



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE UN FRENTE DE
HIELO EN UNA SOLUCIÓN DILUIDA MEDIANTE
TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A :

JORGE ALBERTO MARTÍNEZ CONTRERAS

TUTOR

DR. JORGE EDUARDO BRIEVA RICO

CIUDAD DE MÉXICO, 2020

Resumen

La crio-concentración o concentración por congelación es una tecnología prometedora de purificación de agua debido a su bajo consumo de energía en comparación con procedimientos tradicionales como la evaporación. El control de la cristalización y en particular la velocidad de crecimiento de los cristales es un factor clave para un proceso exitoso de crio-concentración. En este trabajo se propone un sistema de procesamiento de imágenes que permite estimar la velocidad del frente de hielo a partir de una secuencia de imágenes. Para probar el sistema se utilizaron cuatro tipos de soluciones de baja concentración y mediante un montaje experimental se generó un conjunto de datos de imágenes para el análisis del fenómeno. Para el procesamiento de la secuencia de imágenes se utilizaron técnicas estándar de procesamiento tales como el realce, la segmentación, la identificación de estructuras pertinentes o primitivas, así como la estimación de la velocidad a partir de la correspondencia de estas primitivas. Se concluye que se ha encontrado una combinación de algoritmos adecuada para la identificación del frente de hielo en soluciones diluidas. Los resultados obtenidos, por medio de la estimación de la velocidad de crecimiento del frente de hielo, están de acuerdo con los calculados con el modelo físico, y muestran que a medida que el frente de hielo avanza, la velocidad de desplazamiento disminuye.

*Dedicatoria a mis padres, que cada uno a su manera, me enseñaron el buscar ser un
mejor profesionalista cada día.*

Agradecimientos

Este trabajo fue posible por la aportación de distintas personas, ya sea en gran o pequeña medida, pero igual de importantes, razón por la cual les agradezco de manera específica a continuación:

En principio al Dr. Jorge Brieva, director de esta tesis, por su continuo seguimiento en la elaboración del trabajo, así como por la retroalimentación constante que ayudó a conseguir avances día a día, hasta finalmente llegar a este resultado.

También agradezco a la Universidad Panamericana por facilitar la realización del trabajo, no sólo en la parte experimental y por brindar las herramientas tecnológicas, sino también por el apoyo económico mediante el otorgamiento del 40 % de beca para los estudios de la maestría.

Haciendo distinción a miembros de la comunidad UP, agradezco al Dr. Mauricio Pardo por incluirme en el equipo de trabajo enfocado a temas de la purificación del agua, así como por otorgar las muestras obtenidas mediante el sistema montado dentro de las instalaciones de la universidad, quien con ayuda del alumno Andrés Gregori, proporcionaron el material visual usado en el trabajo.

Por último agradezco al Dr. Gabriel Hernández por inducirme en el área de la automatización, específicamente en los sistemas de visión, herramienta fundamental en el enfoque del presente material.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	III
Introducción	1
1. Antecedentes y estado de la cuestión	4
1.1. Técnicas para la purificación de agua	4
1.2. Identificación de la capa de hielo	5
1.3. Aplicaciones de monitoreo de fenómenos físicos mediante procesamien- to de imágenes	6
2. Materiales y métodos	8
2.1. Descripción del montaje físico del sistema	9
2.1.1. Contenedor de enfriamiento y solución con concentración de sólidos	10
2.1.2. Sistema de enfriamiento	10
2.1.3. Cámara fotográfica	12
2.2. Adquisición y creación del conjunto de datos de imágenes	13
2.2.1. Adquisición de las imágenes	13
2.2.2. Creación del conjunto de datos de imágenes	13
2.2.3. Protocolo usado para la creación de las referencias	14
2.3. Técnicas de procesamiento de imágenes utilizadas	16
2.3.1. Realce del contraste de la imagen	17

2.3.2.	Segmentación de la imagen	19
2.3.3.	Textura de una imagen	22
2.3.4.	Extracción de objetos y primitivas	23
2.3.5.	Caracterización del frente de hielo y estimación de su velocidad	23
2.4.	Diseño de los experimentos	24
2.4.1.	Experimentos de detección del frente de hielo	24
2.4.2.	Evaluación de la detección del frente de hielo	25
2.4.3.	Experimentos de estimación de la velocidad del frente de hielo	26
2.4.4.	Evaluación de la estimación del desplazamiento del frente de hielo	26
3.	Resultados	27
3.1.	Resultados del realce de contraste	27
3.1.1.	Resultados del realce de contraste usando la ecualización del histograma	28
3.1.2.	Resultados del realce de contraste usando el ajuste de intensidad	28
3.2.	Extracción de la textura	31
3.3.	Proceso de segmentación y detección del frente de hielo	33
3.3.1.	Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 1)	34
3.3.2.	Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 2)	34
3.3.3.	Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 3)	36
3.4.	Evaluación del método de la detección del frente de hielo	36
3.5.	Estimación de la velocidad del frente de hielo	40
3.5.1.	Ilustración del método de la estimación de la velocidad del fren- te de hielo	40
3.5.2.	Comparación de la estimación de velocidad del frente de hielo para los tres experimentos	46
4.	Discusión	49
	Conclusiones	51
	Trabajo futuro	53

Índice de figuras

2.1. Esquema de la metodología utilizada.	8
2.2. Esquema del montaje experimental para la adquisición de imágenes.	9
2.3. Fotografía del montaje experimental para la adquisición de imágenes.	9
2.4. Fotografía del contenedor de enfriamiento.	10
2.5. Imágenes del contenedor con 4 diferentes niveles de concentración de sólidos. a) Solución sin diluir. b) Solución con una concentración del 0.1 %. c) Solución con una concentración del 0.2 %. d) Solución con una concentración del 0.4 %.	11
2.6. Fotografía del sistema de enfriamiento.	11
2.7. Fotografía del contenedor de anticongelante.	12
2.8. Fotografía del regulador de temperatura.	12
2.9. Sistema de iluminación por contraste <i>backlight</i> utilizado.	14
2.10. Ejemplo de una imagen de muestra, del frente de hielo, adquirida por la cámara fotográfica.	14
2.11. Imagen de una solución de baja concentración de sólidos después de agregar café.	15
2.12. Ejemplos de imágenes con diferentes concentraciones (0.4 %, 0.2 %, 0.1 %, 0 %) a las que se les aumentó el contraste en el frente de hielo.	16
2.13. Ejemplos de zonas de interés de las imágenes a diferentes concentraciones de sólidos (0 %, 0.1 %, 0.2 % y 0.4 %).	25

3.1. Primer conjunto de datos de imágenes en escala de niveles de gris y sus histogramas correspondientes. Primera fila: imágenes originales con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes para cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.	29
3.2. Resultados de la ecualización del histograma del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes ecualizadas con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas ecualizados correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.	30
3.3. Resultados del ajuste de intensidad del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes con ajuste de intensidad en un rango de nivel de gris entre 128 y 255, y con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.	31
3.4. Resultados del ajuste de intensidad del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes con ajuste de intensidad en un rango de nivel de gris entre 192 y 255, y con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.	32
3.5. Resultados de la extracción de la textura por entropía en el primer conjunto de datos de imágenes a diferentes concentraciones: a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %.	33
3.6. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 1). Fila 1: concentración de 0.4 %. Fila 2: concentración de 0.2 %. Fila 3: concentración de 0.1 %. Columna 1: segmentación después de aplicar ecualización y el algoritmo de Otsu (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul).	35

3.7. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 2). Fila 1: concentración de 0.4 %. Fila 2: concentración de 0.2 %. Fila 3: concentración de 0.1 %. Columna 1: segmentación después de aplicar el ajuste de intensidad y el algoritmo de Otsu (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul).	37
3.8. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 3). Fila 1: concentración de 0.4 %. Fila 2: concentración de 0.2 %. Fila 3: concentración de 0.1 %. Columna 1: segmentación después de aplicar ecualización y el algoritmo de K-means (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul). . . .	38
3.9. Secuencia de crecimiento del frente de hielo con una concentración de 0.4 %.	41
3.10. Contornos representando el crecimiento del frente de hielo para una concentración del 0.4 %. El orden cronológico de crecimiento del frente de hielo está dado por los colores: rojo (tiempo inicial), azul (5 min), verde (10 min), amarilla (15 min) y gris (21 min).	42
3.11. Correspondencia entre los píxeles para frentes de hielo en tiempos consecutivos. a) Correspondencia entre 0 y 5 min. b) Correspondencia entre 5 y 10 min. c) Correspondencia entre 10 y 15 min. d) Correspondencia entre 15 y 21 min.	43
3.12. Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.4 %.	44
3.13. Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.2 %.	45
3.14. Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.1 %.	46
3.15. Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.4 %.	47

3.16. Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.2%.	47
3.17. Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.1%.	48

Introducción

Identificación del problema de estudio

La crio-concentración o concentración por congelación es una tecnología prometedora para la purificación de agua debido a su bajo consumo de energía en comparación con procedimientos tradicionales como la evaporación [1]. La crio-concentración es un método de separación de sólidos basado en la cristalización de la solución, la cual ocurre durante la solidificación mientras el cristal de hielo en crecimiento expulsa los sólidos a su entorno. Para obtener una separación exitosa de los sólidos presentes en la solución, se debe controlar el balance entre la transferencia de masa y transferencia de calor; este balance puede ser determinado por la velocidad de crecimiento de los cristales y su óptimo se puede identificar con un valor con límite superior (velocidad límite de crecimiento) [2]. Por lo tanto, el control de la velocidad de crecimiento de los cristales es un factor clave en la crio-concentración. Así, mediante el control de la velocidad de crecimiento de los cristales se podrá controlar el proceso de purificación. En Pardo et al. [2], se propuso un sistema para estimar la velocidad instantánea del frente de hielo en soluciones con alta concentración de sólidos, mediante el procesamiento digital de las imágenes. En esa propuesta, el alto contraste presente entre las intensidades, correspondientes a los cristales de hielo y a la solución diluida, permitió identificar el frente de hielo como lo haría un observador. Sin embargo, cuando la solución es de baja concentración, presenta niveles bajos de contraste y la detección de un borde que corresponda al frente de hielo puede ser difícil de apreciar incluso para un observador experimentado. En este trabajo, se propone una metodología para la detección del frente de hielo en soluciones poco concentradas mediante algoritmos

de procesamiento de imágenes.

Justificación

Las actuales condiciones ambientales a nivel mundial cada vez más deterioradas y en particular la contaminación de las fuentes de agua, hacen que los procesos de descontaminación o purificación sean una prioridad. Un proceso de bajo consumo energético como la crio-concentración es una solución prometedora a los problemas de purificación de agua para consumo humano. Sin embargo, dada la dificultad práctica para implementar este proceso a gran escala ha hecho que actualmente no exista una solución a nivel industrial. Este trabajo aportará un primer paso para un proceso automatizado de crio-concentración mediante procesamiento de imágenes.

Hipótesis

Aplicar las técnicas de procesamiento de imágenes a una secuencia de imágenes de una solución con baja concentración de sólidos, y en proceso de congelación, para detectar el frente de hielo y calcular su velocidad.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general

Implementar un sistema de visión por computadora que permita calcular la velocidad de un frente de hielo en una solución con baja concentración de sólidos.

Objetivos específicos

- Implementar un algoritmo de visión para la detección del frente de hielo y su velocidad en una solución con baja concentración de sólidos.

- Validar el algoritmo de detección del frente de hielo propuesto, sobre un conjunto de datos de imágenes de una solución con baja concentración de sólidos y en proceso de congelación.
- Validar el algoritmo de estimación de la velocidad del frente de hielo propuesto, comparando los resultados en soluciones de alta concentración de sólidos.

Resumen de las secciones de este documento

En el capítulo 1 se expondrán los antecedentes de tres temas principales: las técnicas de purificación de agua , las técnicas para la detección de la formación del hielo y la descripción de algunas aplicaciones que utilizan sistemas de visión incluyendo algunos trabajos de visión para la identificación del frente de hielo.

En el capítulo 2 se explica la metodología utilizada para la elaboración de esta propuesta. Se describe el montaje experimental para la adquisición de las imágenes con diferentes concentraciones. También, se explica la metodología para la elaboración de una “referencia de oro” (*groundtruth*) para la validación de los métodos propuestos. Adicionalmente, se describe la metodología de procesamiento de imágenes para la detección del frente de hielo, la estimación de la velocidad y la validación de resultados.

En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos de la detección del frente de hielo mediante algunas de las técnicas clásicas de procesamiento de imágenes. Además, se muestran los resultados obtenidos de la estimación de la velocidad del frente de hielo en secuencias de imágenes adquiridas durante el proceso de crio-concentración.

En el capítulo 4 se realiza una discusión de los resultados obtenidos y en el Capítulo 4 se enumeran las conclusiones sobre este trabajo. Finalmente, se dan las perspectivas, recomendaciones y trabajo futuro de este trabajo.

Capítulo 1

Antecedentes y estado de la cuestión

1.1. Técnicas para la purificación de agua

Las técnicas utilizadas para la purificación del agua son variadas y abundantes en la literatura. En esta sección se explicarán algunos trabajos que utilizan las técnicas clásicas de purificación. Algunas de estas técnicas incluyen procesos químicos como la propuesta de [3] que se basa en el uso de Zeolite-MFI que remueve las sustancias químicas que representan agentes contaminantes en el agua. Por otro lado, mediante la modificación covalente se puede realizar la separación de líquidos orgánicos inmiscibles mezclados, proceso que se puede implementar para la purificación, tal como se expone en [4]. Además, existen otras técnicas que involucran la congelación de una mezcla para purificar el agua, por ejemplo, en [5] se presentó un método que a través del cambio de temperatura de enfriamiento y la velocidad de rotación de un fluido, lograron separar la salmuera del hielo. Por otro lado, los procesos de congelación, mejor conocidos como cristalización por congelación, han demostrado ser una herramienta prometedora para la purificación del agua en los últimos años. En [1] se presenta una revisión cronológica del avance de los procesos de ósmosis inversa de salmuera, combinados con cristalización por congelación. Esta revisión se hace a través del análisis de la formación de los cristales, es decir, evaluando el punto eutéctico de cristalización por congelación o EFC (por sus siglas en inglés). Los autores describen las ventajas y desventajas que proporcionan los procesos de congelación directa e indirecta. En [1]

también se compara la cristalización por congelación y los procesos de evaporación. En particular, se analiza el consumo energético con su respectivo análisis de costos. Por último, se ofrecen propuestas para investigaciones futuras donde se destaca la integración de técnicas por ósmosis inversa para aprovechar las ventajas de estas y así conseguir porcentajes más altos de agua purificada. Además aconseja para trabajos futuros, profundizar en el estudio y la comprensión de las condiciones de la formación del hielo. Otro estudio de un proceso híbrido, se presenta en [6], que de manera estructurada y tras diversas experimentaciones, plantea el uso de instalaciones con membranas para la desalinización del agua y también de la utilización de técnicas de congelación para garantizar una mayor ósmosis inversa de la salmuera.

