



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA CUANTIFICACIÓN DE SECUENCIAS DE VÍDEO E IMÁGENES DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN EL DIAGNÓSTICO Y SEGUIMIENTO DEL SÍNDROME DEL DOLOR REGIONAL COMPLEJO

AUTORA: PAULA RUBIO MAYO

TUTOR: DAVID MORATAL PÉREZ

COTUTORA: MAR CAÑADA SORIANO

Curso Académico: 2019-20

A mis padres, hermana y abuela por la confianza, el sacrificio, el esfuerzo. A mis amigos por acompañarme en todo momento. A David y Mar por la paciencia y la ayuda.

“Una parte del camino es el final”

RESUMEN

El Síndrome de Dolor Regional Complejo (SDRC) es una afección de dolor crónico que consiste en un dolor intenso que se concentra en las extremidades superiores e inferiores. Este síndrome se suele producir tras una lesión en un nervio o en el tejido del área afectada. No existe un tratamiento que permita curar el síndrome, todo lo que existe actualmente permite paliar los síntomas y disminuir el dolor. Uno de los tratamientos terapéuticos que se llevan a cabo para las extremidades inferiores son los Bloqueos Simpáticos Lumbares. Para colocación de la aguja, el guiado de la técnica se realiza mediante fluoroscopia. Previo a la administración de la medicación, se realiza un test de lidocaína para comprobar si la localización de la aguja es la adecuada. Para ello, se observa mediante las imágenes termográficas durante un intervalo de tiempo si aumenta la temperatura de la planta del pie. En caso afirmativo, se administra la medicación correspondiente y, por lo contrario, si no se observan cambios en la temperatura, se recoloca la aguja y se repite el procedimiento.

Este trabajo propone una herramienta que permita detectar mínimas variaciones significativas de temperatura que permitan determinar la localización precisa de inyección del fármaco. La idea es realizar la detección en el menor tiempo posible y evitar realizar más de un intento para localizar el punto de inyección de la levobupivacaína, fármaco empleado en el tratamiento. La punción de esa zona varias veces puede suponer un riesgo para el paciente al ser una zona con vasos sanguíneos importantes que pueden ser perforados y producir una hemorragia.

Las imágenes para analizar se adquirieron mediante termografía infrarroja, una técnica que permite obtener la temperatura superficial de los cuerpos, en este caso de los pies, a partir de la radiación emitida por éstos.

Los resultados del trabajo han sido satisfactorios pues se ha conseguido desarrollar una herramienta de cuantificación de secuencias radiométricas que ha permitido introducir una serie de parámetros cuantitativos y objetivos. Esto supone un gran avance debido a la subjetividad a la que se someten este tipo de tratamientos que se basan principalmente en la percepción del paciente.

Palabras clave: SRDC; lidocaína; segmentación; temperatura; termografía; pies; infrarrojos; análisis de imagen

RESUM

El Síndrome de Dolor Regional Complex (SDRC) és una afecció de dolor crònic que consisteix en un dolor intens que es concentra en les extremitats superiors o inferiors. Aquest síndrome sol produir-se després d'una lesió en un nervi o en el teixit de l'àrea afectada. No existeix tractament que permeta curar el síndrome, tot allò que existeix actualment permet pal·liar els símptomes i disminuir el dolor. Un dels tractaments terapèutics que es duen a terme per a les extremitats inferior són els Bloquejos Simpàtics Lumbars. Per a la col·locació de l'agulla, el guiat de la tècnica es realitza mitjançant fluoroscòpia. Prèviament a l'administració de la medicació, es realitza un test de lidocaïna per a comprovar si la localització de la agulla és l'adequada. Amb este objectiu, s'observa mitjançant les imatges termogràfiques durant un interval de temps si la temperatura de la planta del peu augmenta. En cas afirmatiu, s'administra la medicació corresponent i, pel contrari, si no s'observen canvis en la temperatura, l'agulla es recol·loca i es repeteix el procediment.

Aquest treball proposa una ferramenta que permeta detectar mínimes variacions significatives de temperatura per tal de determinar la localització precisa d'injecció del fàrmac. La idea és realitzar la detecció en el menor temps possible i evitar realitzar més d'un intent per a localitzar el punt d'injecció de la levopuvicaïna, el fàrmac emprat en el tractament. La punció d'eixa zona varies vegades pot suposar un risc per al pacient al ser una zona amb vasos sanguinis importants que poden ser perforats i produir una hemorràgia.

