador de cálculo en el procesador de imagen 20 para ambas búsquedas. Esta disminución de seis veces en el tiempo de cálculo es una ventaja importante del método 100/300.

60

65

Conviene señalar aquí que uno de los tipos de objetivos de imagen para los que el método 100/300 funciona particularmente bien son capas, tales como capas oftálmicas u otros objetos extendidos. Un aspecto común de estos

objetivos de imágenes de capa es el objetivo que se orienta, dirige, suaviza o se extiende de borde a borde de la imagen. Para dichos objetivos, las formas de realización anteriores del coste heurístico aumentan de manera importante la eficiencia de la búsqueda.

5 Si bien esta especificación contiene muchos detalles, estos no deben interpretarse como limitaciones en el alcance de la invención o de lo que pueda reivindicarse, sino más bien como descripciones de características específicas de formas de realización particulares. Algunas características que se describen en esta especificación en el contexto de formas de realización separadas también se pueden poner en práctica en combinación en una sola forma de realización. Por el contrario, varias características que se describen en el contexto de una sola forma de realización también pueden ponerse en práctica en múltiples formas de realización por separado o en cualquier subcombinación adecuada. Además, aunque las características pueden describirse con anterioridad como actuando en ciertas combinaciones e incluso reivindicarse inicialmente como tales, una o más características de una combinación reivindicada pueden en algunos casos eliminarse de la combinación, y la combinación reivindicada puede dirigirse a una subcombinación o variación de una subcombinación

10

15

**REIVINDICACIONES**

1. Un método (100, 300) para procesar una imagen oftálmica, comprendiendo el método:
- 5 detectar (110, 310) datos de imagen de una zona oftálmica que implica una capa oftálmica mediante un sistema de generación de imágenes;
- 10 construir (120, 320) un gráfico de imagen, que comprende nodos conectados por enlaces y los datos de imagen detectados correspondientes a al menos uno de los nodos y enlaces, mediante un procesador de imagen a partir de la imagen; y
- 15 realizar (130, 330) una búsqueda de gráfico heurístico para una ruta en el gráfico de imagen que corresponde a una imagen de la capa oftálmica
- asignando (140, 340) al menos uno de los costes de enlace a los enlaces del gráfico de imagen y los costes de nodo a los nodos del gráfico de imagen;
- asignando (150, 350) costes heurísticos a al menos uno de los nodos y los enlaces del gráfico de imagen;
- 20 en donde la asignación de los costes heurísticos comprende:
- determinar (150a) una distancia del al menos uno de un nodo (210) y un enlace (220) desde un borde de la imagen (200) por el procesador de imagen (30); y
- 25 definir el coste heurístico de al menos uno del nodo (210) y el enlace (220) como una función de la distancia determinada
- (a) crear (160, 360) rutas extendidas extendiendo una ruta seleccionada desde su nodo frontal con enlaces de extensión;
- 30 (b) determinar (170, 370) los costes de ruta de las rutas extendidas combinando los costes heurísticos de las rutas extendidas con los costes de cadena de las rutas extendidas, en donde los costes heurísticos de una ruta son el coste heurístico de su nodo frontal, y el coste de la cadena de una ruta es una de entre una suma de los costes de enlace de los enlaces de la ruta, una suma de los costes de nodo de los nodos de la ruta y una suma ponderada de los costes de enlace y los costes de nodo de los enlaces y nodos de la ruta;
- 35 (c) seleccionar (180, 380) una ruta de menor coste, elegida de las rutas extendidas y de las rutas no seleccionadas almacenadas, tal como una ruta seleccionada actualizada; y
- 40 (d) almacenar (190, 390) rutas extendidas no seleccionadas y sus costes, y marcar el nodo frontal de la ruta seleccionada como examinado; donde
- las etapas (a)-(d) se repiten de forma iterativa.
- 45 2. El método según la reivindicación 1, en donde la construcción del gráfico de imagen comprende:
- recibir datos de imagen detectados de la zona oftálmica desde el sistema de generación de imágenes; y
- 50 generar datos característicos de imagen a partir de los datos de imagen detectados por el procesador de imagen, en donde
- los datos característicos de la imagen corresponden al menos a uno de entre una intensidad, una fase, un gradiente y una textura de los datos de imagen detectados; y
- 55 la realización de la búsqueda de gráficos heurísticos comprende el uso de los datos característicos de la imagen para determinar al menos uno de entre los costes de enlace y los costes de nodo.
3. El método según la reivindicación 2, en donde:
- 60 los datos de imagen detectados están asociados con al menos uno de entre una intensidad de imagen, un estado de polarización, un color y una fase de una luz de imagen detectada.
4. El método según la reivindicación 2, en donde:
- 65 la construcción del gráfico de imagen comprende definir

los nodos del gráfico que corresponden a los píxeles del sistema de generación de imágenes, y

los enlaces del gráfico como enlaces que conectan los nodos;

5 la generación de los datos característicos de la imagen comprende

asociar una de entre una intensidad y una fase de los datos de imagen detectados con los píxeles que detectaron los datos de imagen, y

10 evaluar un gradiente de una entre la intensidad y la fase de los datos de imagen detectados entre pares de nodos, y

la asignación de costes de enlace a los enlaces comprende

asignar costes de enlace a los enlaces que conectan los pares de nodos que disminuyen cuando aumenta el gradiente.

15 5. El método según la reivindicación 4, en donde:

el par de nodos incluye al menos uno de

20 píxeles próximos más cercanos, píxeles adyacentes en diagonal y píxeles separados por una distancia menor que una distancia de corte.

6. El método según la reivindicación 1, que determina los costes de ruta de rutas extendidas que comprende:

25 calcular un cambio del coste heurístico de la ruta seleccionada, y calcular un cambio del coste de la cadena de la ruta seleccionada, ambos causados por la extensión de la ruta seleccionada con los enlaces de extensión; y

determinar los costes de ruta de las rutas extendidas actualizando el coste de ruta de la ruta seleccionada con una combinación del cambio del coste heurístico y el cambio del coste de la cadena.

30 7. El método según la reivindicación 1, en el que la selección de una ruta de menor coste comprende:

utilizar un algoritmo de rotura de igualdad cuando más de una de las rutas extendidas y rutas no seleccionadas almacenadas tienen los mismos costes de ruta.

35 8. El método según la reivindicación 1, comprendiendo el método:

repetir las etapas (a)-(d) para actualizar la ruta seleccionada hasta alcanzar un criterio de finalización; y

40 identificar la ruta seleccionada actualizada como correspondiente a la imagen de la capa oftálmica.

9. El método según la reivindicación 1, en el que la combinación de los costes heurísticos con los costes de la cadena comprende:

45 añadir los costes heurísticos de las rutas extendidas a los costes de la cadena de las rutas extendidas con un factor de ponderación.

10. El método según la reivindicación 1, en el que la asignación del coste heurístico comprende:

50 crear una imagen de capa de la capa oftálmica basada en una imagen de capa previamente registrada de la capa oftálmica por el procesador de imagen; y

definir el coste heurístico de al menos uno de entre el nodo y el enlace basado en una longitud de ruta desde al menos uno de entre el nodo y el enlace a un borde de la imagen a lo largo de la imagen de capa determinada.

55 11. El método según la reivindicación 10, que comprende:

registrar la imagen de capa previamente registrada en la imagen oftálmica.

60 12. El método según la reivindicación 1, en el que la asignación del coste heurístico comprende:

generar una tabla de funciones heurísticas antes de realizar la búsqueda de gráficos heurísticos;

almacenar la tabla de funciones heurísticas generadas en una memoria; y

65

recordar la tabla de funciones heurísticas almacenadas desde la memoria que se utilizará para asignar el coste heurístico.

5 13. El método según la reivindicación 1, en el que la asignación del coste heurístico comprende:

generar un gráfico de imagen a escala con una primera resolución menor que una resolución del gráfico de imagen;

10 realizar una búsqueda de gráfico no heurístico de la ruta en el gráfico de imagen a escala para determinar una ruta a escala; y

10 asignar los costes heurísticos de la búsqueda de gráficos heurísticos utilizando la ruta a escala.

14. El método según la reivindicación 13, en el que la asignación de los costes heurísticos de la búsqueda de gráficos heurísticos, utilizando la ruta a escala, comprende:

15 utilizar una distancia de al menos uno de entre los nodos y los enlaces del gráfico de imagen desde un borde de la imagen a lo largo de la ruta a escala.

15. El método según la reivindicación 13, en el que la utilización de una distancia comprende:

20 combinar una distancia de los al menos uno de entre los nodos y los enlaces del gráfico de la imagen a partir de la ruta a escala con la distancia utilizada.

16. El método según la reivindicación 13, en el que la generación del gráfico de imagen a escala comprende:

25 generar el gráfico de imagen a escala a partir de la imagen tomada por el sistema de generación de imágenes mediante al menos una de entre las funciones de granulación gruesa y decimación.

17. El método según la reivindicación 1, en donde el sistema de generación de imágenes está dispuesto de conformidad con una de las formas siguientes:

30 (i) en donde el sistema de generación de imágenes comprende un sistema de tomografía de coherencia óptica (OCT);

35 (ii) en donde el sistema de generación de imágenes comprende un sistema de ultrasonido;

(iii) en donde el sistema de generación de imágenes comprende un sistema Scheimpflug.

18. El método según la reivindicación 1, en el que la toma de una imagen comprende:

40 preprocesar la imagen tomada por el sistema de generación de imágenes por al menos una función de entre

45 asociar un pseudo-color, ajustar un contraste, ajustar un brillo, filtrar, normalizar, poner en práctica una reducción de ruido, mejorar los datos de una imagen y poner en práctica una ecualización de histograma.

19. El método según la reivindicación 1, en donde:

el método se realiza en una imagen de la capa oftálmica.