1.2. Identificación de la capa de hielo

En esta sección se describirán algunos trabajos que incluyen las técnicas, procesos y aplicaciones en los cuales se estudia la formación de la capa de hielo, cuando se tiene agua expuesta a cambios de temperatura propiciados de manera natural o artificial, donde la velocidad a la cual se realiza el cambio de estado es de gran importancia. Las aplicaciones son diversas y van desde el análisis del comportamiento de congelación o del deshielo en ambientes naturales como ríos o lagos [7, 8], o en el estudio de la formación de gotas de agua para fines de aplicaciones en aeronáutica [9], hasta la observación de la presencia de agua y hielo para fines de conservación de tejido en el ámbito médico [10]. Los métodos empleados para medir la formación del hielo dependen en gran medida de la aplicación. Por ejemplo, las técnicas de imagen satelital son usadas para monitoreo de condiciones ambientales [11]; donde el uso de sensores sirve para el registro de las condiciones del agua marina [12]. Independientemente de la aplicación, el estudio de las condiciones del agua en distintas fases es esencial en estos estudios. Un ejemplo lo presenta [13] quien analiza a lo largo del tiempo el crecimiento de un cristal en una solución. Por otro lado, al analizar una solución diluida, se debe considerar la presencia de otros elementos que modificarán la mezcla, provocando comportamientos variables. Para cuantificar el nivel de concentración,

hay técnicas que recurren a la determinación del pH, como en [14], que determinan la concentración salina en la solución precisamente por el pH de la muestra. Sin embargo, para fines de este trabajo, que corresponde a evaluar la formación de la capa de hielo pese al nivel de concentración de la solución, no será necesario realizar un estudio exhaustivo sobre las condiciones de concentración de la mezcla.

1.3. Aplicaciones de monitoreo de fenómenos físicos mediante procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes es un área de desarrollo continuo relacionado con los métodos y algoritmos utilizados para procesar imágenes digitales a través de una computadora. Estos algoritmos han sido inspirados, en su gran mayoría, por el sistema de percepción visual humana. La principal tarea de estos algoritmos es realizar una descripción de la escena para identificar y caracterizar los objetos presentes. Esta caracterización incluye la forma, la intensidad y propiedades descriptivas como el área y la convexidad, por ejemplo. En el caso de secuencias de imágenes la descripción del movimiento de los objetos en la escena es necesaria mediante por ejemplo la estimación de la velocidad (magnitud y dirección). La utilización del procesamiento de imágenes como herramienta para monitorear procesos físicos tiene la gran ventaja de no ser invasiva. Las aplicaciones son muy variadas y van desde la medición de propiedades de materiales como el plástico para analizar su rugosidad [15] hasta la medición de la velocidad en movimientos vibratorios de sistemas físicos [15] o la velocidad de un flujo [16].

Para aplicaciones de cambio del estado del agua y la caracterización de la velocidad en la formación de la capa de hielo, Yang et al. [17] propone una solución a través de la correspondencia de imágenes. Las características de las imágenes que se utilizan en la correspondencia son la intensidad y la textura calculada mediante la entropía. El trabajo realizado por Kohl et al. [18] propone un sistema para evaluar el grado de disolución de una mezcla en agua, ayudándose del contraste que otorga el color de

sustancias comestibles bajo la aplicación de luz blanca y estima la absorción de los elementos concentrados en el agua. De igual manera en [19], se estudia una muestra diluida de agua y etanol, la cual es analizada por medio del procesamiento de imágenes y evaluada mediante distintas técnicas como la calorimetría.

Como antecedentes de la estimación de la velocidad, durante el proceso de congelación de una solución con baja concentración de sólidos, del frente de hielo utilizando el procesamiento de imágenes se tienen los trabajos propuestos por Pardo et al. [2, 20]. Los autores proponen un sistema de visión para la detección del frente de hielo basado en la segmentación de imágenes de color en el espacio CIELAB [21] mediante umbra- lización. El umbral utilizado se escoge de manera heurística apoyado en un análisis de curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*, o Característica Operativa del Receptor) para seleccionar el umbral óptimo. La velocidad es estimada mediante al- goritmos de flujo óptico y comparada con métodos de correspondencia de primitivas en la secuencia de imágenes. En el trabajo de esta tesis se busca automatizar el pro- ceso de segmentación en las imágenes para la detección del frente de hielo y estimar la velocidad del frente.

Capítulo 2

Materiales y métodos

En este capítulo se describe el montaje físico del sistema utilizado para la recolección de imágenes, la descripción, las técnicas de procesamiento de imágenes para detectar y estimar la velocidad del frente de hielo de una solución con baja concentración de sólidos, y el diseño de los experimentos realizados. En la figura 2.1 se resumen los diferentes pasos de la metodología utilizada en este trabajo.

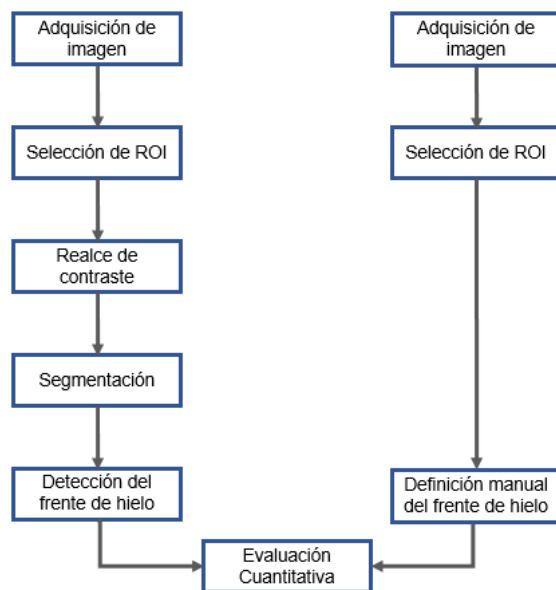


Figura 2.1: Esquema de la metodología utilizada.

2.1. Descripción del montaje físico del sistema

El montaje físico del sistema, para la realización de los experimentos de detección y estimación de la velocidad de crecimiento del frente de hielo, consta de 4 elementos básicos: (i) contenedor de enfriamiento (cristalizador), (ii) sistema de enfriamiento, (iii) cámara fotográfica, (iv) iluminación.

En la figura 2.3 se muestra un esquema del montaje experimental utilizado para la adquisición de imágenes, en el cual se observa principalmente: el contenedor de enfriamiento arriba del sistema de iluminación, el sistema de enfriamiento y el soporte de la cámara. Por otro lado, una fotografía del montaje del experimento se muestra en la figura 2.2.

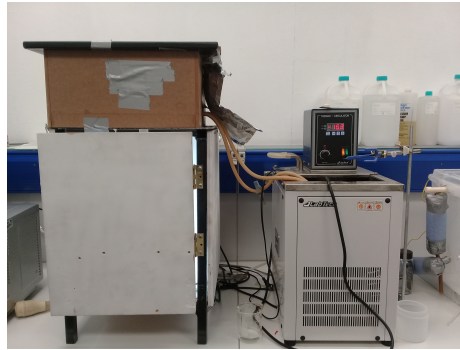


Figura 2.2: Esquema del montaje experimental para la adquisición de imágenes.

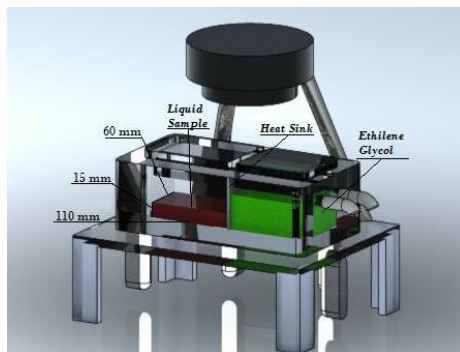


Figura 2.3: Fotografía del montaje experimental para la adquisición de imágenes.
Recuperado de Moya-Albor et al. (2018) [22].

En los siguientes apartados, se describe en detalle cada uno los elementos básicos que conforman el montaje experimental utilizado para la adquisición de imágenes.

2.1.1. Contenedor de enfriamiento y solución con concentración de sólidos

El primer elemento básico del montaje físico del sistema es un contenedor, en la cual se colocará la solución que será enfriada de manera continua para buscar la cristalización del agua. Las dimensiones del contenedor utilizado son de 11cm de base, por 6cm de ancho y 3cm de altura. El contenedor se encuentra descubierto en la parte superior, de tal forma que sea posible la instalación de un sistema de adquisición de imágenes. En la figura 2.4 se muestra una fotografía de la parte superior del contenedor de enfriamiento.

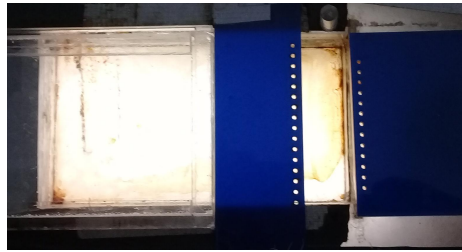


Figura 2.4: Fotografía del contenedor de enfriamiento.

En el contenedor de enfriamiento se coloca la solución con una determinada concentración de sólidos. En la figura 2.5 se muestran las imágenes correspondientes a cuatro diferentes niveles de concentración. La figura 2.5-a corresponde al líquido sin sólidos (agua pura), mientras que las figuras 2.5-b,c,d corresponden a soluciones con un nivel de concentración de 0.1 %, 0.2 % y 0.4 % respectivamente.

2.1.2. Sistema de enfriamiento

El siguiente elemento del montaje experimental es el sistema de enfriamiento, el cual consta de un circulador térmico de fluido que mantiene la temperatura por debajo de los cero grados Celsius, para así lograr la congelación de la solución dentro del contenedor de enfriamiento como se observa en la Figura 2.6. El fluido circulante es un anticongelante conocido como Etilenglicol con una concentración del 50 %. De esta manera, el sistema de enfriamiento impulsa al anticongelante, y este realiza una transferencia de calor por medio de una placa metálica localizada entre los dos

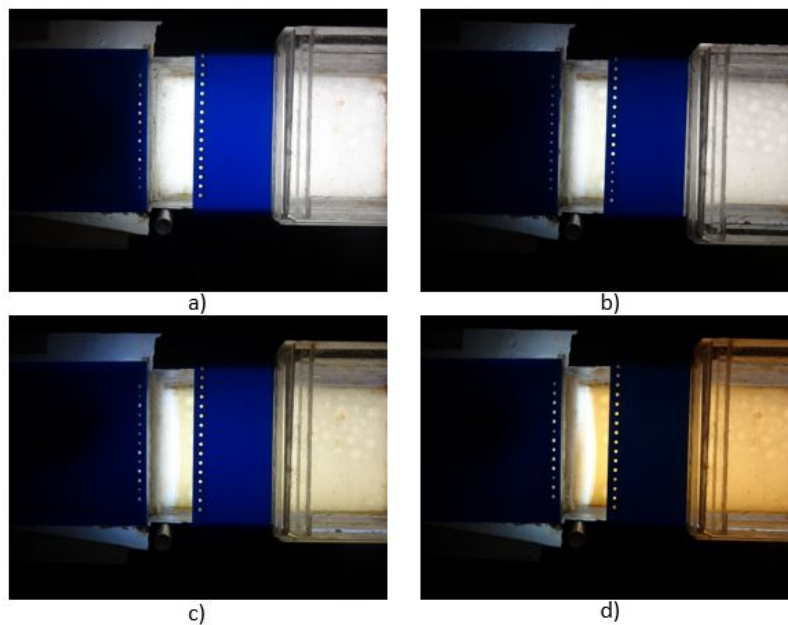


Figura 2.5: Imágenes del contenedor con 4 diferentes niveles de concentración de sólidos. a) Solución sin diluir. b) Solución con una concentración del 0.1 %. c) Solución con una concentración del 0.2 %. d) Solución con una concentración del 0.4 %.

contenedores. La figura 2.7, muestra una fotografía del contenedor de anticongelante.



Figura 2.6: Fotografía del sistema de enfriamiento.



Figura 2.7: Fotografía del contenedor de anticongelante.

El circulador térmico permite regular la temperatura a un nivel deseado, que para el caso de la experimentación se asignó el valor de -15 grados Celsius con la finalidad de obtener tiempos cortos para la formación del hielo. En la figura 2.8 se muestra una fotografía del regulador de temperatura utilizado.



Figura 2.8: Fotografía del regulador de temperatura.

Una vez vertida la solución en el contenedor de enfriamiento, se inicia el proceso de congelación del fluido de manera gradual y la formación del frente de hielo correspondiente.

2.1.3. Cámara fotográfica

Finalmente, a través de una cámara fotográfica se realizó la adquisición de las imágenes de las muestras que se congelaban. Para la experimentación se utilizó una

cámara Sony modelo DSC-QX10 con una resolución espacial de su sensor CMOS de 12 megapíxeles, un zoom óptico de 10x y una distancia focal $f = 4.45$ a 44.4 mm.

2.2. Adquisición y creación del conjunto de datos de imágenes

En esta sección se describe el proceso realizado para la adquisición de las imágenes, las características del conjunto de imágenes formado, así como la creación de las referencias usadas para la validación del método automático de detección del frente de hielo.

2.2.1. Adquisición de las imágenes

La cámara se colocó en una posición vertical en la parte superior del montaje experimental dejando una altura libre entre la solución y la cámara de 15 cm aproximadamente. La técnica de iluminación utilizada es de contraste (*backlight*), que consiste en poner la fuente luminosa detrás del objeto de estudio; en este caso el frente de hielo. Esta técnica tiene la ventaja de resaltar los bordes de los objetos. La figura 2.9 muestra las fuentes luminosas que se colocaron por debajo del contenedor de enfriamiento para favorecer el contraste. De acuerdo a tiempos estimados de la formación del hielo y con base en las dimensiones del experimento, se estableció que el tiempo de muestreo temporal de adquisición de cada imagen de la secuencia es de 5 minutos. La imagen capturada por la cámara es almacenada en una memoria MicroSD, para su posterior procesamiento en la computadora. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo de imagen adquirida por el sistema propuesto.

2.2.2. Creación del conjunto de datos de imágenes

En este trabajo se elaboraron dos conjuntos de datos de imágenes. El primer conjunto de datos consta de cuatro imágenes de soluciones con un nivel de concentración cada una de 0%, 0.1%, 0.2% y 0.4%. Cada concentración cuenta con su respectiva



Figura 2.9: Sistema de iluminación por contraste *backlight* utilizado.

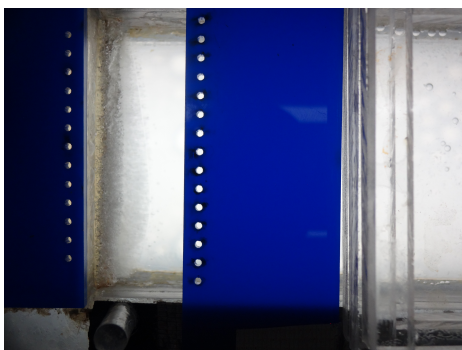


Figura 2.10: Ejemplo de una imagen de muestra, del frente de hielo, adquirida por la cámara fotográfica.

imagen de referencia, la cual corresponde a una delineación manual de la posición del frente de hielo formado. El protocolo usado para definir las referencias se describe en la siguiente sección.

El segundo conjunto de datos de imágenes consta de tres secuencias de imágenes. Las concentraciones de la solución para cada secuencia fueron de 0.1 %, 0.2 % y 0.4 %. Cada imagen de las secuencias fue adquirida con un intervalo de 5 minutos. Cada una de las tres secuencias contiene cinco imágenes correspondientes a cinco tiempos de adquisición.

2.2.3. Protocolo usado para la creación de las referencias

A continuación se describen los pasos del protocolo usado para la creación de las referencias, las cuales indican la posición del frente de hielo y permiten evaluar posteriormente el desempeño del método automático de detección del frente de hielo.

1. Para una determinada concentración de sólidos en una solución se inicia el proceso de congelación. Se espera un tiempo para la formación de un frente de hielo y se realiza la adquisición de la imagen con la cámara. El tiempo de la espera antes de la adquisición de la imagen depende de las condiciones del experimento y para este caso fue fijado en 5 minutos.
2. Se retira la solución no congelada y se cambia por una la solución de café para incrementar el contraste entre el hielo y la solución, y de esta manera resaltar el frente de hielo. Se realiza la adquisición de la imagen con café. En la figura 2.11 se muestra como ejemplo la imagen resultante después de agregar la solución de café.
3. A partir de esta nueva imagen contrastada y a través de una interfaz gráfica en la computadora, un usuario define de manera manual como referencia la posición del frente de hielo. En la figura 2.12 se muestran ejemplos de imágenes contrastadas después de intercambiar la solución congelada con soluciones coloreada con café. Las imágenes corresponden a muestras con diferentes concentraciones de sólidos (0.4 %, 0.2 %, 0.1 %, 0 %), donde se resalta claramente la posición del frente de hielo.

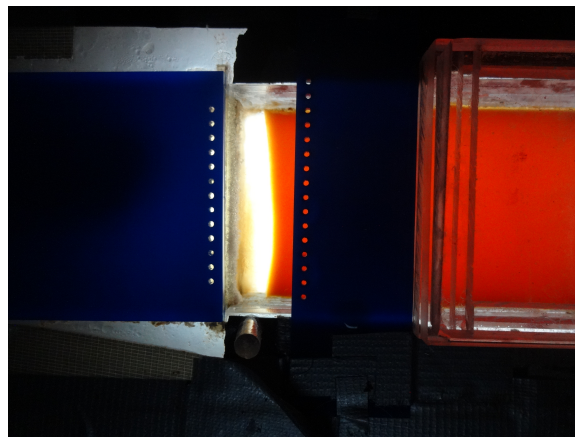


Figura 2.11: Imagen de una solución de baja concentración de sólidos después de agregar café.

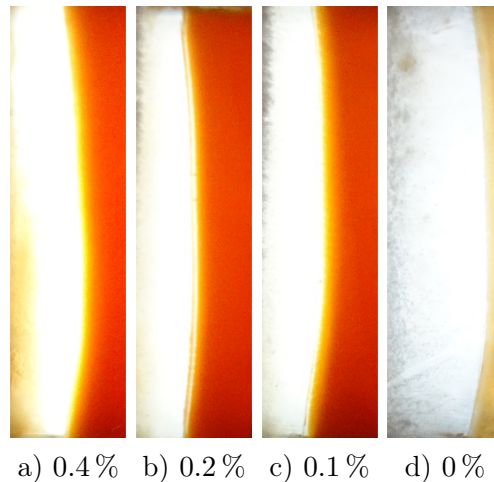


Figura 2.12: Ejemplos de imágenes con diferentes concentraciones (0.4 %, 0.2 %, 0.1 %, 0 %) a las que se les aumentó el contraste en el frente de hielo.

2.3. Técnicas de procesamiento de imágenes utilizadas

En esta sección se describen las diferentes técnicas de procesamiento de imágenes usadas para la extracción y detección del frente de hielo.

El procesamiento de imágenes es un área de desarrollo continuo relacionado con los métodos y algoritmos utilizados para procesar imágenes digitales a través de una computadora. Estos algoritmos han sido inspirados por el sistema de percepción visual humana y la tarea principal que deben resolver es hacer una buena descripción de la imagen para identificar los objetos y caracterizarlos en la escena. Estos métodos se pueden dividir en dos categorías generales: aquellas que requieren un conocimiento previo de la imagen y aquellos que requieren conocimiento previo débil o inexistente. En el primer grupo se encuentran las técnicas más importantes que se basan en estudios psicovisuales en el ser humano [23] y en el segundo grupo los modelos biológicos del sistema de visión [24]. El primero propuesto por los psicólogos de la Gestalt resalta la importancia de la organización o agrupación perceptiva en la descripción de la escena, particularmente los objetos en la escena no deben procesarse por separado. Definen conceptos como proximidad, continuidad, homogeneidad como principios

para implementar reglas de percepción para procesar la imagen. Teniendo en cuenta el concepto de agrupación perceptiva, los métodos de procesamiento pueden clasificarse en nivel bajo, nivel medio y nivel superior dependiendo las características que se quieran extraer y el nivel de descripción de la escena. Los procesos de bajo nivel realizan operaciones para la reducción del ruido y el mejoramiento del contraste o realce. El procesamiento de nivel medio incluye la separación de regiones de nivel de intensidad homogéneo o segmentación, y la caracterización de primitivas. La caracterización incluye color, forma y movimiento (en el caso de procesamiento de vídeo) de las primitivas. Los procesos de alto nivel dan significado al conjunto de regiones reconocidas (objetos y fondo) de los niveles previos, permitiendo una interpretación cognitiva a esta información por medio de la computadora [25].

Para enfrentar el problema de la detección del frente de hielo se utilizarán los siguientes procesos de nivel bajo y medio, basados en estudios psicovisuales [23]:

- Mejoramiento o realce del contraste
- Segmentación de la imagen
- Extracción de primitivas u objetos relevantes (por ejemplo la extracción del frente de hielo)
- Descripción de primitivas (descripción del frente de hielo, posición, desplazamiento en el tiempo)

A continuación se describen cada uno de estos métodos de procesamiento de imágenes, definiendo sus características básicas y su aplicación al problema de la detección del frente de hielo.

2.3.1. Realce del contraste de la imagen

Sea $f(x, y)$ una imagen digital donde x e y representan las coordenadas espaciales de cada uno de los píxeles y f representa la intensidad o nivel de gris de la imagen.

El proceso de realce o mejoramiento del contraste de una imagen $f(x, y)$, es básicamente una transformación T aplicada a los niveles de intensidad de la imagen de

entrada para obtener una imagen resultante $g(x, y)$, esta transformación está dada por:

$$g(x, y) = T\{f(x, y)\} \quad (2.1)$$

Como se observa en la ecuación 2.1, la transformación se aplica a cada píxel de la imagen. Diversos métodos de realce de contraste se pueden aplicar a las imágenes [25]. Para este trabajo se aplicaron dos métodos: el ajuste de intensidad y la ecualización del histograma, los cuales se explican a continuación.

Ajuste de intensidad

Esta es una de las transformaciones de contraste más simples. Dado que algunas imágenes tienen bajo contraste que implican una iluminación pobre o un rango de nivel de gris estrecho. Para mejorar el contraste la idea es ampliar el rango de nivel de gris de la imagen de entrada a través de una transformación lineal. Por ejemplo, sea una imagen de entrada con un rango de niveles de gris $[\frac{L}{2}, L - 1]$, al aplicar la transformación de ajuste de intensidad se desea tener una imagen de salida, con niveles de gris en el rango $[0, L - 1]$, a través de la siguiente relación lineal:

$$s = \left(\frac{L - 1}{\frac{L}{2} - 1} \right) r - \frac{L(L - 1)}{L - 2} \quad (2.2)$$

donde r es el nivel de gris de entrada y s el nivel de gris de la imagen de salida (imagen realzada).

Ecualización del histograma

Sea una imagen con niveles de gris en el rango de $[0, L - 1]$, considerando al nivel de gris r como una variable aleatoria, el histograma de la imagen se define como la función de densidad de probabilidad $p_r(r_k)$ dada por:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad 0 \leq r_k \leq 1 \quad k = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (2.3)$$

donde $p_r(r_k)$ es la función de densidad de probabilidad de la imagen de entrada, n es el número de píxeles de la imagen y n_k es el número de píxeles que tienen nivel de gris r_k en la imagen.

La ecualización del histograma de la imagen consiste en realizar una transformación de la función de densidad $p_r(r)$ de la imagen de entrada a una función de densidad de la imagen de salida $p_s(s)$ que sea uniforme desde el punto de vista probabilístico (que todos los niveles de gris tengan la misma probabilidad). La transformación para encontrar la variable aleatoria de salida s de la imagen ecualizada está dada por:

$$s_k = \frac{L-1}{n} \sum_{j=0}^k n_j \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2.4)$$

2.3.2. Segmentación de la imagen

De acuerdo a la definición de González y Woods [25] “la segmentación consiste subdividir una imagen de entrada en sus regiones constitutivas”. Esas regiones deben ser homogéneas de acuerdo a algún descriptor o característica, por ejemplo el nivel de gris. Idealmente, cada región en la que se subdivide la imagen está representada por una variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad que modela algún descriptor o descriptores (nivel de gris, color, textura). Cada región debe tener entonces características estadísticas diferentes. Por ejemplo el valor esperado y la varianza de cada región debe ser característica para poder fácilmente subdividirla. A la salida del proceso de segmentación, cada píxel de cada región debe tener una etiqueta asociada. A la salida del proceso de segmentación se debe cumplir lo siguiente:

- Cada píxel de la imagen debe pertenecer a una región para considerarse una segmentación completa.
- Los puntos de cada región deben ser conexos.
- Las regiones deben ser disjuntas.
- Cada región debe cumplir unas características determinadas (valores esperados, varianzas etc).

- Cada región es diferente a otra de acuerdo a las características (valores esperados diferentes por ejemplo)

Existen diversos métodos de segmentación de imágenes, algunos con una mayor complejidad matemática y de implementación computacional. Para este trabajo se aplicaron dos métodos: el algoritmo de búsqueda del umbral óptimo y el algoritmo de K-means o de agrupamientos. A continuación se describen ambos métodos.

Algoritmo de Otsu simplificado

El proceso de segmentar en dos regiones una imagen es simple de implementar y rápido desde un punto de vista computacional. La idea es, a partir de un umbral T se dividen los niveles de gris la imagen de entrada $f(x, y)$ en dos regiones para obtener la imagen segmentada de salida $g(x, y)$ [25], este proceso esta dado por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x, y) > T \\ 0 & \text{si } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (2.5)$$

Para el caso de una segmentación en tres regiones, a partir de dos umbrales T_1 y T_2 (para $T_1 < T_2$) la imagen de salida segmentada está dada por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x, y) > T_2 \\ 2 & \text{si } T_1 < f(x, y) \leq T_2 \\ 3 & \text{si } f(x, y) \leq T_1 \end{cases} \quad (2.6)$$

Para el caso de una segmentación en dos regiones, caracterizadas con mismas varianzas pero promedios de nivel de gris diferentes, el algoritmo búsqueda del umbral óptimo (algoritmo de Otsu simplificado) es fácil de implementar y tiene los siguientes pasos:

1. Inicializar el umbral T con un valor dado.
2. Segmentar la imagen usando el umbral T (Ecuación 2.5). Esto produce dos regiones G_1 y G_2

3. Calcular los promedios μ_1 y μ_2 de nivel de gris de las regiones G_1 y G_2 respectivamente
4. Calcular el nuevo umbral T

$$T = \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_2) \quad (2.7)$$

5. Repetir los pasos 2 a 4 hasta alcanzar una convergencia, por ejemplo, hasta que la diferencia entre dos valores consecutivos de T sea menor que un valor predefinido ϵ

Una extensión para más de dos regiones es simple de implementar utilizando el mismo principio de este algoritmo.

Algoritmo de K-means

La principal ventaja de este algoritmo es que para cada píxel de la imagen se puede formar un vector de características que incluyan por ejemplo el nivel de gris, color, textura, gradientes etc. Cada píxel de la imagen es entonces representado por un vector $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ con p características [25]. Para una segmentación de K regiones se definen los K centroides c_j de cada región en el espacio vectorial de dimensión p y la función de costo J dada por:

$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n \|X_i - c_j\|^2 \quad (2.8)$$

Donde n es el número de píxeles de la imagen. La segmentación se vuelve un problema de optimización donde hay que minimizar la función de costo J para los K centroides utilizando el criterio de distancia mínima según la norma euclidiana $\|\cdot\|$. El algoritmo tiene los siguientes pasos:

1. Inicializar la cantidad de regiones en las cuales se va a segmentar, esto corresponde al valor K .
2. Seleccionar aleatoriamente los K centroides c_j .

3. Asignar a cada píxel el centroide más cercano de acuerdo a la distancia euclidiana, generando las K regiones iniciales.
4. Recalcular los K centroides.
5. Reasignar a cada punto el correspondiente centroide más cercano de acuerdo a la norma euclidiana.
6. Iterar hasta que se estabilice la solución.

2.3.3. Textura de una imagen

Además de la intensidad de la imagen representada por en nivel de gris, otras características tales como la suavidad, rugosidad o granulosidad son útiles en la caracterización de las regiones. Cuando se habla de estas características se emplea el término genérico *textura*. La textura de una imagen se puede estimar mediante cantidades calculadas sobre la imagen de forma local tales como la media, la varianza y momentos estadísticos de orden mayor. Otra medida estadística para una imagen que puede estimar la textura es la entropía. El término entropía se usa en varias disciplinas de ciencias tales como la Física y la Química para caracterizar procesos. Esta cantidad refleja un cierto “desorden” en el sistema. En procesamiento de imágenes la entropía es útil para estimar la variabilidad de una imagen siendo cero para imágenes con niveles de gris constante.