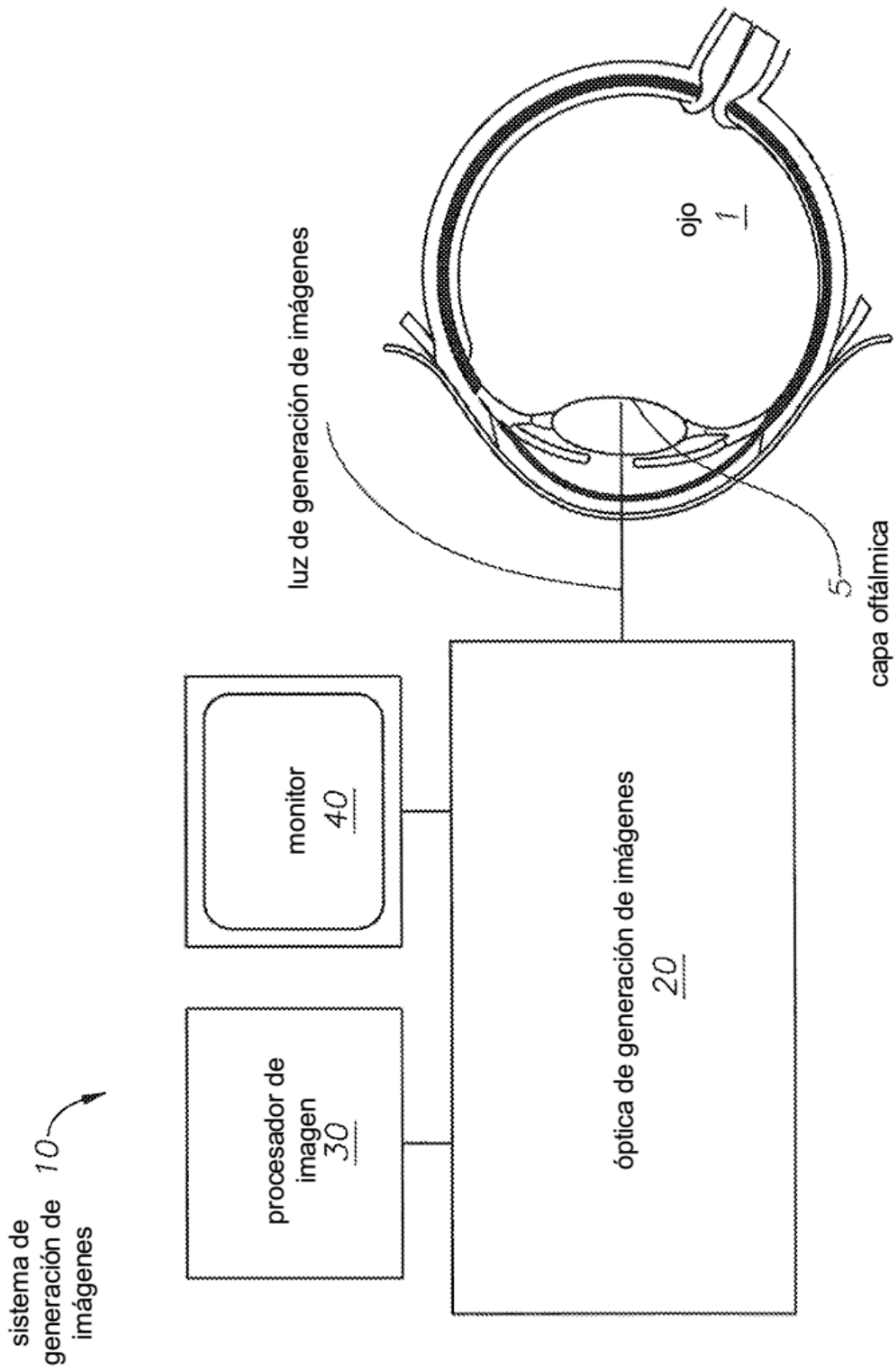


FIG. 1

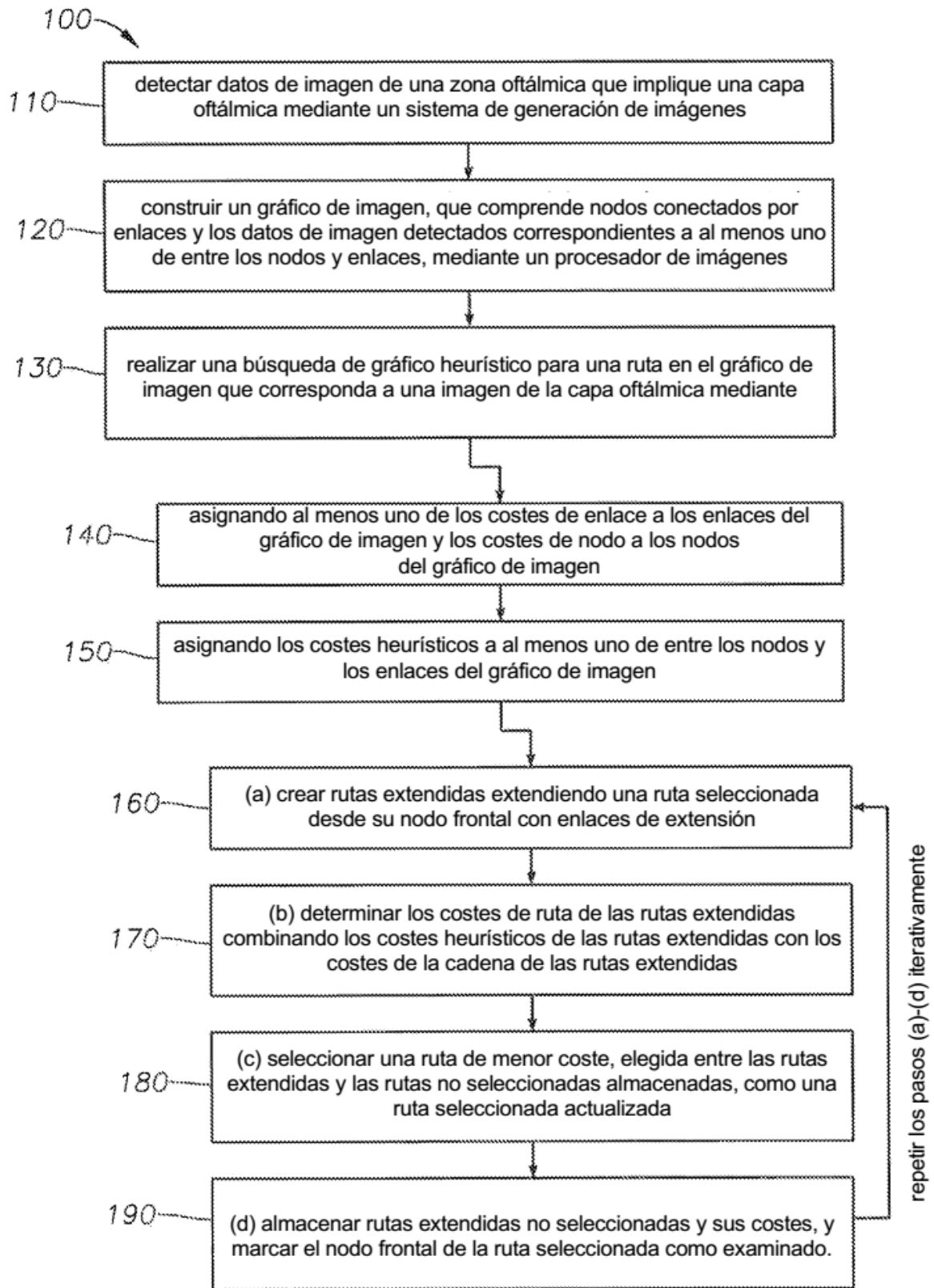


FIG. 2A



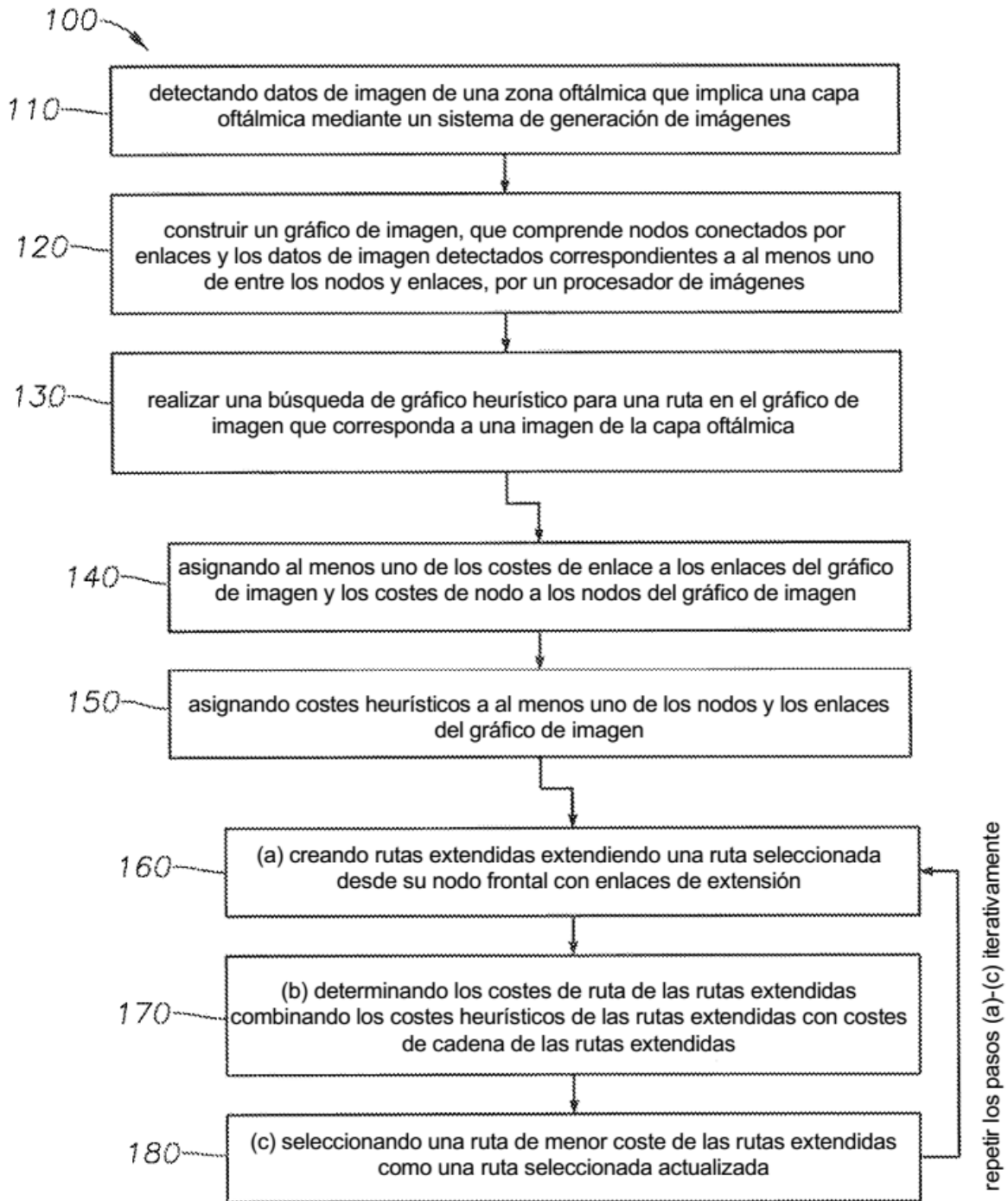
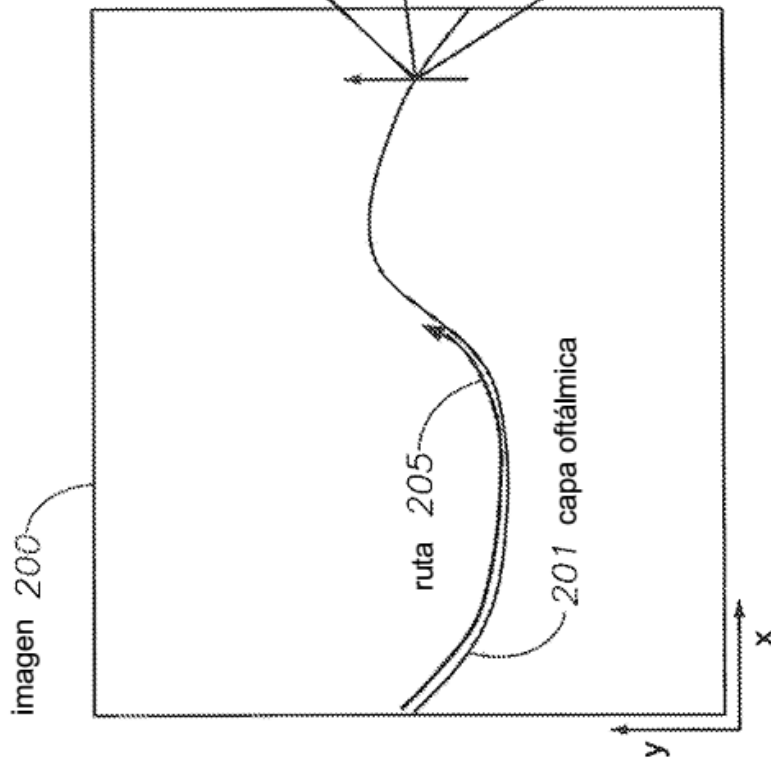
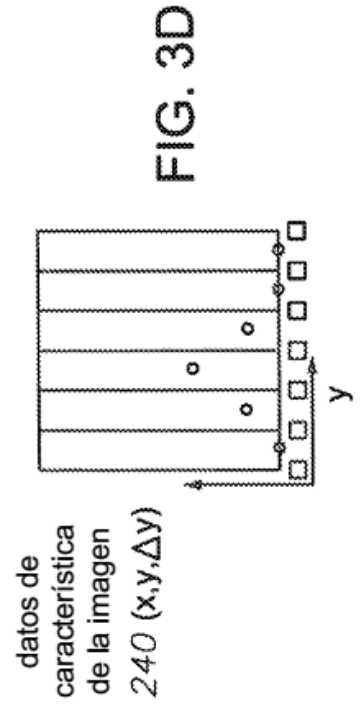
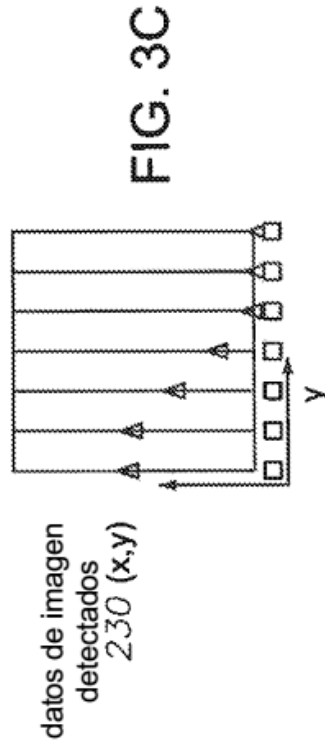
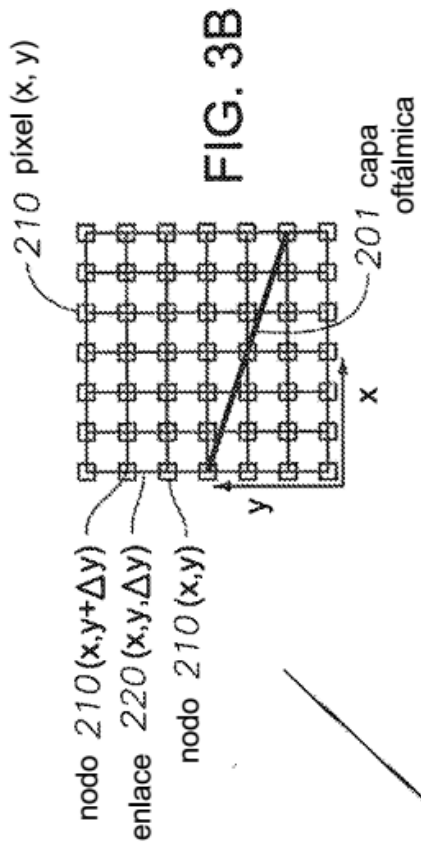