Sea r una variable aleatoria que representa los niveles de gris y sea $p(r_i), i = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ la función de densidad de probabilidad correspondiente (histograma de la imagen), donde L es el número de niveles de gris. Un valor de entropía promedio de una imagen está definido por [25]:

$$s = e(r) = - \sum_{i=0}^{L-1} p(r_i) \log_2 p(r_i) \quad (2.9)$$

donde s es el valor de un píxel de la imagen de salida calculado en una vecindad del píxel r de la imagen de entrada.

2.3.4. Extracción de objetos y primitivas

Las técnicas de morfología matemática permiten identificar los objetos y estimar las características geométricas tales como el área, el perímetro, el nivel de gris promedio, la concavidad etc., después del proceso de segmentación. Algunas de las técnicas de morfología matemáticas más usadas son:

- Rellenar huecos en una región.
- Dilatar la región para eventualmente fundir regiones que pertenecen al mismo objeto.
- Erosionar regiones para eventualmente separar regiones que no pertenecen al mismo objeto.

En este trabajo se utilizará la información conocida *a priori* sobre las imágenes para utilizar estas técnicas para mejorar la detección del frente de hielo. Para revisar los detalles de la técnica de morfología matemática ver [25].

2.3.5. Caracterización del frente de hielo y estimación de su velocidad

El frente de hielo se puede caracterizar mediante un contorno o borde de la región que incluye al frente de hielo. La posición del frente de hielo está caracterizada por las coordenadas ordenadas de los píxeles que lo conforman. Una vez realizada la segmentación e identificado el frente de hielo en cada imagen de una secuencia se puede estimar la velocidad. La detección y caracterización del movimiento (velocidad) en una secuencias de imágenes es una tarea importante para describir el movimiento de cada objeto en la imagen. Dos familias de métodos son utilizadas para estimar el desplazamiento y la velocidad de los objetos. La primera se basa en la correspondencia de primitivas o contornos en las diferentes imágenes de la secuencia [26] y métodos más elaborados como flujo óptico que calculan los vectores de velocidad en cada píxel de la imagen [27]. En este trabajo se utilizará la técnica de correspondencia

de contornos para la estimación de la velocidad. El criterio de correspondencia está basado en criterios de similitud de forma entre dos contornos que pertenecen a dos imágenes consecutivas de la secuencia.

2.4. Diseño de los experimentos

En esta sección se enumeran los experimentos realizados y la forma de evaluarlos. Para la detección del frente de hielo se definen 3 experimentos los cuales incluyen diferentes métodos de procesamiento de imágenes. Posteriormente se define la evaluación del desempeño de cada uno de los experimentos. Un último experimento realiza la estimación de la velocidad del frente de hielo y la evaluación correspondiente.

2.4.1. Experimentos de detección del frente de hielo

En esta sección se describen los experimentos realizados para la detección del frente de hielo. En este caso se utilizó el primer conjunto de datos de imágenes que se explica en la sección 2.2.2.

Para cada una de las cuatro concentraciones del conjunto de datos (0%, 0.1%, 0.2% y 0.4%) se realizaron tres experimentos para la detección del frente de hielo para cada imagen de cada concentración. En todos los casos se seleccionó de manera manual una zona de interés en la imagen original para aplicar los métodos. La figura 2.13 muestra las cuatro zonas de interés correspondientes a las cuatro imágenes con diferentes concentraciones.

En todos los experimentos se realizó una transformación de las imágenes RGB o color verdadero a una la escala de niveles de gris. Esta transformación convierte los 3 valores RGB de cada píxel de la imagen a un valor de nivel gris a través de una suma ponderada de los componentes R, G y B dada por:

$$0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B \quad (2.10)$$

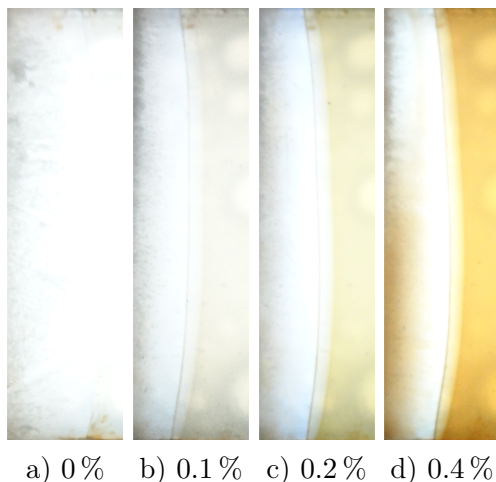


Figura 2.13: Ejemplos de zonas de interés de las imágenes a diferentes concentraciones de sólidos (0%, 0.1%, 0.2% y 0.4%).

En la tabla 2.1 se muestra el algoritmo de realce de contraste y el algoritmo de segmentación usados en cada experimento.

Experimento	Algoritmo de Realce del Contraste	Algoritmo de Segmentación
1	Ecualización del Histograma	Algoritmo de Otsu simplificado
2	Ajuste de Rango de Intensidades	Algoritmo de Otsu simplificado
3	Ecualización del Histograma	K-means con Características de Nivel de Gris y Textura

Tabla 2.1: Algoritmo de realce de contraste y algoritmo de segmentación usado en cada experimento.

Finalmente, en cada uno de los tres experimentos la detección final del frente de hielo se realizó mediante las técnicas de morfología matemática descritas en la sección 2.3.4.

2.4.2. Evaluación de la detección del frente de hielo

La representación del frente de hielo, tanto de la referencia como del frente estimado se representan mediante un contorno en una posición dada. Este contorno es un

segmento de curva con extremidades abiertas. Bajo el supuesto que los dos contornos tienen formas similares se calculará la distancia promedio entre los dos mediante un algoritmo utilizado para medir el diámetro de las estructuras vasculares en imágenes cardíacas de rayos X [28]. Este algoritmo estimará una distancia promedio punto a punto y servirá para estimar el error de estimación de la posición del frente de hielo.

2.4.3. Experimentos de estimación de la velocidad del frente de hielo

En esta sección se describen los experimentos propuestos para la estimación de la velocidad del frente de hielo. En este caso se utilizó el segundo conjunto de datos de imágenes que se explica en la sección 2.2.2.

Para cada imagen de la secuencia correspondiente a cada concentración (0.1 %, 0.2 % y 0.4 %) se realizaron los mismos tres experimentos descritos en la sección 2.4.1. Una vez detectado el frente de hielo para cada experimento de cada concentración se estimaron los desplazamientos del frente de hielo. La estimación del desplazamiento se hizo mediante correspondencia de primitivas utilizando el método descrito en [26].

2.4.4. Evaluación de la estimación del desplazamiento del frente de hielo

En cada imagen para cada secuencia, se trazará el frente de hielo de manera manual y se estimará el desplazamiento del frente de hielo a partir del mismo algoritmo de correspondencia [26]. Los desplazamientos trazados de manera manual serán entonces las referencias para evaluar la estimación del desplazamiento del frente de hielo.

Capítulo 3

Resultados

Este capítulo se divide en varias secciones mostrando los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo. En primer lugar, se muestran los resultados de los métodos de realce de contraste utilizados. En segundo lugar, se presentan los resultados de la extracción de la textura en las imágenes. Posteriormente, los resultados de la segmentación y la detección del frente de hielo son mostrados. Finalmente, una análisis de la estimación de la velocidad del frente de hielo es presentada.

3.1. Resultados del realce de contraste

La figura 3.1 muestra las imágenes originales, después de una transformación de RGB a nivel de gris, con diferentes concentraciones (a) 0%, b) 0.1%, c) 0.2% y d) 0.4%) y los respectivos histogramas (e) 0%, f) 0.1%, g) 0.2% y h) 0.4%) de las imágenes originales. En las imágenes con concentraciones 0.1%, 0.2% y 0.4% se puede apreciar visualmente el frente de hielo mientras que en la imagen con concentración de 0% es imposible apreciar visualmente la posición del frente de hielo. Por otro lado, los histogramas muestran la distribución de niveles de gris para cada imagen, donde se puede observar que la distribución en los cuatro casos está cargada hacia los niveles de gris cercanos al blanco (entre 128 y 255 niveles de gris). Además, para la concentración de 0.4%, se observan claramente dos regiones con características estadísticas diferentes representadas por los dos picos del histograma aproximadamente

en el nivel de gris 220 y en el nivel de gris 255. Para la concentración de 0.2 % los picos se acercan y las características estadísticas de las dos regiones se empiezan a superponer. Sin embargo, se aprecia un pico en el nivel de gris 240 y en el nivel de gris 255 que representan dos regiones diferentes. Para las concentraciones 0.1 % y 0 % no se aprecian dos regiones con características estadísticas diferentes. De acuerdo a las observaciones hechas parece ser necesario el procesamiento de la imagen mediante un algoritmo de realce para mejorar el contraste y poder segmentar de manera automática o con un umbral fijo.

3.1.1. Resultados del realce de contraste usando la ecualización del histograma

La figura 3.2 muestra las imágenes ecualizadas (usando como entrada las imágenes de la figura 3.1) con diferentes concentraciones (a) 0 %, b) 0.1 %, c) 0.2 % y d) 0.4 %) y los respectivos histogramas ecualizados (e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %). En las cuatro imágenes ecualizadas se mejora el contraste después del proceso de ecualización. Se observan visualmente regiones con nivel de gris cercano a los blancos y grises y regiones de niveles de gris oscuros cerca de cero. El frente de hielo se observa claramente en las concentraciones 0.1 %, 0.2 % y 0.4 % a pesar de que en los bordes de la imagen el frente se hace indetectable. Para el caso de 0 % no se puede observar visualmente el frente de hielo.

3.1.2. Resultados del realce de contraste usando el ajuste de intensidad

En esta sección se muestran los resultados de realce de contraste (usando como entrada las imágenes de la figura 3.1) usando el método de ajuste de intensidad. Para ello se utilizaron dos conjuntos de valores del algoritmo de ajuste de intensidad. El primer conjunto de valores utiliza los niveles de intensidad [128, 255] y el segundo los niveles de intensidad [192, 255].

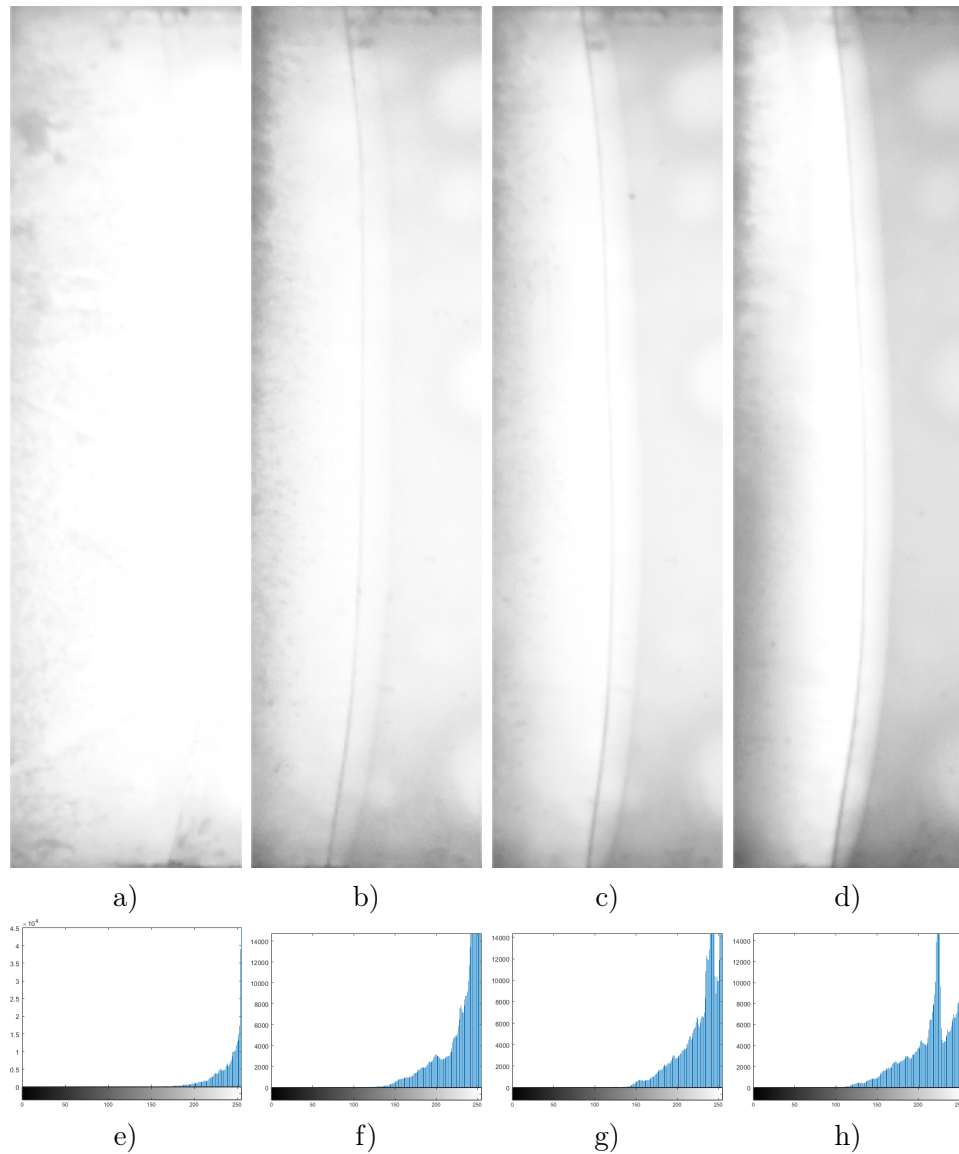


Figura 3.1: Primer conjunto de datos de imágenes en escala de niveles de gris y sus histogramas correspondientes. Primera fila: imágenes originales con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes para cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.

La figura 3.3 muestra las imágenes con realce de contraste utilizando el ajuste de intensidad utilizando $[128, 255]$ y la figura 3.4 muestra las imágenes después de un ajuste de intensidad usando los valores $[192, 255]$. En ambas imágenes se muestra en la parte inferior los histogramas resultantes correspondientes a cada imagen. Se puede observar un mejor contraste en las cuatro imágenes cuando se utiliza la segunda estrategia de ajuste de intensidad ($[192, 255]$). Igualmente, en los histogramas se observa

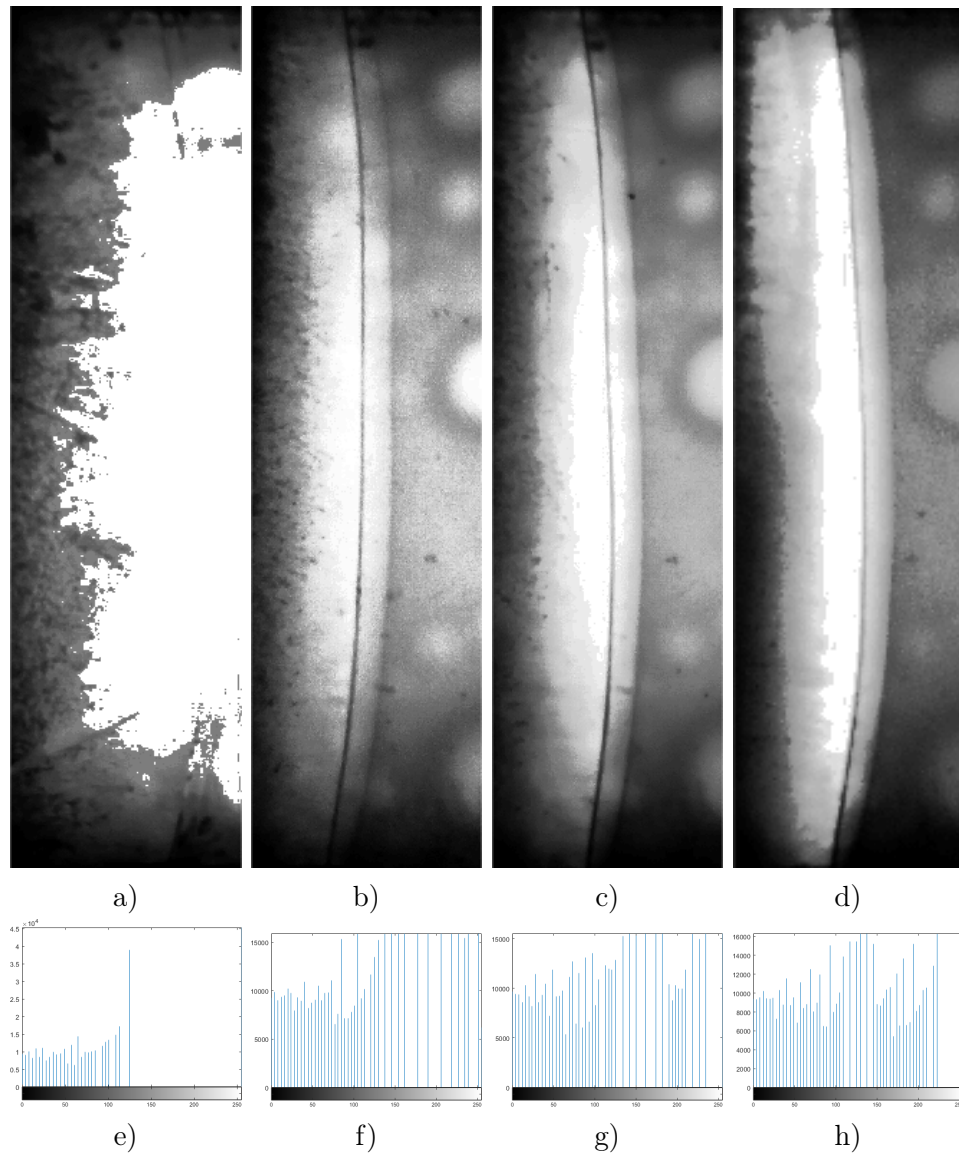


Figura 3.2: Resultados de la ecualización del histograma del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes ecualizadas con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas ecualizados correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.

más claramente dos poblaciones de píxeles caracterizadas por dos picos representativos en particular para las concentraciones de 0.2 % y 0.4 %. Para la concentración de 0.1 % en la figura 3.4-e se observa en el histograma un pico diferenciador en el extremo derecho de dos poblaciones de píxeles, no tan claramente definido como en la figura 3.4-f y la figura 3.4-g. Para la concentración 0.0 % el realce no permite observar el frente de hielo.

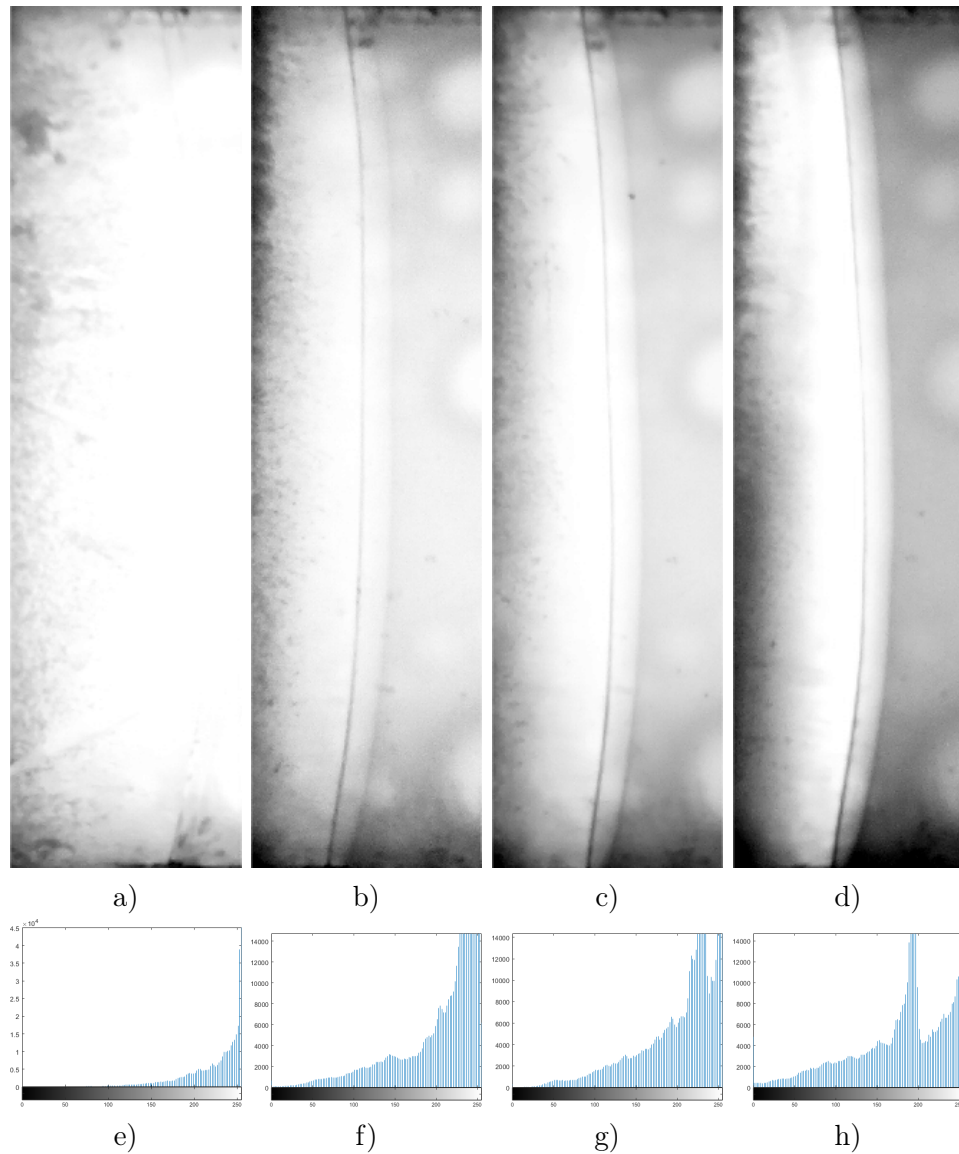


Figura 3.3: Resultados del ajuste de intensidad del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes con ajuste de intensidad en un rango de nivel de gris entre 128 y 255, y con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.

3.2. Extracción de la textura

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la extracción de la textura en el primer conjunto de datos de imágenes.

La figura 3.5 muestra las imágenes de textura calculadas mediante la entropía promedio dentro de una vecindad (ecuación 2.9) para las concentraciones de 0 % en

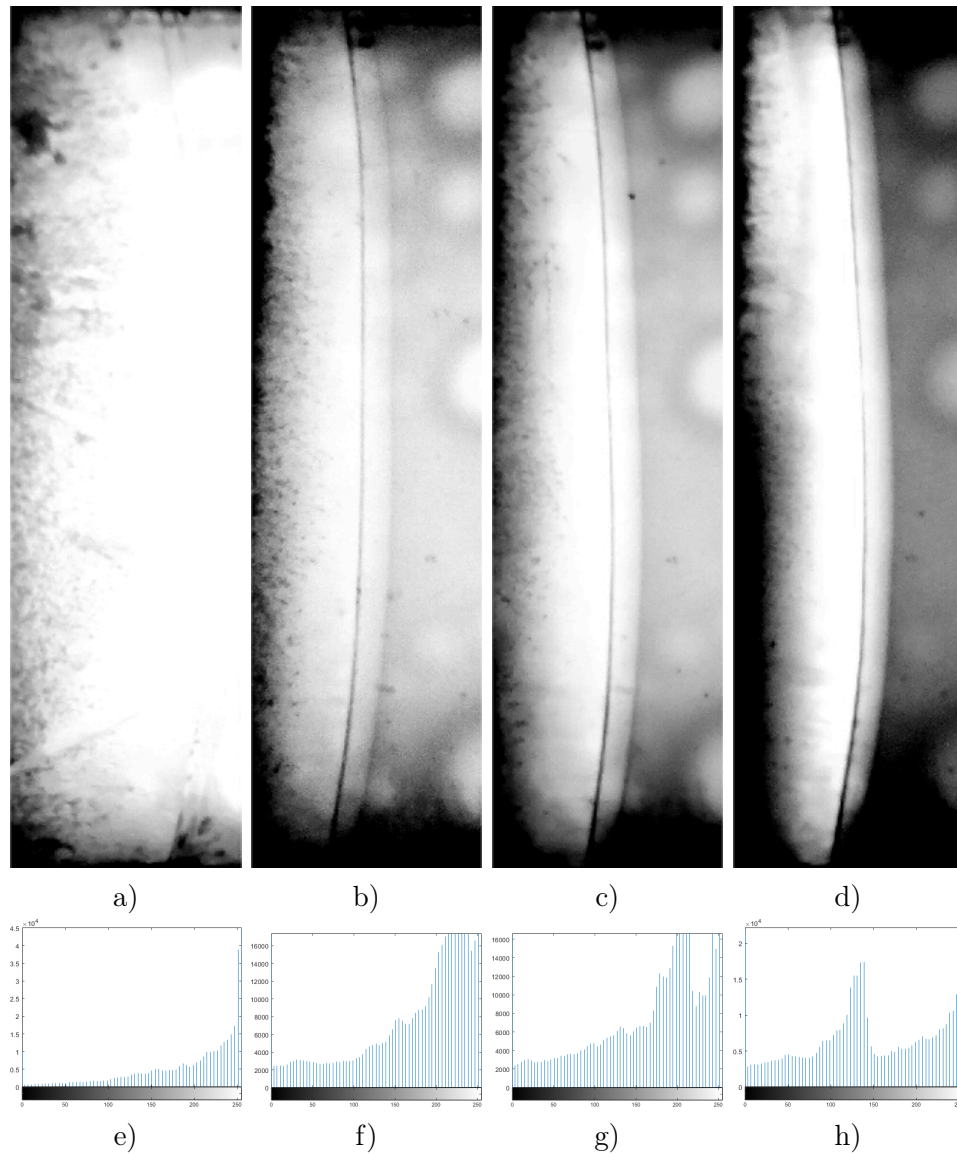


Figura 3.4: Resultados del ajuste de intensidad del primer conjunto de datos de imágenes. Primera fila: imágenes con ajuste de intensidad en un rango de nivel de gris entre 192 y 255, y con concentraciones a) 0 %, b) 0.1 % c) 0.2 % y d) 0.4 %. Segunda fila: histogramas correspondientes a cada imagen e) 0 %, f) 0.1 %, g) 0.2 % y h) 0.4 %.

la figura 3.5-a, 0.1 % en la figura 3.5-b, en la figura 3.5-c 0.2 % y en la figura 3.5-d 0.4 %. Los resultados presentados permiten observar que se detectan los cambios abruptos en la imagen independientemente de los valores de intensidad de las imágenes. En particular se observa la detección del borde correspondiente al frente de hielo. Independientemente de la concentración el borde correspondiente al frente de hielo se observa claramente en todas las imágenes. El conocimiento *a priori* de las

imágenes nos permite saber que el frente de hielo corresponde al borde izquierdo. Esta información *a priori* se utilizará para la detección final del frente de hielo.

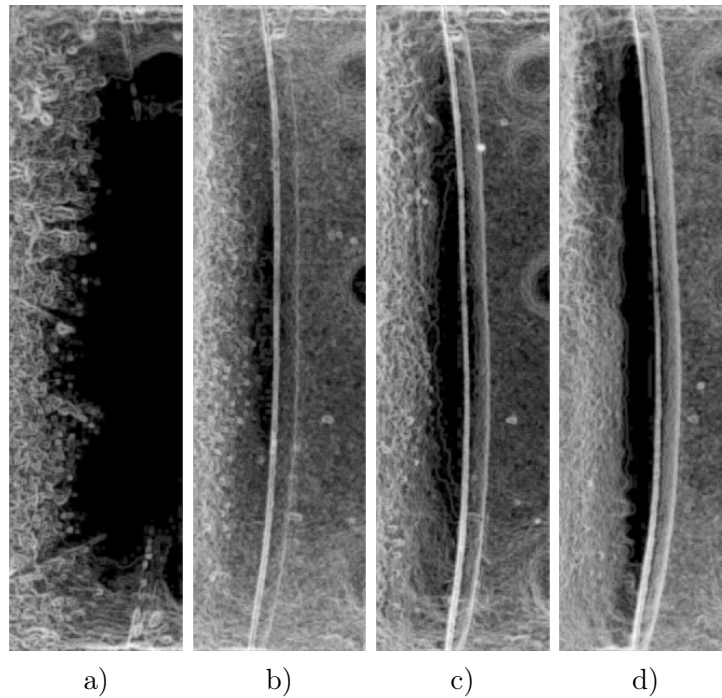


Figura 3.5: Resultados de la extracción de la textura por entropía en el primer conjunto de datos de imágenes a diferentes concentraciones: a) 0%, b) 0.1% c) 0.2% y d) 0.4%.

3.3. Proceso de segmentación y detección del frente de hielo

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en los tres experimentos definidos en la tabla 2.1, donde para cada experimento se utiliza un determinado algoritmo de realce de contraste (ecualización del histograma o ajuste de intensidad) y un algoritmo de segmentación (Otsu simplificado o K-means). Mientras que en todos los casos, la detección del frente de hielo se realizó mediante técnicas de morfología matemática y conocimiento *a priori* sobre las imágenes.