FIG. 2B



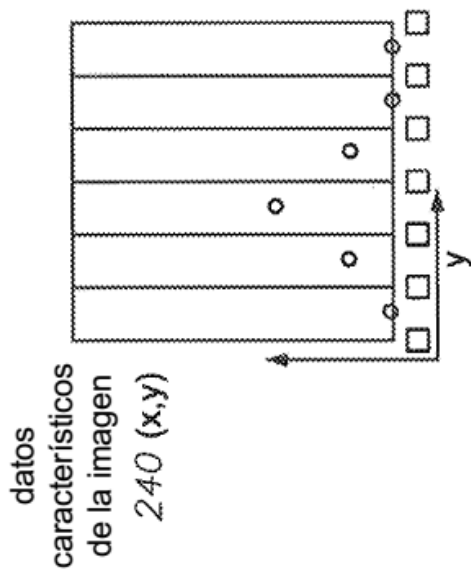


FIG. 4A

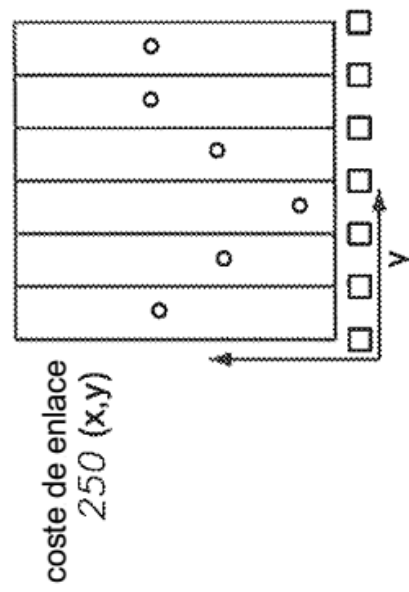


FIG. 4B

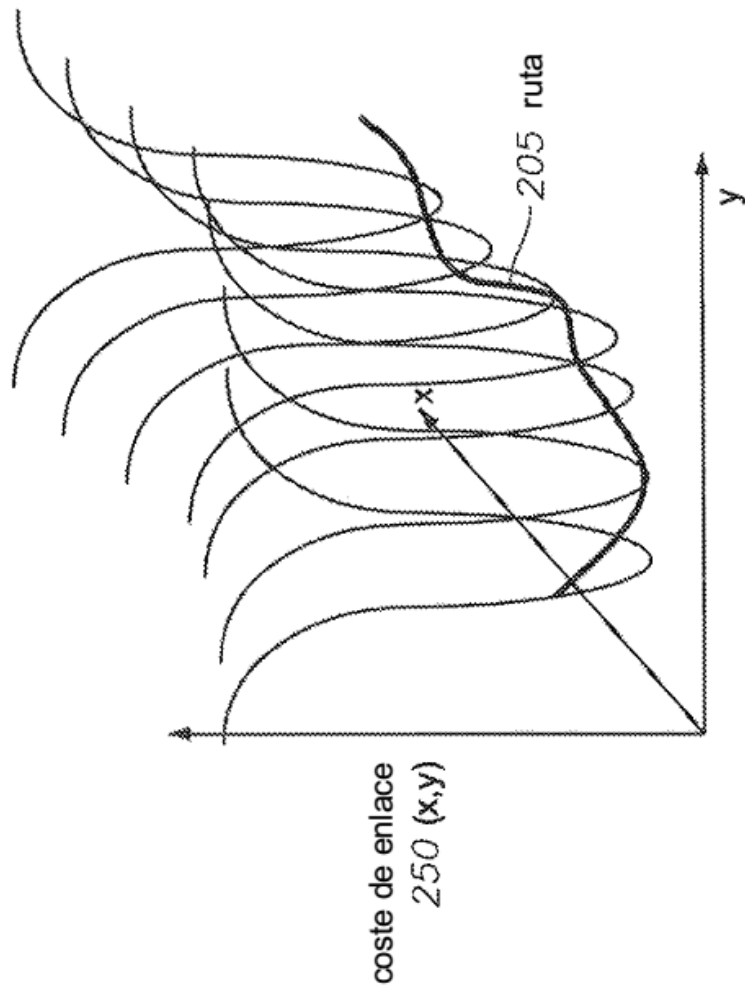


FIG. 4C

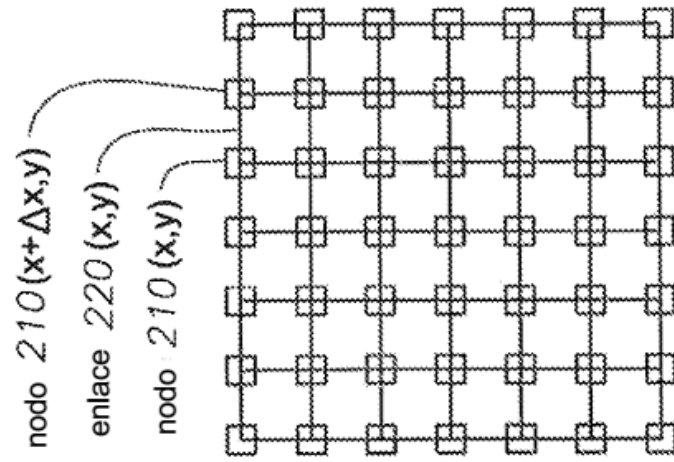


FIG. 5A

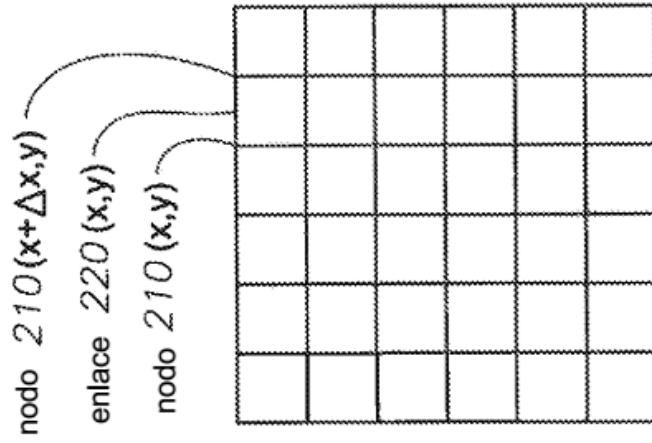


FIG. 5B