3.3.1. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 1)

Para el experimento 1 se utilizó la ecualización del histograma para realizar el realce del contraste y el algoritmo de Otsu simplificado para la segmentación. En la figura 3.6 se observan los resultados para las diferentes concentraciones. En la primera fila, los resultados para la imagen correspondiente a la concentración 0.4%. En la figura 3.6-a en rojo se observa la segmentación. En la figura 3.6-b se observa la detección del objeto de mayor área, después de un llenado de huecos mediante operaciones de morfología matemática. Finalmente, en la figura 3.6-c, se observa en rojo el frente de hielo detectado mediante el conocimiento *a priori* de la imagen (se selecciona el contorno del lado derecho del objeto ovalado). En azul se observa el contorno del frente de hielo de referencia obtenido por el experto. En la segunda fila de la figura 3.6 se observan los resultados para la concentración de 0.2% utilizando el mismo procedimiento. En la figura 3.6-d se muestra la segmentación, en la figura 3.6-e se muestra el objeto detectado de mayor área después de aplicar las operaciones morfológicas y en la figura 3.6-f se muestra el frente de hielo detectado en rojo y el contorno de referencia en azul. En la tercera fila de la figura 3.6 se observan los resultados para la concentración de 0.1% utilizando el mismo procedimiento. En la figura 3.6-g se presenta la segmentación, en la figura 3.6-h el objeto detectado de mayor área después de las operaciones morfológicas y en la figura 3.6-i el frente de hielo detectado en rojo y el contorno de referencia en azul.

3.3.2. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 2)

Para el experimento 2 se utilizó el ajuste de intensidad para realizar el realce del contraste y el algoritmo de Otsu simplificado para la segmentación. En la figura 3.7 se muestran los resultados para las diferentes concentraciones. Para la concentración de 0.4% en la figura 3.7-a se muestra la segmentación, en la figura 3.7-b, el objeto de mayor área y en la figura 3.7-c, la detección del frente y su referencia. Para la

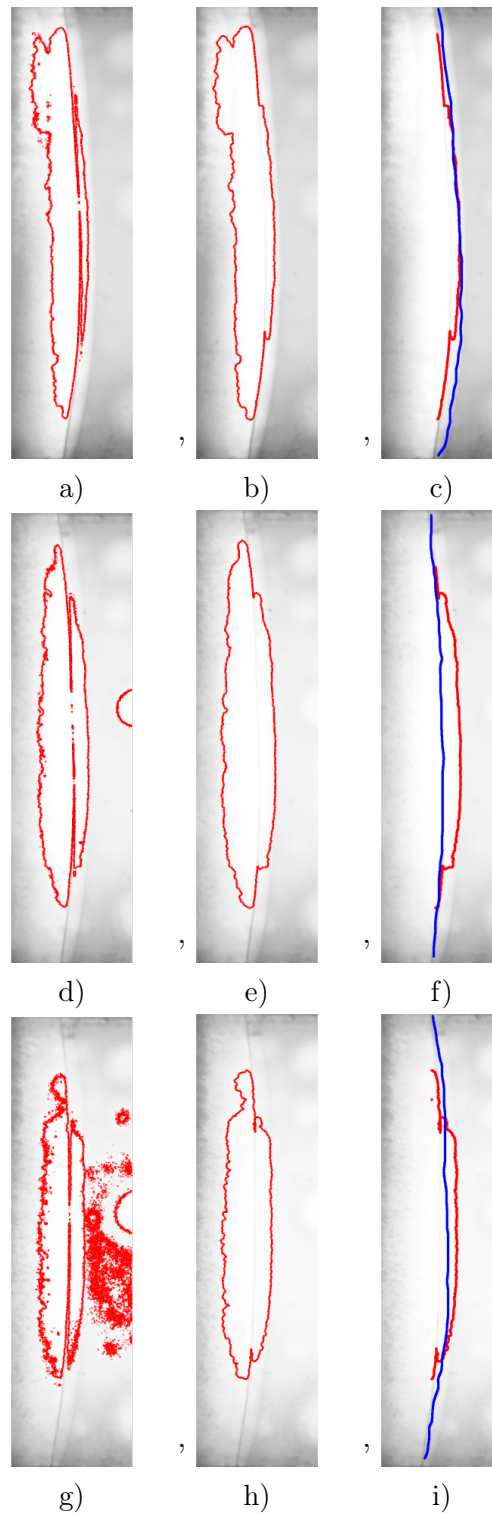


Figura 3.6: Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 1). Fila 1: concentración de 0.4 %. Fila 2: concentración de 0.2 %. Fila 3: concentración de 0.1 %. Columna 1: segmentación después de aplicar ecualización y el algoritmo de Otsu (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul).

concentración de 0.2% en la figura 3.7-d se muestra la segmentación, en la figura 3.7-e, el objeto de mayor área y en la figura 3.7-f, la detección del frente (rojo) y su referencia (azul). Para la concentración de 0.1% en la figura 3.7-g se presenta la segmentación, en la figura 3.7-h, el objeto de mayor área y en la figura 3.7-i, la detección del frente (rojo) y su referencia (azul).

3.3.3. Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 3)

Finalmente, para el experimento 3 se utilizó la ecualización del histograma para realizar el realce del contraste y el algoritmo de K-means, utilizando la información de textura calculada mediante entropía, para la segmentación. En la figura 3.8 se muestran los resultados para las diferentes concentraciones. Para la concentración de 0.4% en la figura 3.8-a se muestra la segmentación, en la figura 3.8-b, el objeto de mayor área y en la figura 3.8-c, la detección del frente de hielo y su referencia. Para la concentración de 0.2% en la figura 3.8-d se presenta la segmentación, en la figura 3.8-e, el objeto de mayor área y en la figura 3.8-f, la detección del frente (rojo) y su referencia (azul). Para la concentración de 0.1% en la figura 3.8-g se muestra la segmentación, en la figura 3.8-h, el objeto de mayor área y en la figura 3.8-i, la detección del frente (rojo) y su referencia (azul).

3.4. Evaluación del método de la detección del frente de hielo

En esta sección se evalúan los resultados descritos en la sección 3.3 para las tres concentraciones y los tres tipos de experimentos definidos en la sección 2.4.1. El error se calculó mediante la distancia mínima promedio entre el frente de hielo detectado y el frente de hielo de referencia. En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los errores obtenidos para las concentraciones de 0.4%, 0.24% y 0.1%, respectivamente. La columna uno indica el tipo de descriptor utilizado (nivel de gris o textura), en la

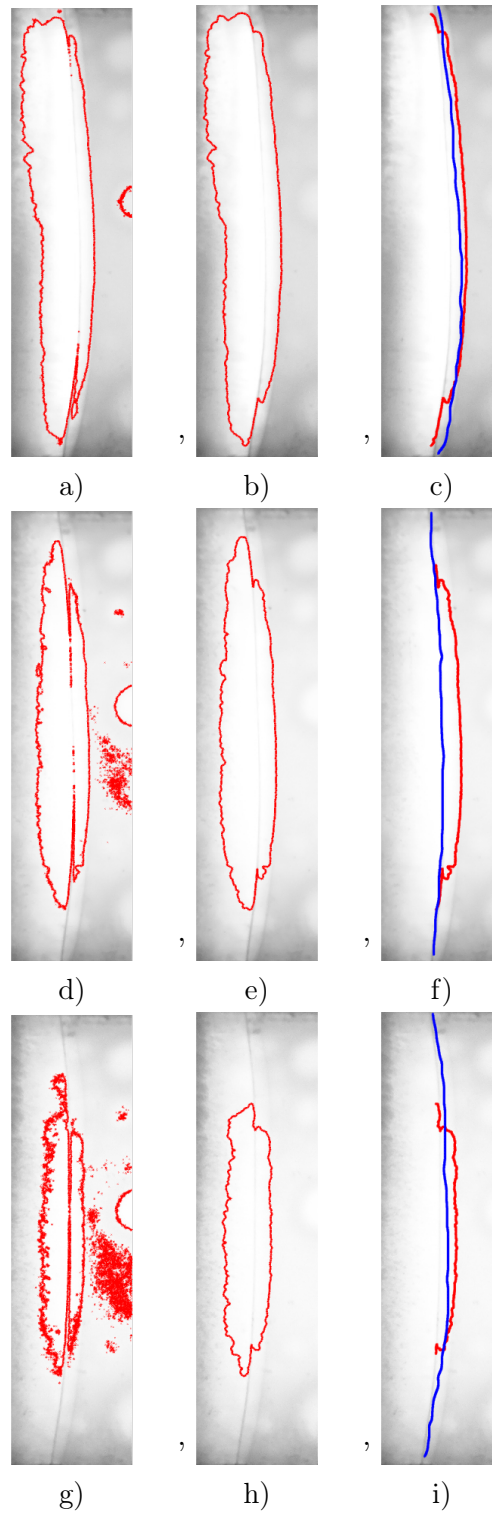


Figura 3.7: Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 2). Fila 1: concentración de 0.4 %. Fila 2: concentración de 0.2 %. Fila 3: concentración de 0.1 %. Columna 1: segmentación después de aplicar el ajuste de intensidad y el algoritmo de Otsu (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul).

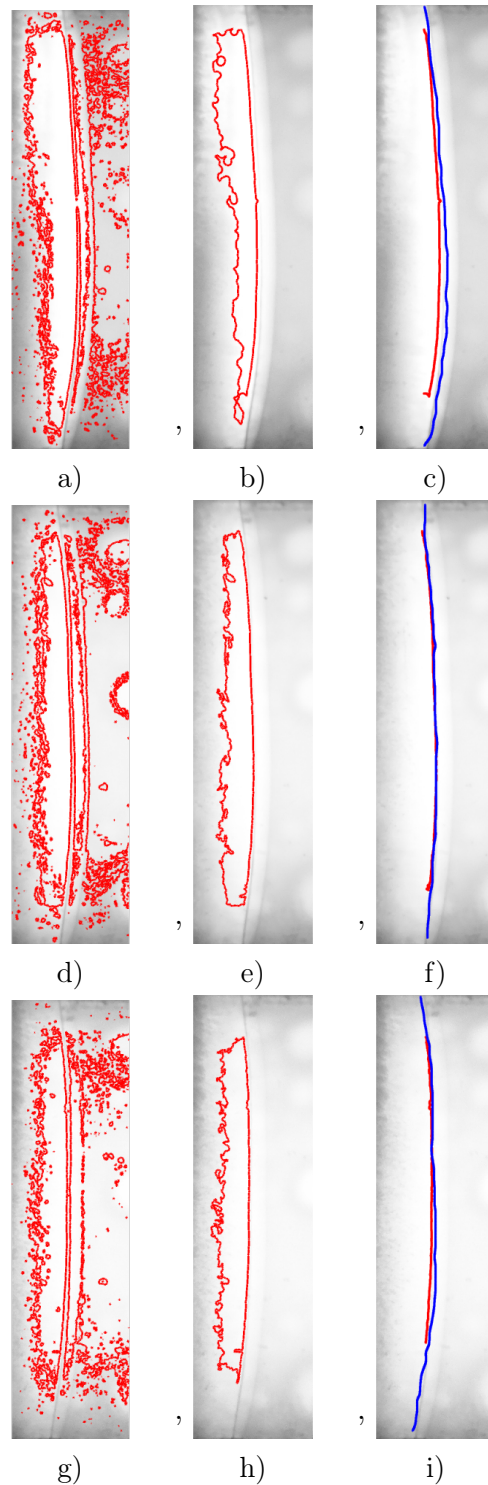


Figura 3.8: Resultados de la detección del frente de hielo (experimento 3). Fila 1: concentración de 0.4%. Fila 2: concentración de 0.2%. Fila 3: concentración de 0.1%. Columna 1: segmentación después de aplicar ecualización y el algoritmo de K-means (rojo). Columna 2: región de mayor área (rojo). Columna 3: frente de hielo (rojo) y referencia (azul).

columna dos se indica el tipo de realce de contraste usado (ecualización del histograma o ajuste de intensidad). En la columna tres se presenta el tipo de algoritmo de segmentación utilizado (Otsu simplificado o K-means), y finalmente en la columna cuatro se muestran los errores (en píxeles) obtenidos para los tres experimentos. Es importante mencionar que para la imagen con una concentración de 0.4 %, la solución más contrastada, los resultados son similares pero el menor error es para el experimento 1 (nivel de gris, ecualización del histograma y segmentación por el algoritmo de Otsu simplificado) con un valor de 11.79 ± 8.75 , sin embargo los otros errores son similares. Para el caso de 0.2 % de concentración el uso de la información de textura minimiza el error con un valor de 3.63 ± 7.22 píxeles. Igualmente para el caso de 0.1 % de concentración el error más pequeño tiene un valor de 19.69 ± 5.44 píxeles.

Descriptores	Realce de contraste	Segmentación	Error (píxeles)
Nivel de gris	Ecualización	Otsu	11.79 ± 8.75
Nivel de gris	Ajuste de intensidad ([128, 255])	Otsu	18.45 ± 8.83
Nivel de gris y textura (Entropía)	Ecualización	K-means	20.26 ± 11.14

Tabla 3.1: Resultados del error de estimación de la detección del frente de hielo, para la concentración de 0.4 % y para los tres experimentos definidos en la sección 2.4.1.

Descriptores	Realce de contraste	Segmentación	Error (píxeles)
nivel de gris	Ecualización	Otsu	40.8 ± 20.1
nivel de gris	Ajuste de intensidad ([192, 255])	Otsu	44.6 ± 19.67
nivel de gris y textura (Entropía)	Ecualización	K-means	3.63 ± 7.22

Tabla 3.2: Resultados del error de estimación de la detección del frente de hielo, para la concentración de 0.2 % y para los tres experimentos definidos en la sección 2.4.1.

Descriptores	Realce de contraste	Segmentación	Error (píxeles)
nivel de gris	Ecualización	Otsu	24 ± 9.4
nivel de gris	Ajuste de intensidad ([192, 255])	Otsu	23.9 ± 11.53
nivel de gris y textura (Entropía)	Ecualización	K-means	19.69 ± 5.44

Tabla 3.3: Resultados del error de estimación de la detección del frente de hielo, para la concentración de 0.1 % y para los tres experimentos definidos en la sección 2.4.1.

3.5. Estimación de la velocidad del frente de hielo

Como experimento final, en esta sección se muestran los resultados de la estimación de la velocidad del frente de hielo utilizando el segundo conjunto de datos de imagen definido en la sección 2.2.2.

3.5.1. Ilustración del método de la estimación de la velocidad del frente de hielo

En la figura 3.9 se observa la secuencia de imágenes para la concentración de 0.4 % en diferentes tiempos (para este caso en intervalos de 5 minutos). Para cada imagen se estimó el frente de hielo.

Por otro lado, en la figura 3.10, se observa la imagen en el tiempo inicial y sobrepuestos los contornos correspondientes a los frentes de hielo estimados en los diferentes tiempos. Para el ejemplo mostrado se utilizó el realce de contraste mediante ajuste de intensidad y para la segmentación el algoritmo de Otsu simplificado. La línea en rojo representa el estado inicial, la línea azul representa el frente de hielo para un tiempo de 5 minutos, la línea verde para un tiempo de 10 minutos, la línea amarilla corresponde a los 15 minutos, y por último se muestra en gris el frente de hielo para un tiempo de 21 minutos.

Como se describe en la sección 2.4.3 a partir del método de Toumoulin et al. [26], se hace la correspondencia punto a punto entre dos frentes de hielo en diferentes tiempos para estimar el desplazamiento correspondiente. En la figura 3.11, se observa

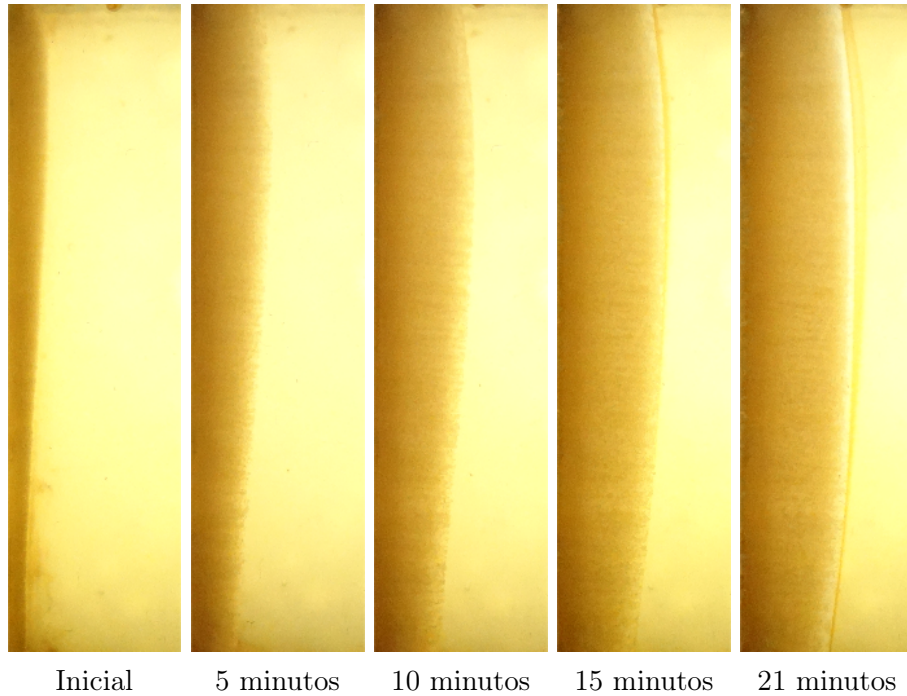


Figura 3.9: Secuencia de crecimiento del frente de hielo con una concentración de 0.4%.

en color verde la correspondencia entre punto a punto entre dos frentes de hielo consecutivos. De izquierda a derecha, se tiene el intervalo de 0 a 5 minutos (figura 3.11-a) , posteriormente el intervalo de 5 a 10 (figura 3.11-b) minutos, 10 minutos a 15 minutos (figura 3.11-c) y de 15 minutos a 21 minutos (figura 3.11-d).

Posteriormente, se obtuvo la distancia promedio estimada entre frentes de hielo en tiempos consecutivos (intervalos relativos). La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos entre los intervalos de tiempo (en minutos) siguientes: $[0, 5]$, $[5, 10]$, $[10, 15]$ y $[15, 21]$. En las dos primeras columnas se observan los valores de los tiempos inicial y final entre dos imágenes. En la columna tres, los valores de las distancias entre los contornos obtenidos. Las columnas cuatro y cinco, muestran la distancias promedio inicial y acumulada entre dos frentes de hielo en tiempos consecutivos. Por último, la columna 6 muestra la velocidad estimada en píxeles por minuto.



Figura 3.10: Contornos representando el crecimiento del frente de hielo para una concentración del 0.4 %. El orden cronológico de crecimiento del frente de hielo está dado por los colores: rojo (tiempo inicial), azul (5 min), verde (10 min), amarilla (15 min) y gris (21 min).

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0	0	0	0	
0	5	49.8343	0	49.8343	9.9668
5	10	32.0007	49.8343	81.835	6.40014
10	15	20.7088	81.835	102.5438	4.14176
15	21	12.0816	102.5438	114.6254	2.0136

Tabla 3.4: Distancia promedio estimada entre frentes de hielo en tiempos consecutivos (intervalos relativos), para una concentración de 0.4 %.

Otra medida significativa corresponde a la distancia estimada en intervalos absolutos, esto es, la distancia entre el frente de hielo en el tiempo inicial de 0 minutos (referencia) y el frente de hielo para un tiempo de interés. En la tabla 3.5 se observan los desplazamientos promedio medidos desde el tiempo inicial a cada uno de los tiempos en los cuales se adquirió una imagen.

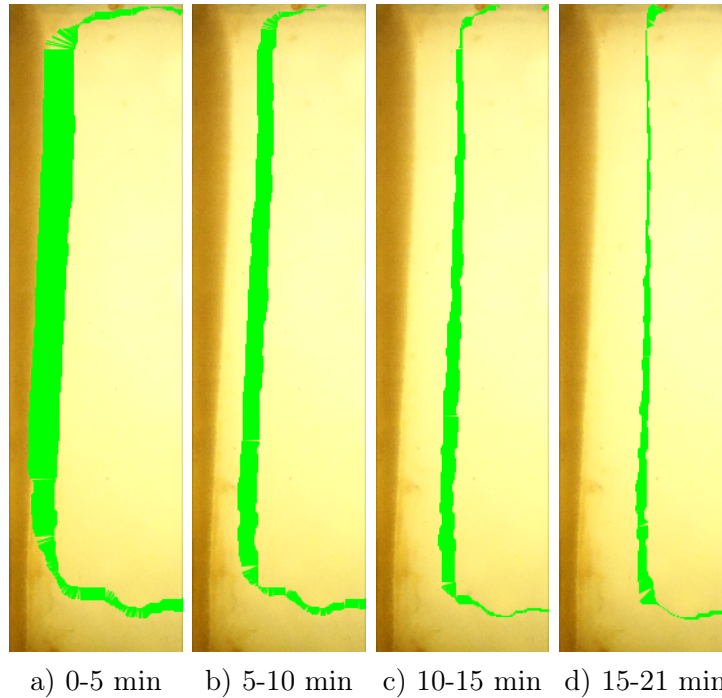


Figura 3.11: Correspondencia entre los píxeles para frentes de hielo en tiempos consecutivos. a) Correspondencia entre 0 y 5 min. b) Correspondencia entre 5 y 10 min. c) Correspondencia entre 10 y 15 min. d) Correspondencia entre 15 y 21 min.

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0		0	0	
0	5	49.8343	0	49.8343	9.96686
0	10	75.5056	0	75.5056	7.55056
0	15	93.858	0	93.858	6.2572
0	21	104.6035	0	104.6035	4.9811

Tabla 3.5: Distancia promedio estimada tomando como referencia el tiempo inicial de 0 minutos (intervalos absolutos), para una concentración de 0.4 %.

En la figura 3.12 se observan las curvas de ajuste de los desplazamientos estimados en función del tiempo usando intervalos relativos (azul) e intervalos absolutos (rojo), para una concentración de 0.4 %. Para la obtención de las curvas se utilizó una función cuadrática de ajuste a partir de los valores de las tablas 3.4 y 3.5.

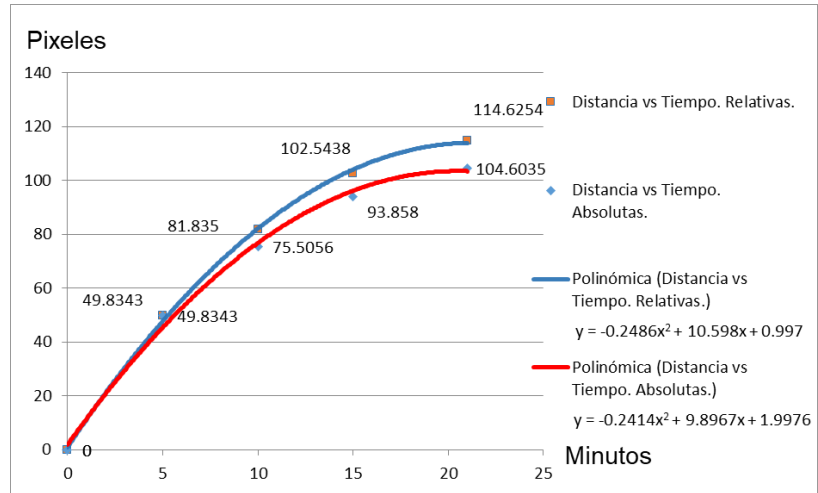


Figura 3.12: Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.4 %.

En las tablas 3.6 y 3.7 se muestran los valores de desplazamiento absolutos y relativos para la concentración de 0.2 %. En la figura 3.13 se muestran las curvas interpoladas con una función cuadrática para los desplazamientos absolutos (rojo) y relativos (azul) en función del tiempo, y para esta concentración.

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0	0	0	0	
0	5	10.973	0	10.973	2.1946
5	10	10.483	10.973	21.456	2.0966
10	15	5.334	21.456	26.79	1.0668
15	21	3.5139	26.79	30.3039	0.58565

Tabla 3.6: Distancia promedio estimada entre frentes de hielo en tiempos consecutivos (intervalos relativos), para una concentración de 0.2 %.

Por último, las tablas 3.8 y 3.9 muestran los valores de desplazamiento absolutos y relativos para la concentración de 0.1 %. En la figura 3.14 se muestran las curvas interpoladas con una función cuadrática para los desplazamientos absolutos(rojo) y relativos(azul) en función del tiempo, y para esta concentración.

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0	0	0	0	
0	5	10.5435	0	10.5435	2.1087
0	10	17.2237	0	17.2237	1.7224
0	15	14.0896	0	14.0896	0.9393
0	21	15.1369	0	15.1369	0.7208

Tabla 3.7: Distancia promedio estimada tomando como referencia el tiempo inicial de 0 minutos (intervalos absolutos), para una concentración de 0.2 %.

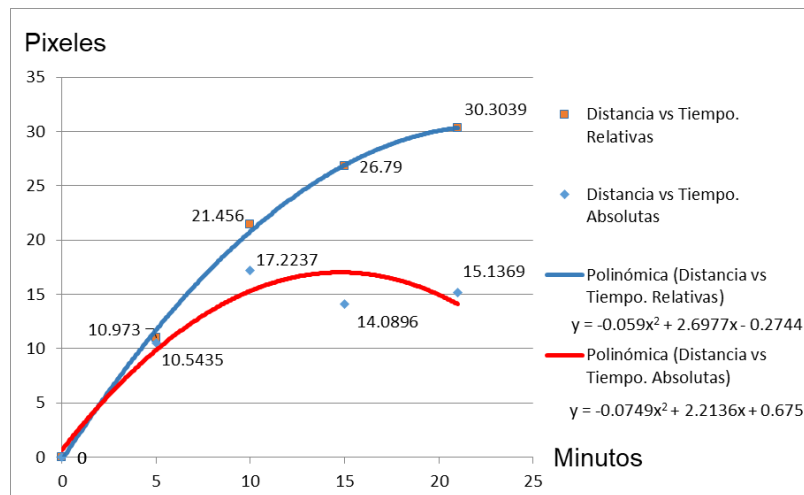


Figura 3.13: Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.2 %.

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0	0	0	0	
0	8	19.7967	0	19.7967	2.4746
8	12	13.3208	19.7967	33.1175	3.3302
12	18	6.3746	33.1175	39.4921	1.0624
18	23	3.3974	39.4921	42.8895	0.6795

Tabla 3.8: Distancia promedio estimada entre frentes de hielo en tiempos consecutivos (intervalos relativos), para una concentración de 0.1 %.

Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Distancia (píxeles)	Distancia acumulada inicial (píxeles)	Distancia acumulada final (píxeles)	Velocidad (píxeles/min)
0	0	0	0	0	
0	8	19.7967	0	19.7967	2.4746
0	12	31.6364	0	31.6364	2.6364
0	18	35.2052	0	35.2052	1.9558
0	23	38.0918	0	38.0918	1.6562

Tabla 3.9: Distancia promedio estimada tomando como referencia el tiempo inicial de 0 minutos (intervalos absolutos), para una concentración de 0.1 %.

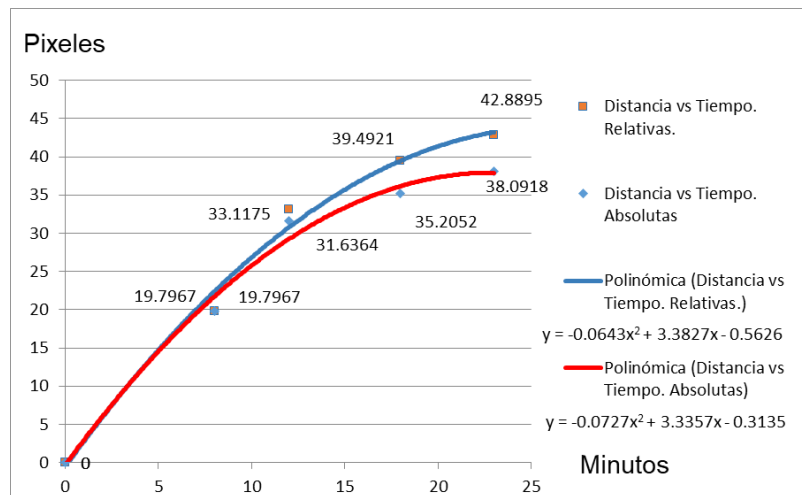


Figura 3.14: Desplazamientos del frente de hielo usando intervalos relativos y absolutos para la concentración de 0.1 %.

3.5.2. Comparación de la estimación de velocidad del frente de hielo para los tres experimentos

De igual manera, se realizó el mismo procedimiento de estimación de la velocidad para las tres concentraciones (0.4 %, 0.2 % y 0.1 %), utilizando los tres experimentos explicados en la sección 2.4.1. Además, se agregaron los desplazamientos estimados sobre los contornos de referencia como se explica en la sección 2.4.3.

En las figuras 3.15, 3.16 y 3.17 se muestran las curvas correspondientes a las concentraciones de 0.4 %, 0.2 %, y 0.1 % para el experimento 1 (rojo), experimento 2 (Azul), experimento 3 (verde) y referencia (negro). Las estimaciones de los despla-

mientos se realizaron utilizando las distancias relativas. Finalmente, en la tabla 3.10 se observan los errores absolutos de los desplazamientos estimados por experimento y por concentración calculados a partir de las curvas de las figuras 3.15, 3.16 y 3.17.