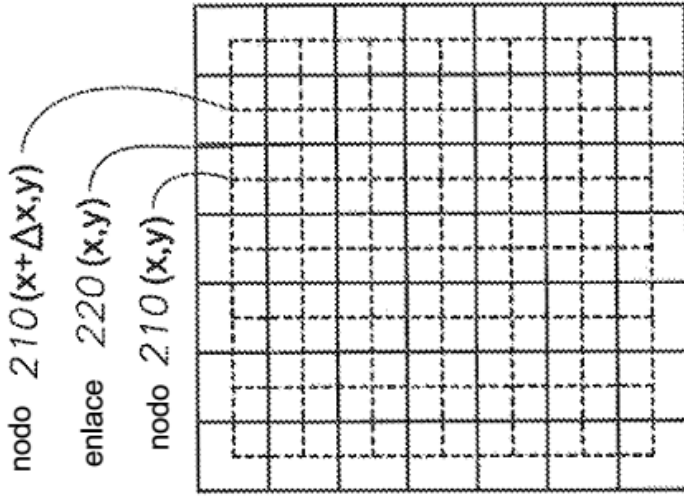


FIG. 5C

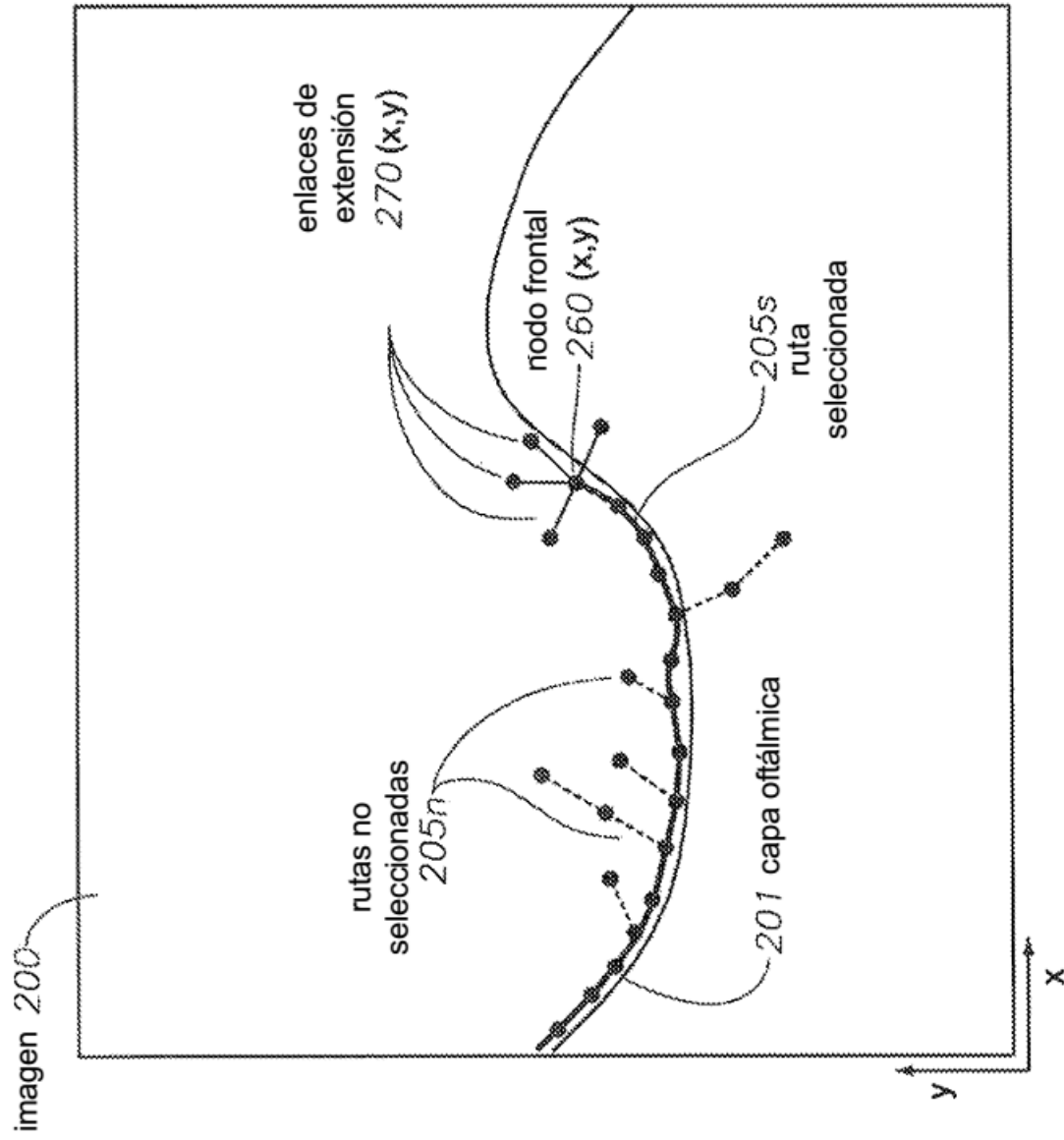


FIG. 6A

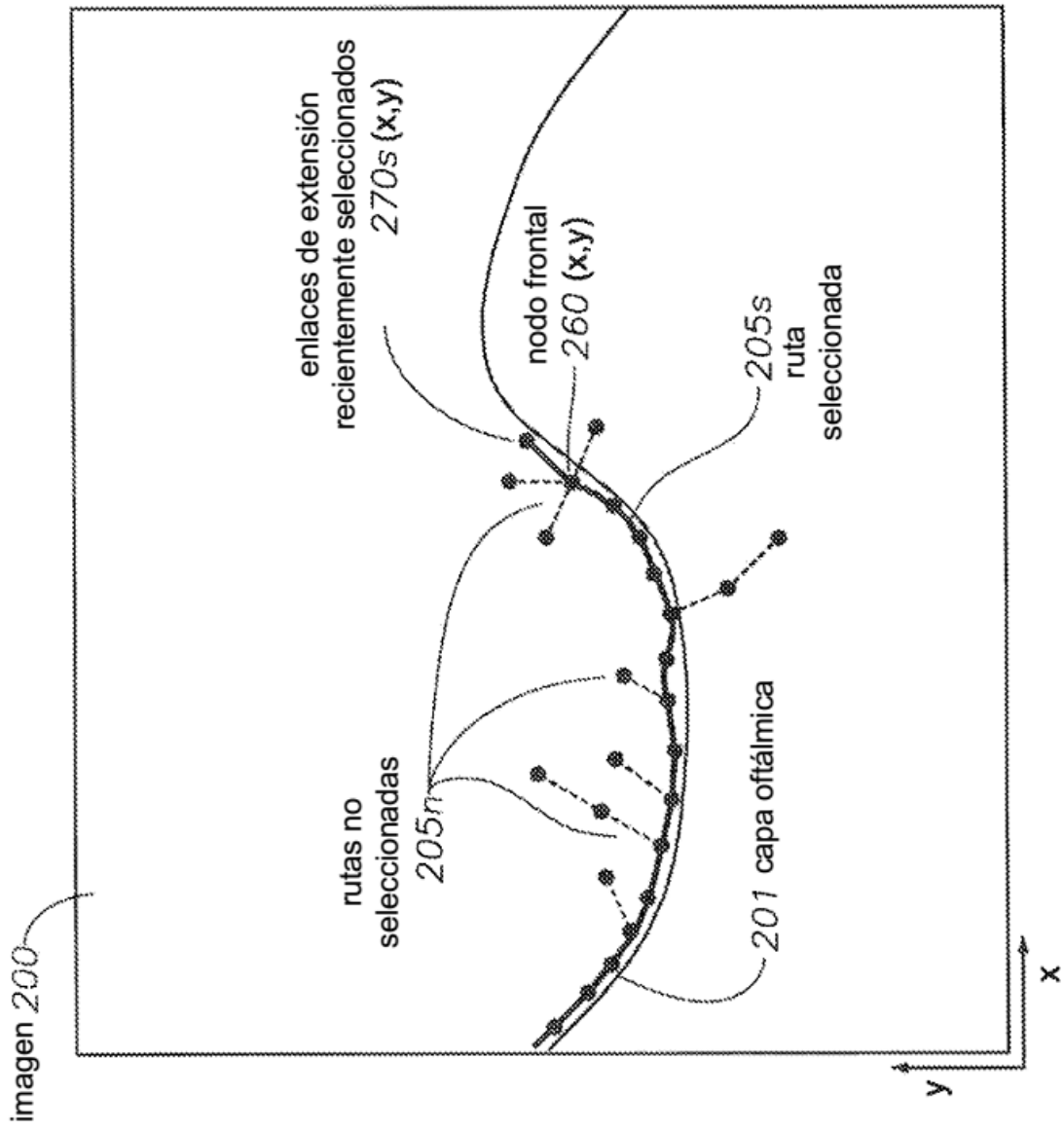


FIG. 6B

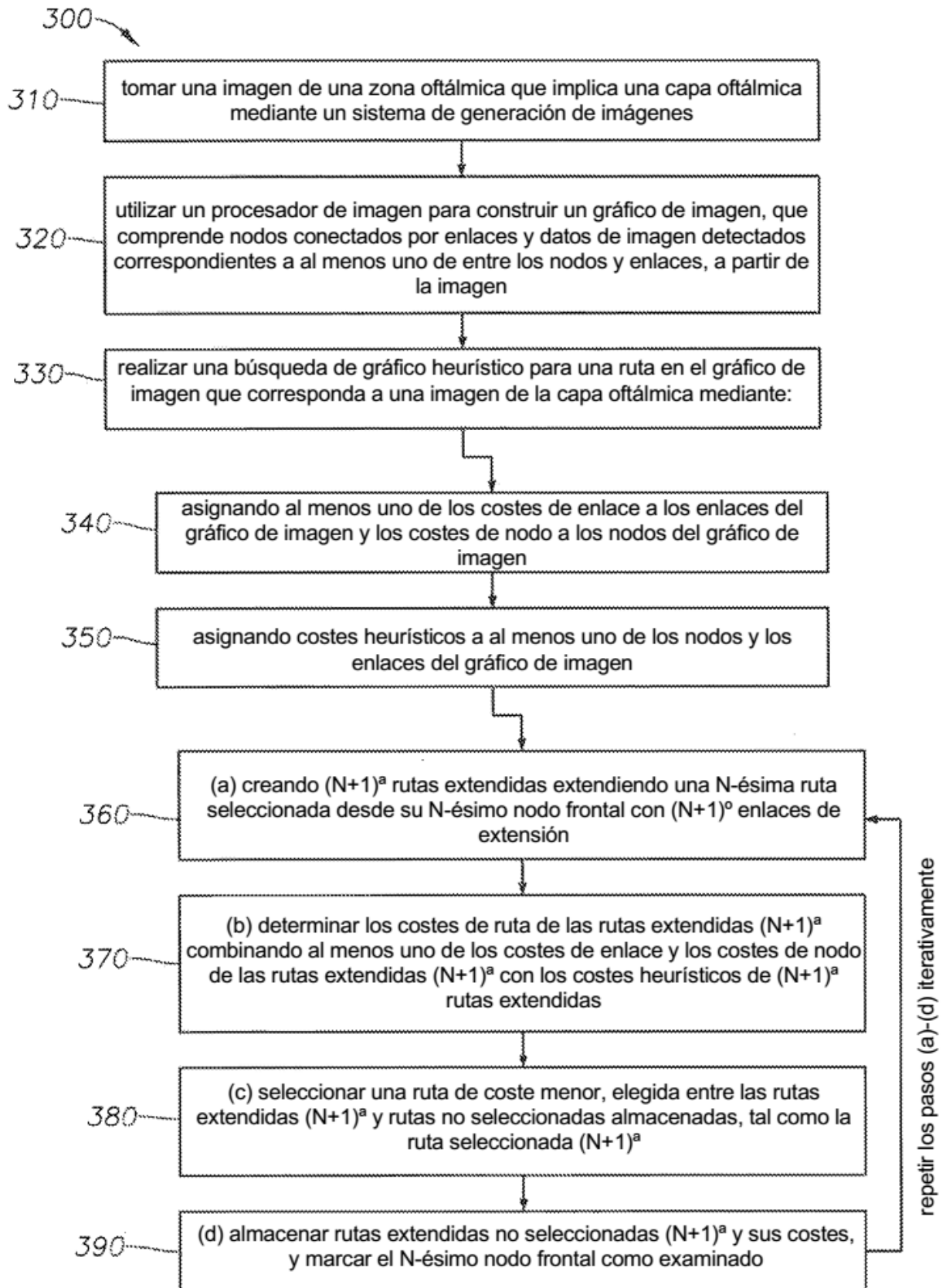


FIG. 7A

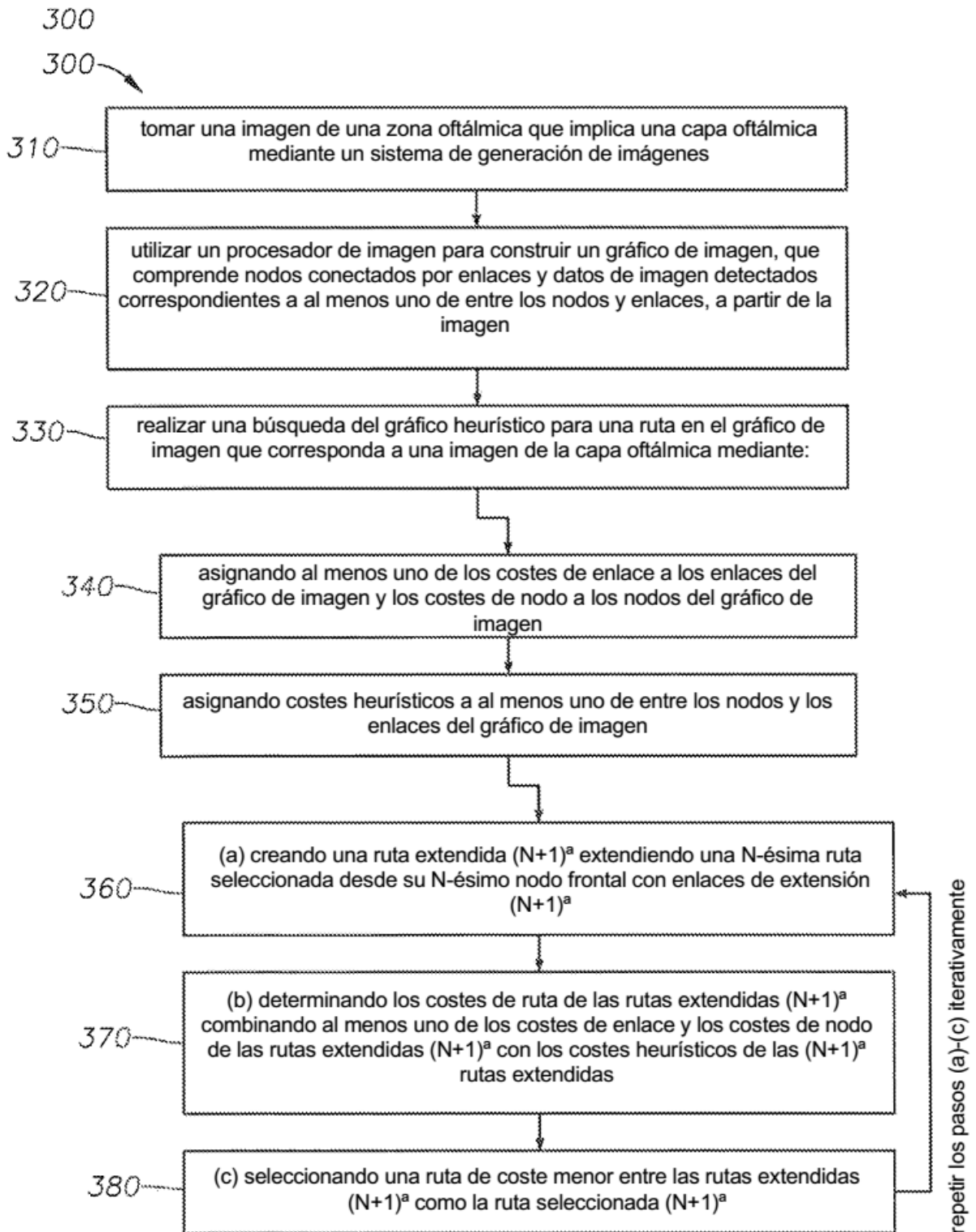
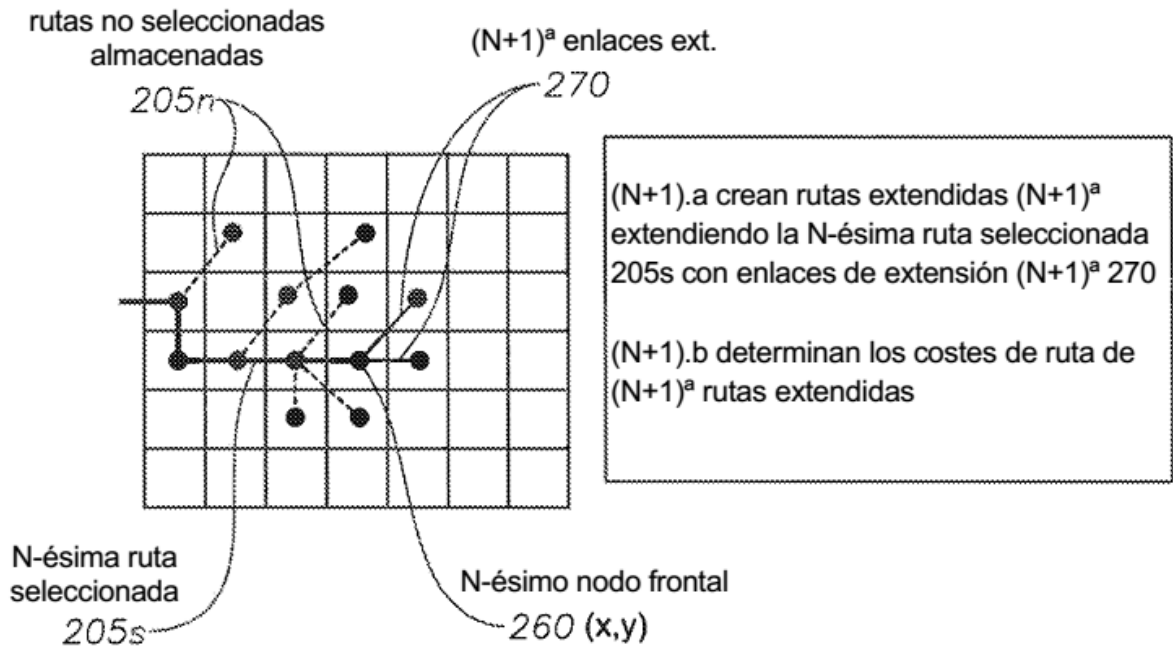


FIG. 7B

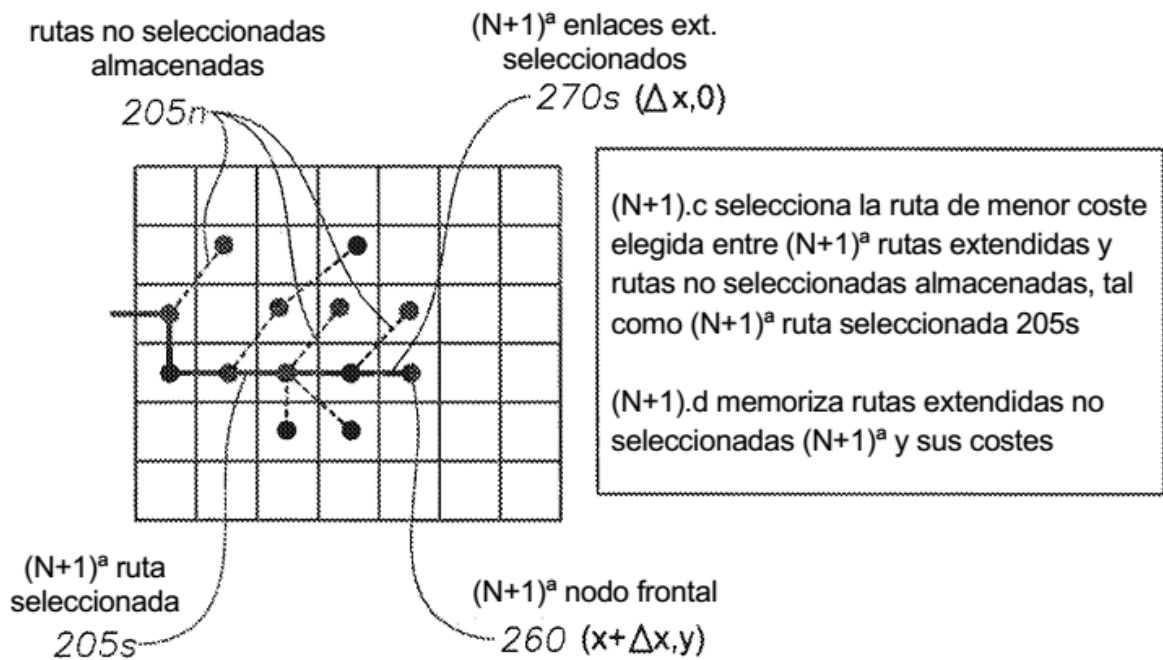




(N+1).a crean rutas extendidas (N+1)<sup>a</sup> extendiendo la N-ésima ruta seleccionada 205s con enlaces de extensión (N+1)<sup>a</sup> 270

(N+1).b determinan los costes de ruta de (N+1)<sup>a</sup> rutas extendidas

FIG. 8A



(N+1).c selecciona la ruta de menor coste elegida entre (N+1)<sup>a</sup> rutas extendidas y rutas no seleccionadas almacenadas, tal como (N+1)<sup>a</sup> ruta seleccionada 205s

(N+1).d memoriza rutas extendidas no seleccionadas (N+1)<sup>a</sup> y sus costes