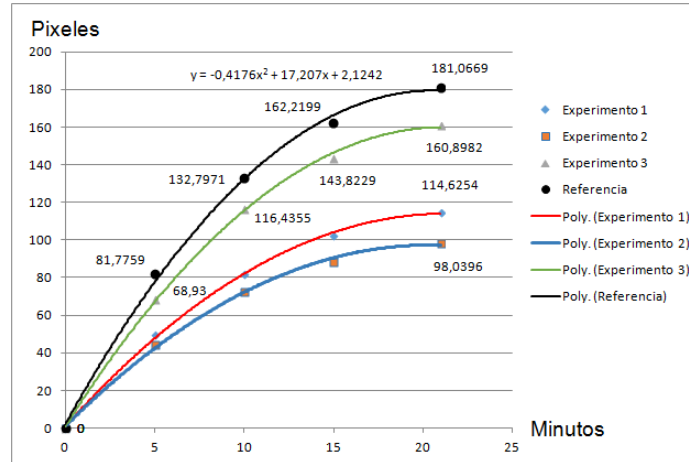


Figura 3.15: Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.4%.

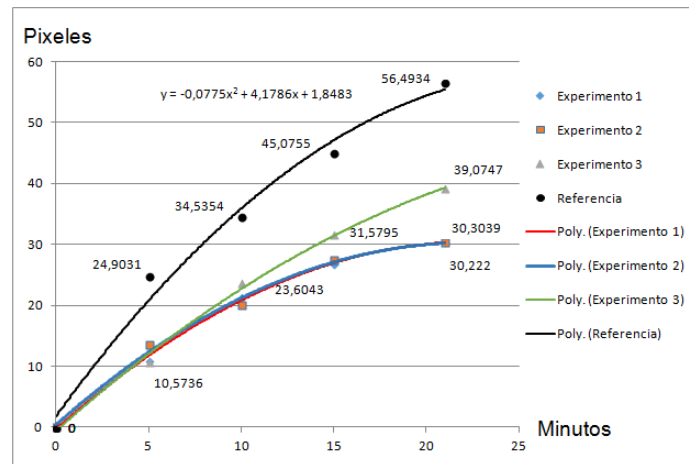


Figura 3.16: Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.2%.

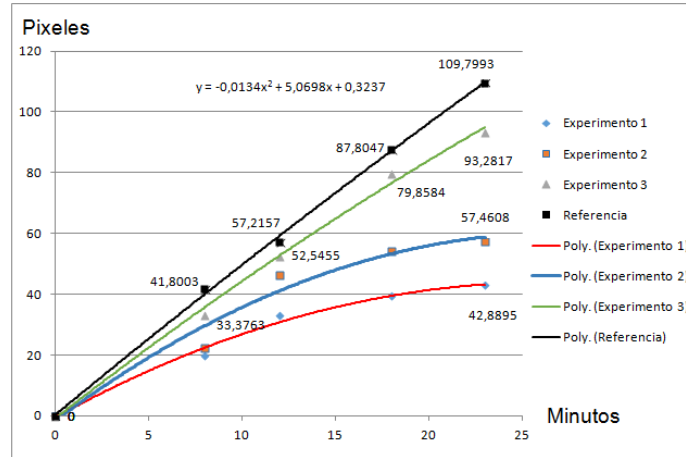


Figura 3.17: Desplazamientos relativos para los tres experimentos y la referencia, para una concentración de 0.1 %.

Experimento	Error (píxeles)		
	Concentración 0.4 %	Concentración 0.2 %	Concentración 0.1 %
1	51.5	17.29	40.33
2	63.6	18.45	29.59
3	16.91	11.43	9.39

Tabla 3.10: Error absoluto promedio del desplazamiento, para tres diferentes concentraciones (0.4 %, 0.2 %, y 0.1 %) y experimentos.

Capítulo 4

Discusión

En esta propuesta de solución al problema de la detección del frente de hielo a partir de procesamiento de imágenes se implementó una cadena de procesamiento completa. El proceso completo se diseñó con base en un modelo perceptual que va desde procesos de bajo nivel (realce de contraste) hasta procesos de alto nivel (descripción de la posición y la velocidad del frente de hielo). En el proceso de realce de contraste se utilizaron dos técnicas, la ecualización del histograma y el relace de contraste mediante ajuste de intensidad. Si bien visualmente se observan en las dos estrategias resultados similares (figuras 3.2, 3.3 y 3.4) para todas las concentraciones, una ventaja de la ecualización es que no se necesita ningún parámetro que se deba ajustar. En el caso de ajuste por intensidad los resultados están en función del intervalo de nivel de gris escogido. En el proceso de segmentación, el método de Otsu simplificado utiliza supuestos estadísticos para realizar la segmentación mientras que la técnica de K-means resuelve un problema de optimización. Las dos técnicas han demostrado ser adecuadas en el proceso de segmentación, sin embargo, la ventaja de implementación para K-means es la posibilidad de introducir otros descriptores además del nivel de gris dado que el problema de minimización es fácilmente extensible a nivel vectorial. En este trabajo se introdujo la textura mediante el método de entropía que permite la detección del borde del frente de hielo independientemente de la concentración (salvo en el caso de 0%). Al agregar este descriptor, los resultados mejoraron claramente en el proceso de segmentación y detección del frente de hielo

(ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3). En el proceso de estimación de la velocidad se observa para los tres métodos utilizados un comportamiento acorde a lo esperado físicamente, e decir que a medida que el frente de hielo avanza en el tiempo, el desplazamiento es menor para un mismo período de tiempo (la velocidad va decreciendo). El menor error absoluto promedio para las cuatro concentraciones de la estimación del desplazamiento fue para la estrategia que utiliza el descriptor de entropía (ver tabla 3.10). La mejor técnica utilizada es entonces la correspondiente al experimento 3 que utiliza este descriptor. Dado que la textura caracteriza las variaciones locales de la imagen independientemente de la intensidad promedio local, el crecimiento de los cristales se caracteriza mejor con este descriptor. En esta estrategia preliminar de solución mediante procesamiento de imágenes, los resultados observados son coherentes con lo esperado físicamente. Estos resultados son el primer paso en el diseño de una estrategia completamente automática.

Conclusiones

El control de la cristalización y en particular la velocidad de crecimiento de los cristales es un factor clave para un proceso exitoso de crio-concentración. En este trabajo de tesis se propuso un sistema de procesamiento de imágenes que permite estimar la velocidad del frente de hielo a partir de una secuencia de imágenes para cuatro tipos de concentraciones de la solución. El procesamiento de la secuencia de imágenes consta de procesos estándar de procesamiento de imágenes tales como el realce de contraste, la segmentación, y la formación de estructuras pertinentes. En esta propuesta se incluyeron descriptores de nivel de gris y textura para el proceso de segmentación.

Con la estrategia propuesta, se logró identificar el frente de hielo en soluciones de baja concentración. Los mejores resultados para la detección del frente de hielo para soluciones de baja concentración (0.2 % y 0.1 %) se obtuvieron utilizando la estrategia que utiliza el descriptor de textura (entropía). Para este caso, los errores promedio de la posición del frente de hielo fueron de 3.63 ± 7.22 píxeles y de 16.69 ± 5.44 píxeles. Para la concentración de 0.4 % el mejor resultado se obtuvo utilizando el descriptor de nivel de gris utilizando un realce de ecualización para el que se obtuvo un error de 11.79 ± 8.75 píxeles.

Los mejores resultados para la estimación del desplazamiento del frente de hielo se obtuvieron cuando se utilizó el descriptor de textura. Para este caso, los errores promedio de estimación del desplazamiento del frente de hielo fueron 16.91 píxeles, 11.43 píxeles y 9,39 píxeles para las concentraciones 0.4 %, 0.2 % y 0.1 % respectivamente. Se observó que la velocidad estimada del frente de hielo muestra la tendencia esperada pues disminuye a medida que el frente avanza. El conjunto de datos de imá-

genes utilizado en este trabajo fue pequeño y se requiere realizar más pruebas con esta misma metodología para obtener resultados más confiables. Esta propuesta de solución es un resultado preliminar para el diseño de una estrategia completamente automática.

Trabajo futuro

Indudablemente se requiere un mayor conjunto de datos de imágenes para confirmar los resultados obtenidos con esta propuesta. Además, parece necesario también introducir otros descriptores de textura para mejorar la detección. Los coeficientes de Hermite, dada su inspiración en el sistema visual humano, parecen una buena primera opción para calcular la textura y agregarla a los descriptores. Otras técnicas basadas en fractales podrían ser útiles en la detección en particular en las soluciones con concentraciones muy bajas o cercanas al 0%. Aunado a esto, técnicas basadas en inteligencia artificial ayudarán el proceso de automatización y robustez de la propuesta.

Para la estimación de la velocidad se utilizó una técnica simple basada en la correspondencia de primitivas. Una estrategia basada en algoritmos de flujo óptico es deseable como estimador de velocidad para futuras propuestas.

Una estrategia automática de detección de la zona de interés también debe implementarse para hacer la estrategia de procesamiento de imágenes automática.

Finalmente, este sistema debe introducirse en un sistema de control que basado en el procesamiento de imágenes, pueda controlar la velocidad de desplazamiento del frente de hielo.

Bibliografía

- [1] D. Randall and J. Nathoo, “A succinct review of the treatment of reverse osmosis brines using freeze crystallization,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 8, pp. 186–194, 2015. cited By 33.
- [2] J. Pardo, E. Moya-Albor, G. Ibarra, and J. Brieva, “Image analysis applied to a freeze-concentration water purification system,” vol. 2017-August, pp. 16–19, 2017. cited By 0.
- [3] S. Rassoulinejad-Mousavi, J. Azamat, A. Khataee, and Y. Zhang, “Molecular dynamics simulation of water purification using zeolite mfi nanosheets,” *Separation and Purification Technology*, vol. 234, 2020. cited By 0.
- [4] W. Liu, X. Bai, Y. Shen, P. Mu, Y. Yang, and J. Li, “Efficient separation of free organic liquid mixtures based on underliquid superlyophobic coconut shell coated meshes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 231, 2020. cited By 2.
- [5] L. Erlbeck, D. Wössner, K. Schlachter, T. Kunz, F.-J. Methner, and M. Rädle, “Investigation of a novel scraped surface crystallizer with included ice-pressing section as new purification technology,” *Separation and Purification Technology*, vol. 228, 2019. cited By 0.
- [6] M. Ahmad, D. Oatley-Radcliffe, and P. Williams, “Can a hybrid ro-freeze process lead to sustainable water supplies?,” *Desalination*, vol. 431, pp. 140–150, 2018. cited By 1.

- [7] H. Kalke and M. Loewen, “Support vector machine learning applied to digital images of river ice conditions,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 155, pp. 225–236, 2018. cited By 0.
- [8] D. Perovich, W. Tucker III., and K. Ligett, “Aerial observations of the evolution of ice surface conditions during summer,” *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, vol. 107, no. 10, pp. SHE 24–1 – 24–14, 2002. cited By 113.
- [9] S. Roques, “An airborne icing characterization probe: Nephelometer prototype,” *Smart Materials and Structures*, vol. 16, no. 5, pp. 1784–1788, 2007. cited By 3.
- [10] I. Nicoud, D. Clarke, G. Taber, K. Stolowski, S. Roberge, M. Song, A. Mathew, and J.-A. Reems, “Cryopreservation of umbilical cord blood with a novel freezing solution that mimics intracellular ionic composition,” *Transfusion*, vol. 52, no. 9, pp. 2055–2062, 2012. cited By 11.
- [11] C. Duguay and P. Lafleur, “Determining depth and ice thickness of shallow sub-arctic lakes using space-borne optical and sar data,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 3, pp. 475–489, 2003. cited By 62.
- [12] K. Steffen and A. Schweiger, “A multisensor approach to sea ice classification for the validation of dmsp-ssm/i passive microwave derived sea ice products,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 56, no. 1, pp. 75–82, 1990. cited By 11.
- [13] B. Woinet, J. Andrieu, M. Laurent, and S. Min, “Experimental and theoretical study of model food freezing. part ii. characterization and modelling of the ice crystal size,” *Journal of Food Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 395–407, 1998. cited By 51.
- [14] T. Tsapikouni and Y. Missirlis, “ph and ionic strength effect on single fibrinogen molecule adsorption on mica studied with afm,” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 57, no. 1, pp. 89–96, 2007. cited By 62.

- [15] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, and A. Razionale, “Low-frame-rate single camera system for 3d full-field high-frequency vibration measurements,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 123, pp. 143–152, 2019. cited By 0.
- [16] A. Haapala, M. Honkanen, H. Liimatainen, T. Stoor, and J. Niinimäki, “Hydrodynamic drag and velocity of micro-bubbles in dilute paper machine suspensions,” vol. 63, pp. 343–354, 2009. cited By 0.
- [17] Z. Yang, Z. Kang, X. Cheng, and J. Yang, “Improved multi-scale image matching approach for monitoring amery ice shelf velocity using landsat 8,” *European Journal of Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp. 56–72, 2019. cited By 0.
- [18] S. Kohl, J. Landmark, and D. Stickle, “Demonstration of absorbance using digital color image analysis and colored solutions,” *Journal of Chemical Education*, vol. 83, no. 4, pp. 644–646, 2006. cited By 29.
- [19] J. Labuta, J. Hill, L. Hanykova, S. Ishihara, and K. Ariga, “Probing the micro-phase separation of thermo-responsive amphiphilic polymer in water/ethanol solution,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, no. 12, pp. 8408–8416, 2010. cited By 10.
- [20] J. Pardo, E. Moya-Albor, G. Ortega-Ibarra, and J. Brieva, “Freezing front velocity estimation using image processing techniques,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 151, 2020. cited By 0.
- [21] CIE, “Cie 1976 l*a*b* color space,” standard, International Commission on Illumination, 2007.
- [22] E. Moya-Albor, J. M. Pardo, A. Gregori, and J. Brieva, “Hybrid methods to quantify ice front movement during freeze-concentration process,” in *2018 Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NANOfIM)*, pp. 1–6, Nov 2018.
- [23] A. Treisman, “Perceptual grouping and attention in visual search for features

- and for objects.,” *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 8, no. 2, p. 194, 1982.
- [24] R. A. Young, “The Gaussian derivative model for spatial vision: I. Retinal mechanisms.,” *Spatial Vision*, vol. 2, no. 4, pp. 273–293, 1987.
- [25] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [26] C. Toumoulin, J. Brieva, J.-J. Bellanger, and H. Shu, “String matching techniques for high-level primitive formation in 2-d vascular imaging,” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 7, no. 4, pp. 291–301, 2003.
- [27] E. Moya-Albor, B. Escalante-Ramírez, and E. Vallejo, “Optical flow estimation in cardiac CT images using the steered Hermite transform,” *Signal Processing: Image Communication*, vol. 28, no. 3, pp. 267–291, 2013.
- [28] J. Brieva, M. Gálvez, and C. Toumoulin, “Coronary extraction and stenosis quantification in x-ray angiographic imaging,” vol. 26 III, pp. 1714–1717, 2004.