FIG. 8B

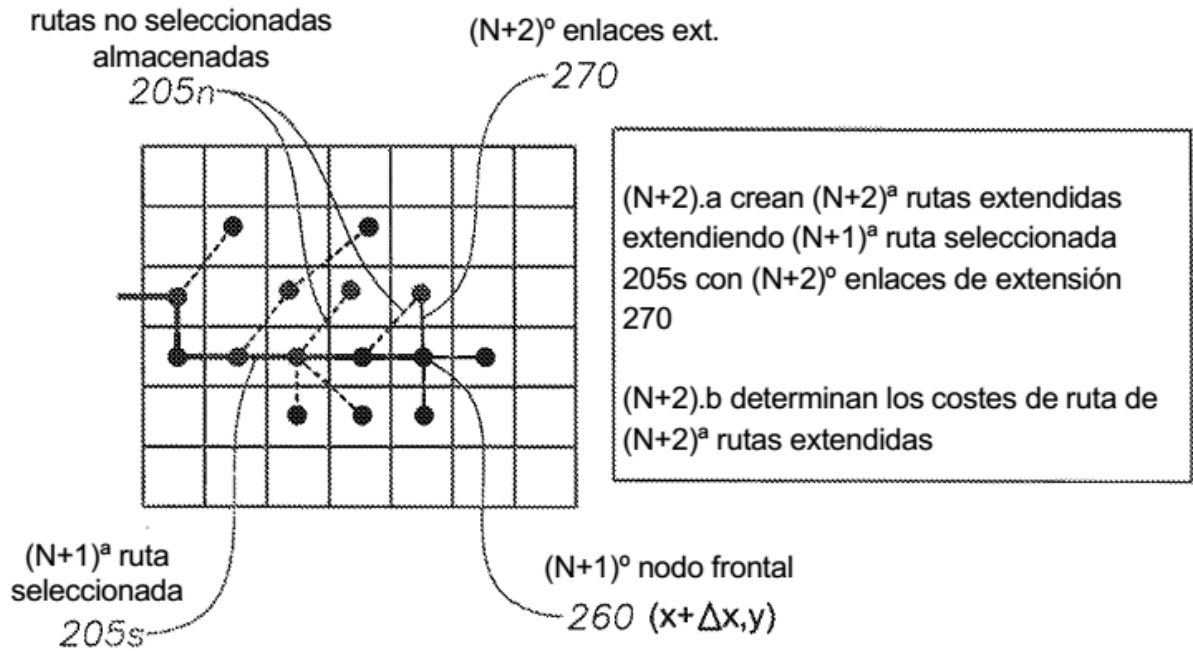


FIG. 8C

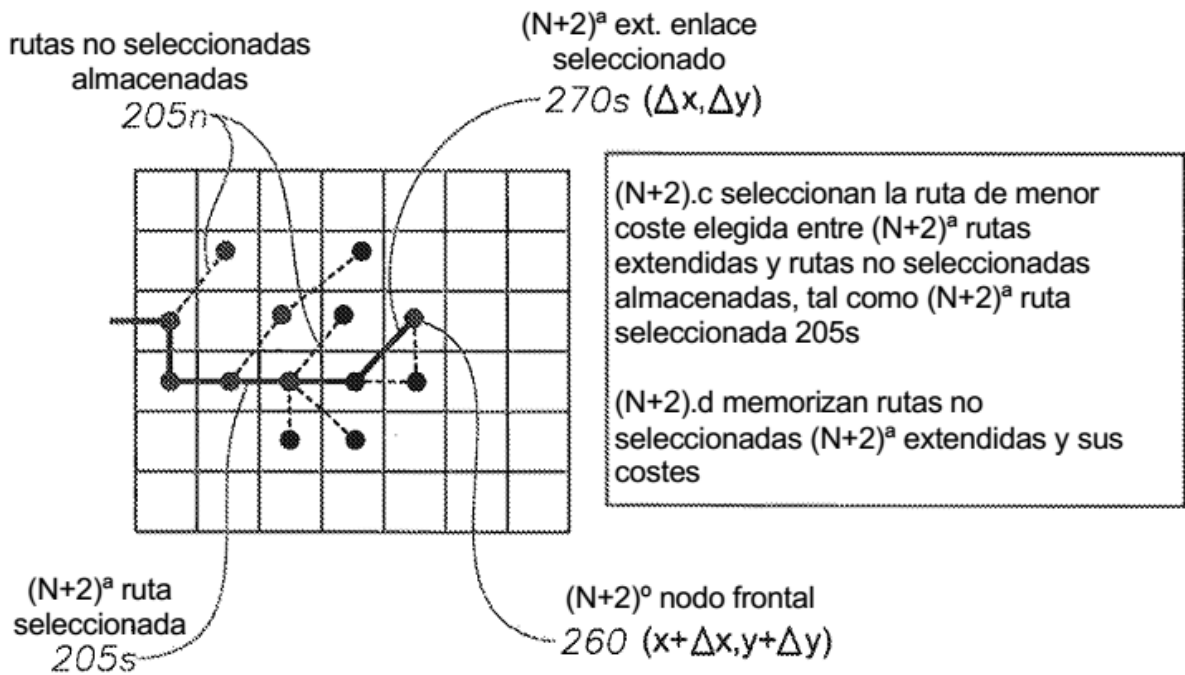


FIG. 8D

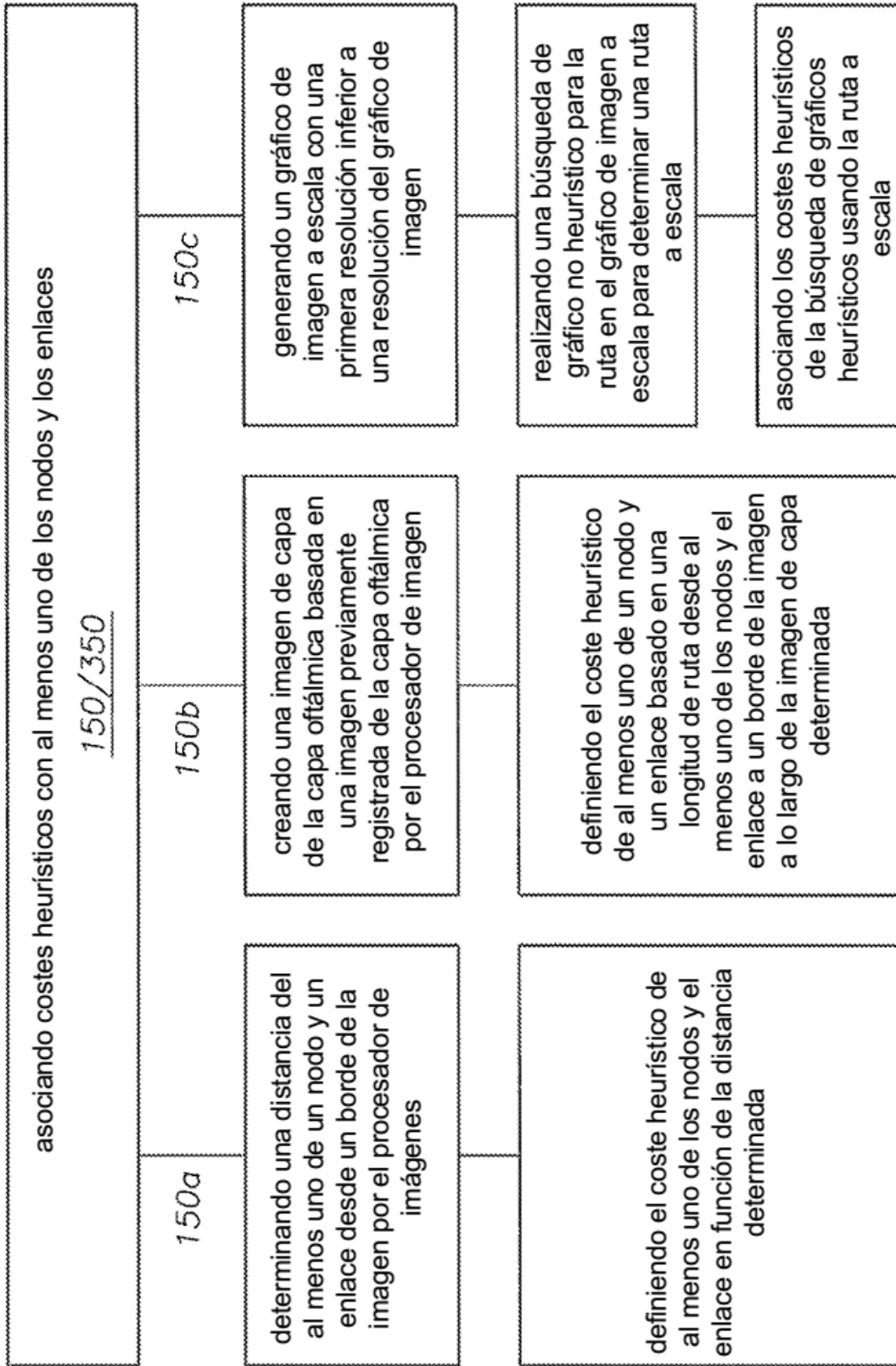


FIG. 9

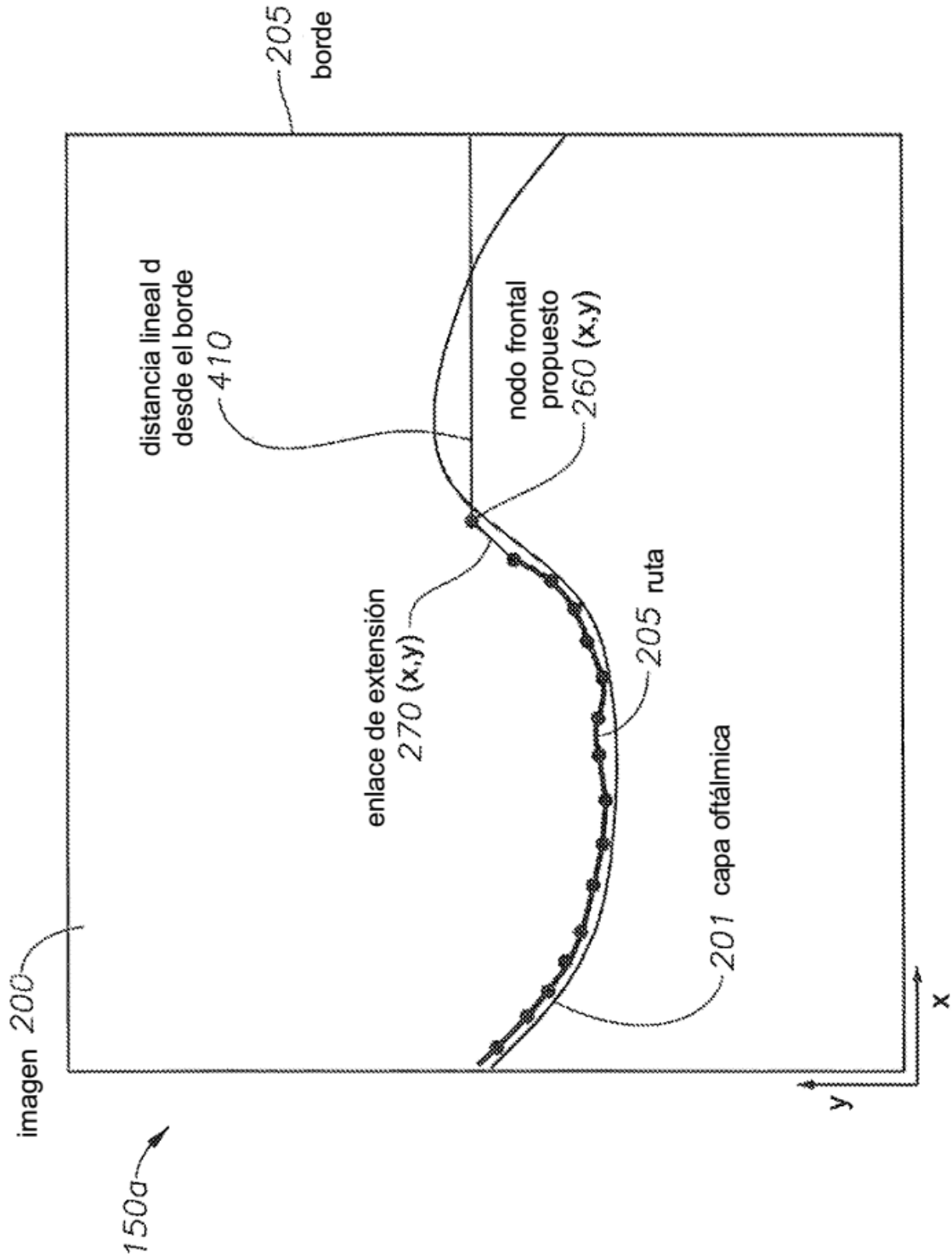


FIG. 10A

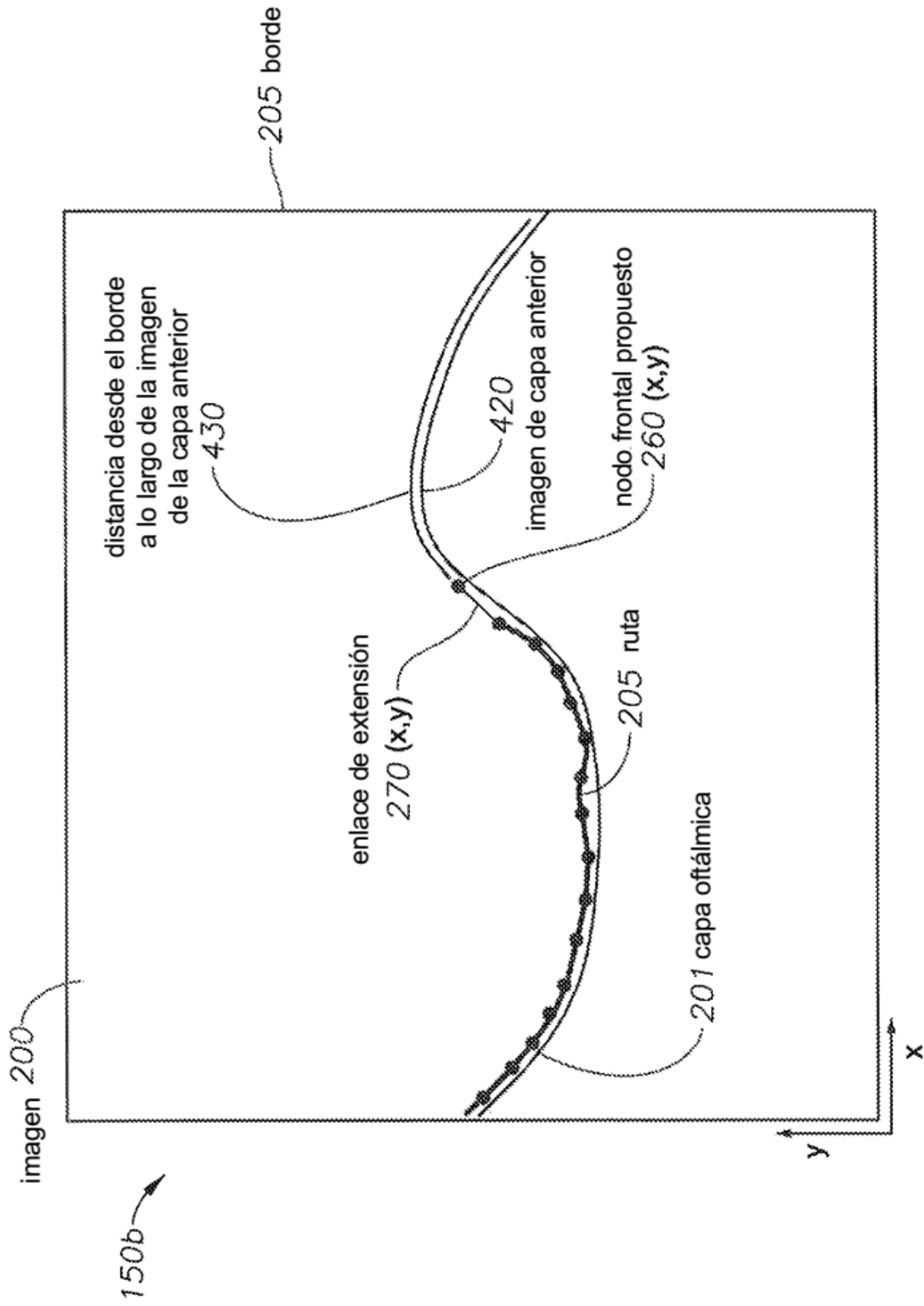


FIG. 10B

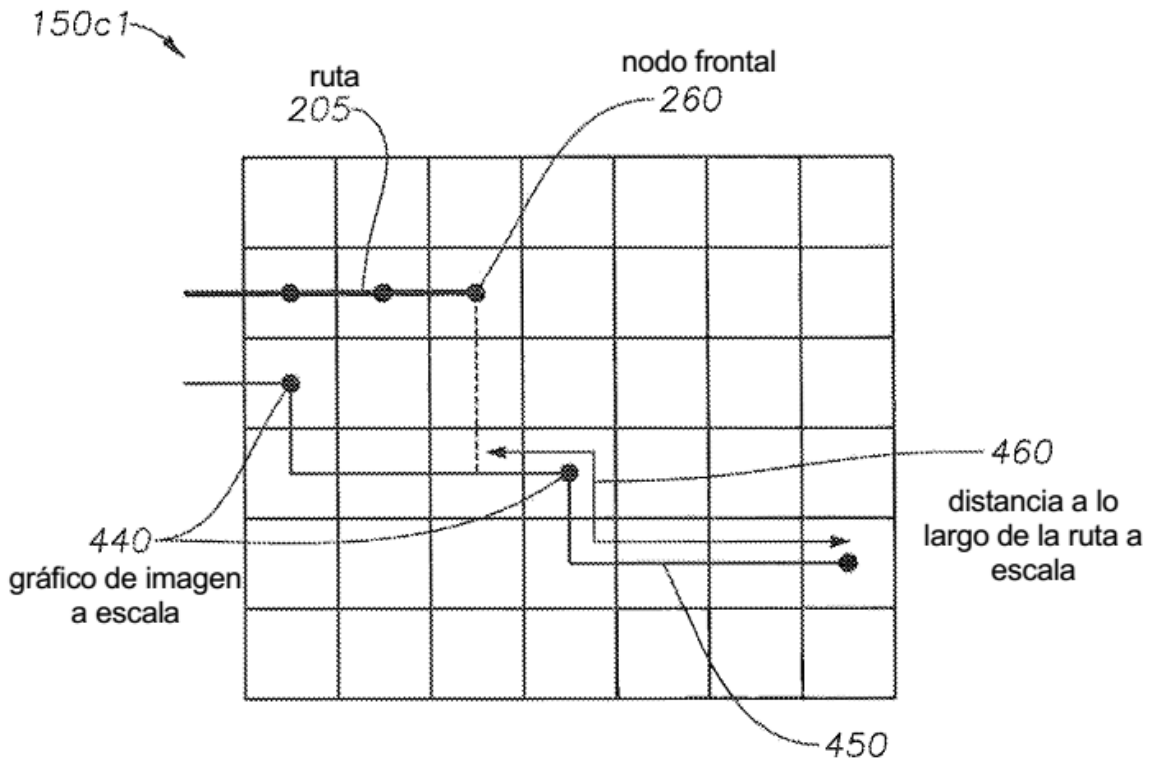


FIG. 10C

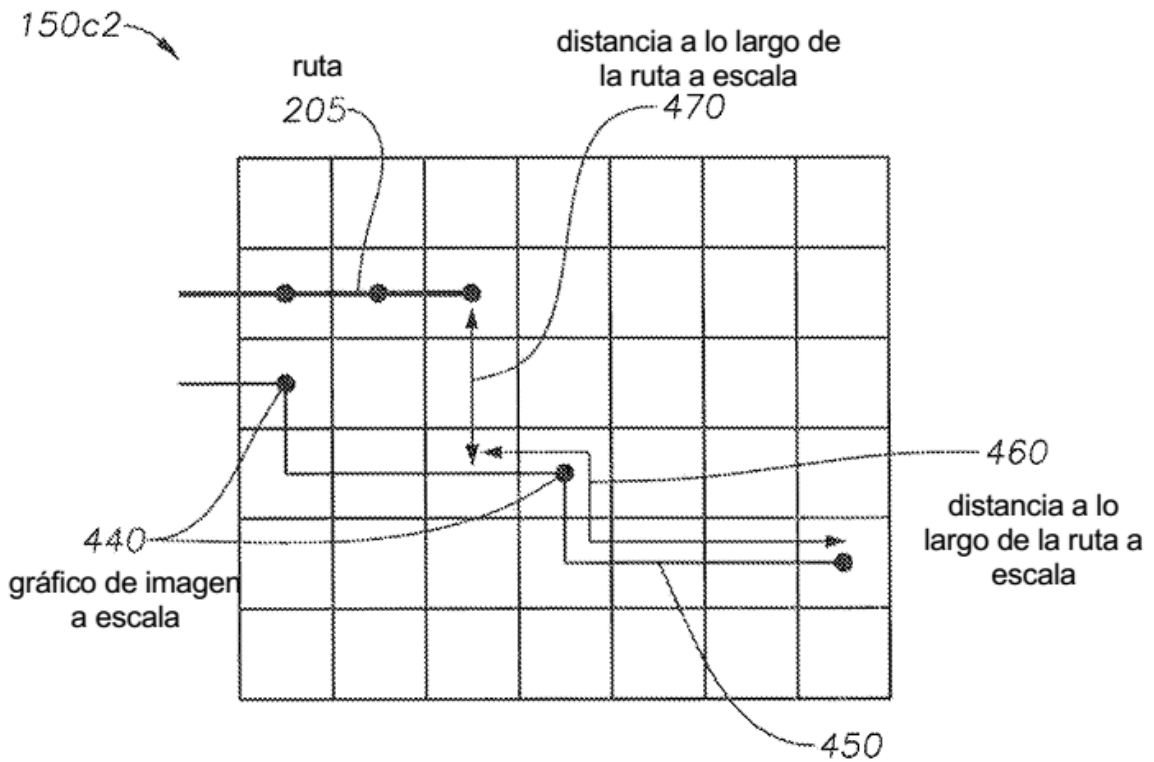


FIG. 10D

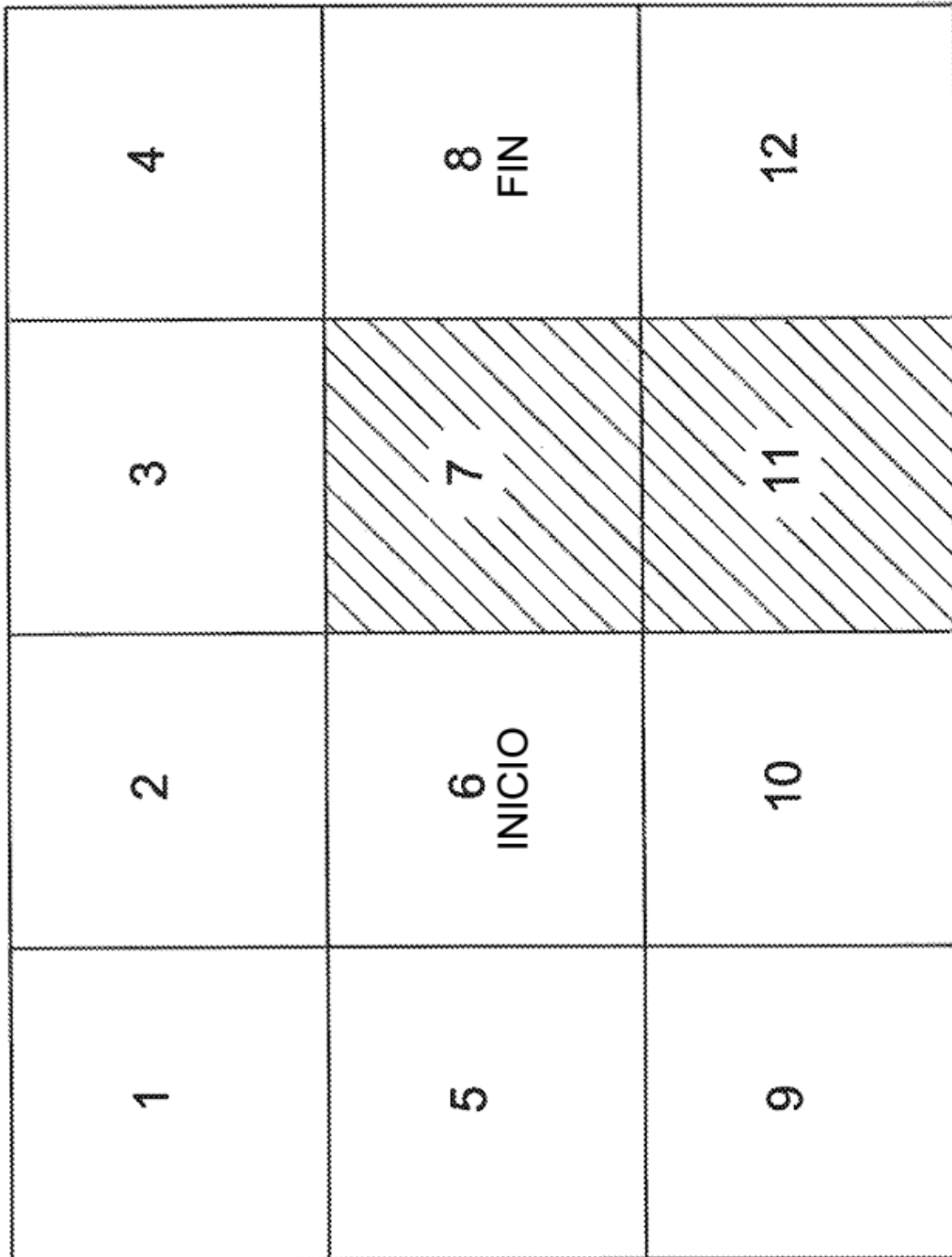


FIG. 11A

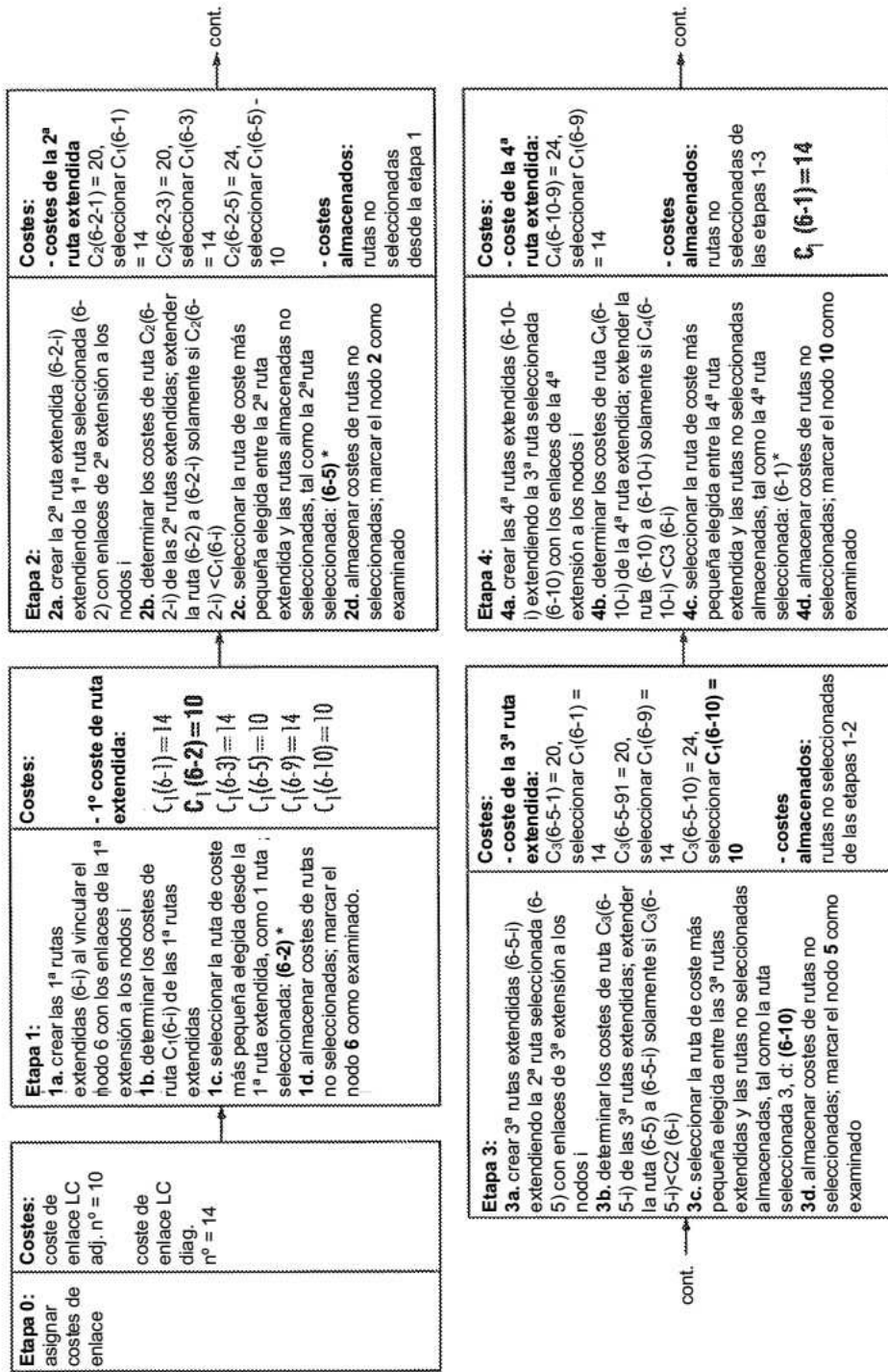
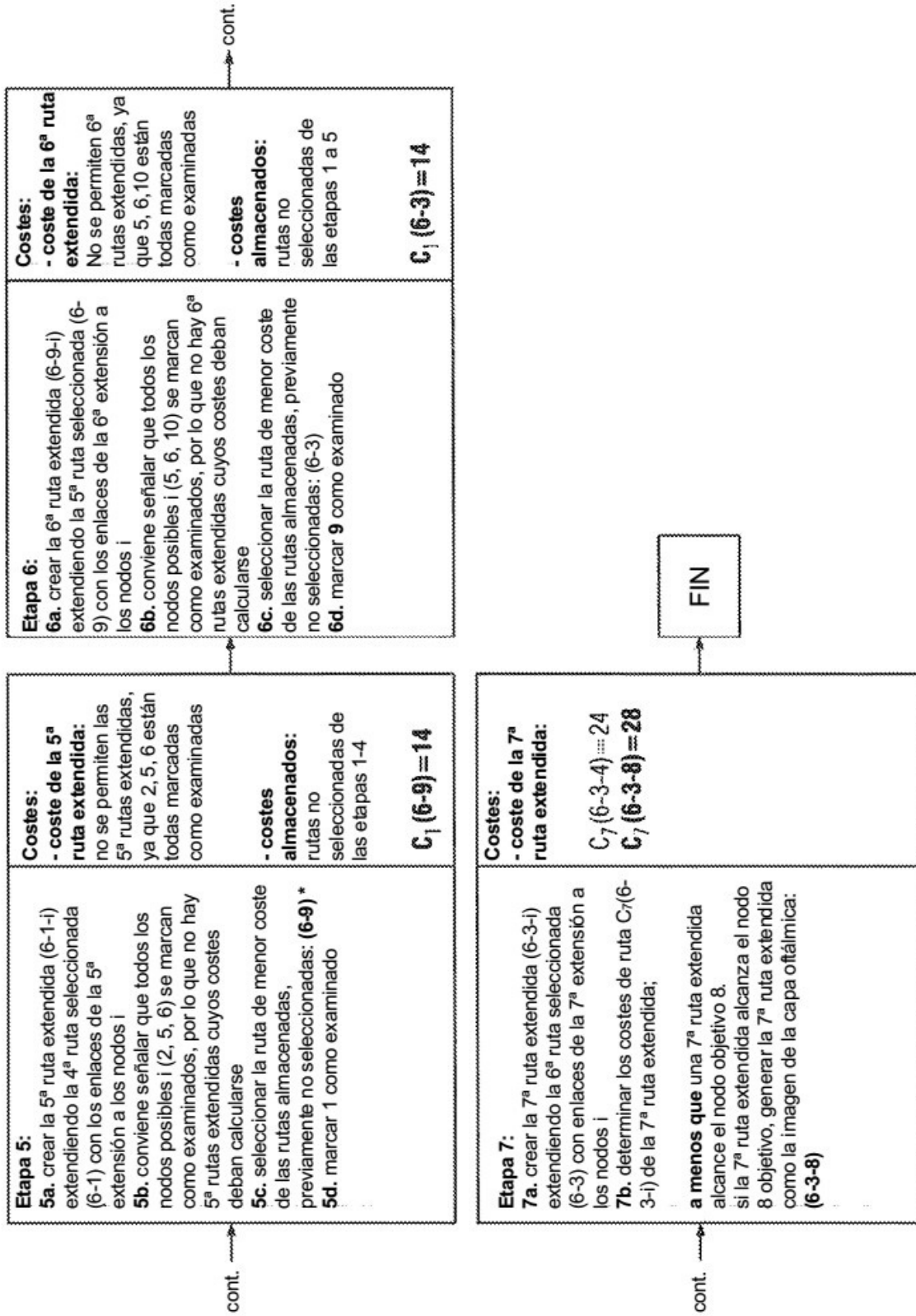


FIG. 11B-1

\* Indica que la rotura de igualdad se utilizó para seleccionar la etapa





\* Indica que la rotura de igualdad se utilizó para seleccionar la etapa

FIG. 11B-2

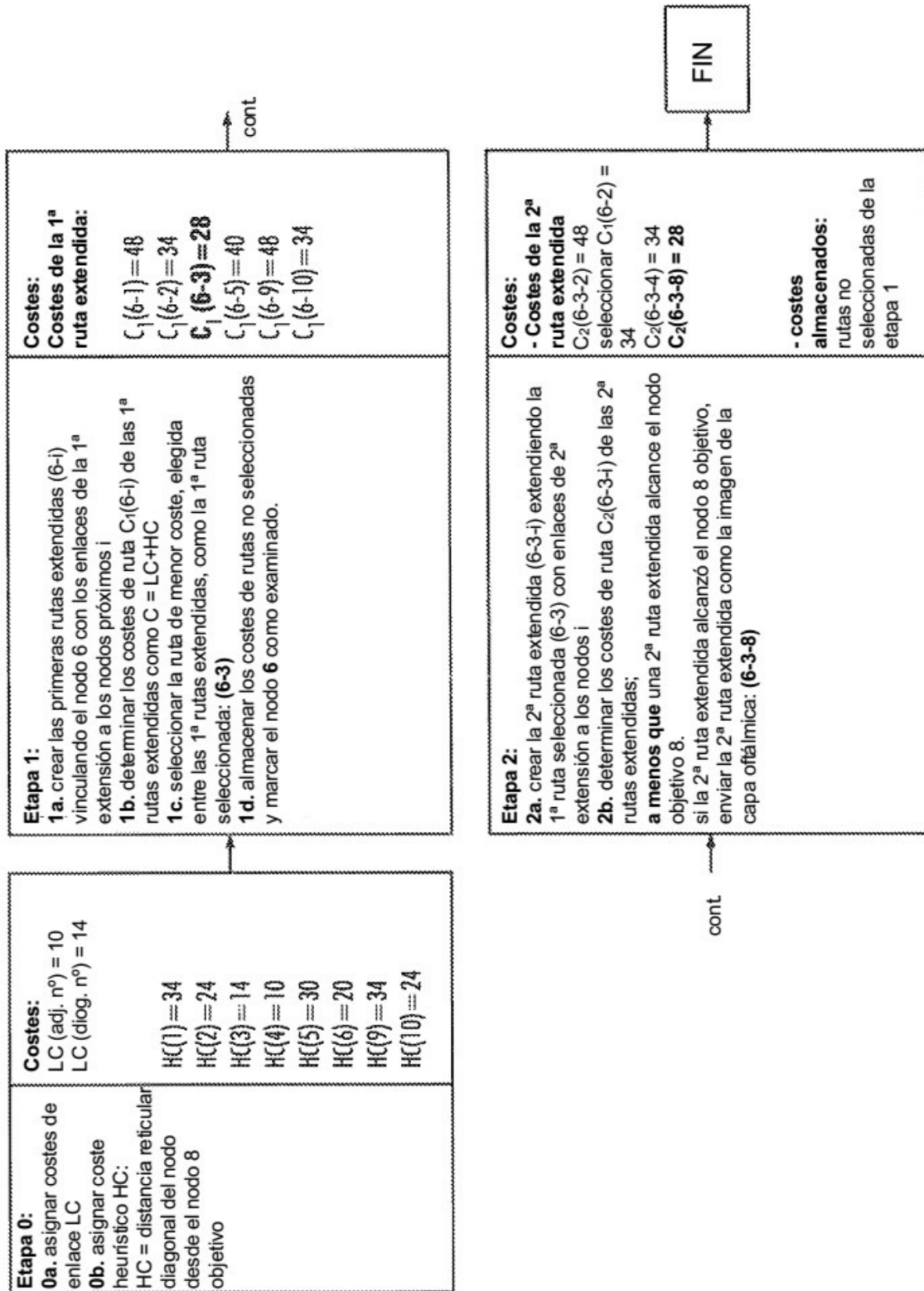


FIG. 11C

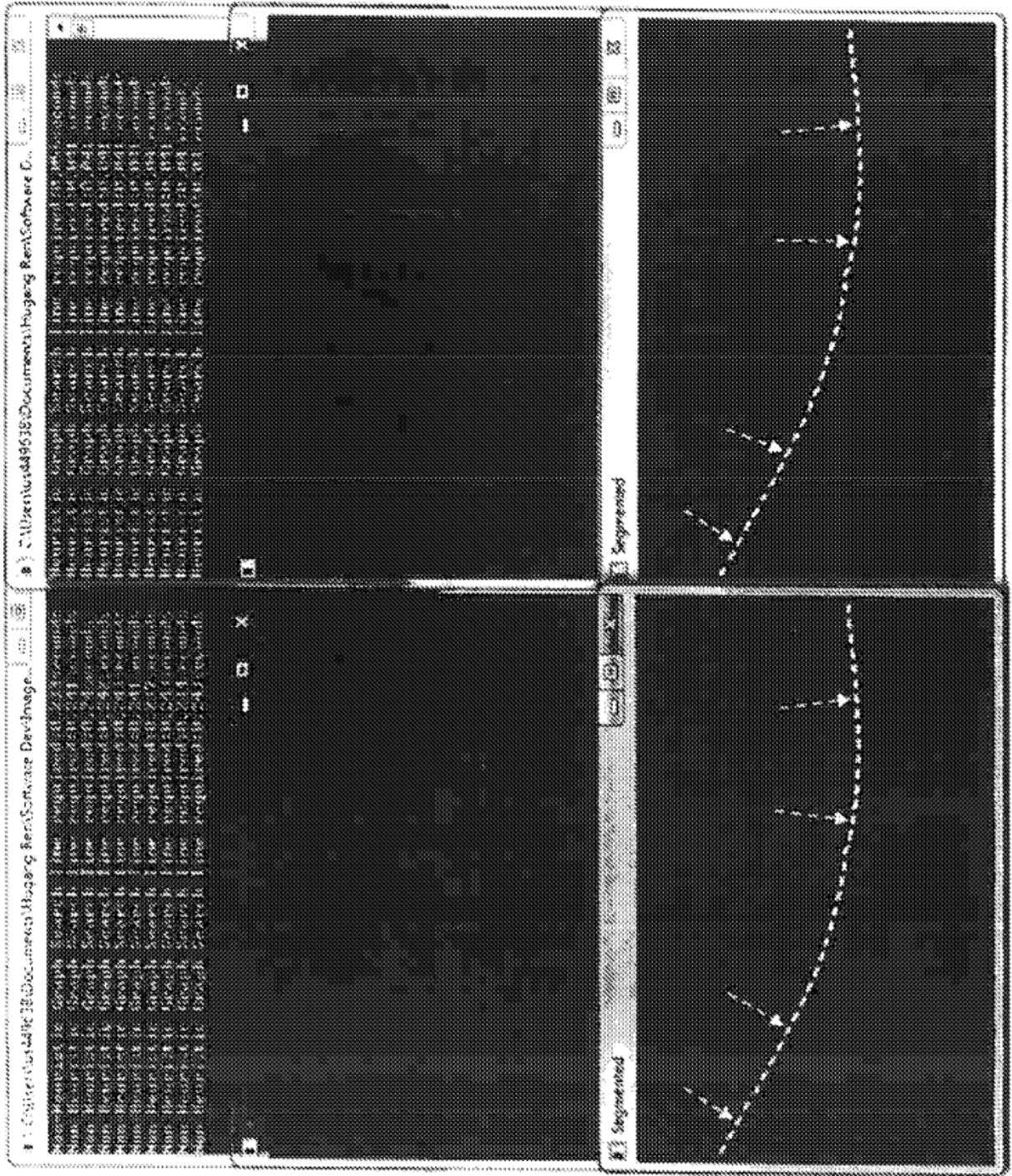


FIG. 12