Les imatges a analitzar es van adquirir mitjançant termografia infraroja, una tècnica que permet obtindre la temperatura superficial dels cossos, en aquest cas dels peus, a partir de la radiació emesa per aquests.

Els resultats del treball han sigut satisfactoris ja que s'ha aconseguit desenvolupar una ferramenta de quantificació de seqüències radiomètriques que ha permès introduir una sèrie de paràmetres quantitatius i objectius. Açò suposa un gran avanç degut a la subjectivitat a la que es veuen sotmesos aquest tipus de tractaments que es basen principalment en la percepció del pacient.

Paraules clau: SRDC; lidocaïna; segmentació; temperatura; termografia; peus; infrarojo; anàlisi d'imatge

ABSTRACT

Complex Regional Pain Syndrome (CRPS) is a chronic pain condition consisting of severe pain that is concentrated in the upper and lower limbs. This syndrome usually occurs after injury to a nerve or tissue in the affected area. There is no treatment that allows curing the syndrome, everything that is known is related to the palliation of symptoms and pain relief. One of the therapeutic treatments carried out for the lower limbs is the Lumbar Sympathetic Blocks. For needle placement, the technique is guided by fluoroscopy. Before administering the medication, a test of lidocaine is performed to verify if the location of the needle is adequate. For it, it is observed by means of thermographic images during a time interval if the temperature of the sole of the foot increases. If so, the corresponding medication is administered and, on the contrary, if no changes in temperature are observed, the needle is repositioned and the procedure is repeated.

This work proposes a tool that allows minimum specific temperature variations detection that will determine the precise location of drug injection. The idea is to carry out the detection in the shortest possible time and to avoid carrying out more than one attempt to locate the luvobupinacaine injection site. The repeated spinal tap of that area can entail a risk to the patient since there are an area with important blood vessels that can be perforated and cause a hemorrhage.

The images to be analyzed will be acquired using infrared thermography, a technique that allows obtaining the surface temperature of the bodies, in this case the temperature of the feet, from the radiation emitted by them.

The aim of this Master's Thesis is, therefore, to develop the tool described above. For this purpose, the creation, using MATLAB, of a software with a graphical interface that allows the user to analyze previously acquired thermographic images is proposed. Video sequences of infrared thermography of the soles of the feet of several patients will be available, in which the region of interest will be segmented and analyzed, in order to obtain characteristic parameters that vary over time and allow the diagnosis and characterization of CRPS.

The results of the project have been satisfactory as it has been possible to develop a radiometric sequence quantification tool that has allowed the introduction of a series of quantitative and objective parameters. This implies a great advance due to the subjectivity to which these types of treatments are subjected, which are mainly based on the perception of the patient.

Keywords: *CRPS; lidocaine; segmentation; temperature; thermography; foot; infrared; image analysis*

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	introducción	15
1.1.	Síndrome de Dolor Regional Complejo	15
1.1.1.	Epidemiología y etiopatogenia.....	15
1.1.2.	Fisiopatología	16
1.1.3.	Manifestaciones clínicas.....	18
1.1.4.	Evolución del SDRC.....	19
1.1.5.	Diagnóstico	20
1.1.6.	Tratamiento.....	21
1.2.	Bloqueo simpático lumbar (BSL)	22
1.2.1.	Técnica.....	23
1.2.2.	Signos de eficacia del bloqueo	24
1.3.	Imágenes termográficas.....	24
1.4.	Aplicación de la termografía en medicina.....	25
1.4.1.	Síndrome del dolor regional complejo.....	26
1.4.2.	Otras aplicaciones	27
2.	Objetivos	32
3.	Estado del arte. Métodos de cuantificación de imágenes termográficas.....	33
3.1.	Research IR.....	33
3.2.	Estudio multicéntrico de la asimetría térmica de la piel en el SDRC	35
4.	Materiales y metodología	37
4.1.	Materiales	37
4.1.1.	Materiales físicos.....	37
4.1.2.	Materiales no físicos.....	38
4.2.	Metodología	38
4.2.1.	Metodología de adquisición de las imágenes termográficas.....	39
4.2.2.	Metodología para el desarrollo de la herramienta <i>software</i>	41
1.1.1.	Segmentación y extracción de ROIs	43
4.2.3.	Análisis de los datos de temperatura extraídos.....	49
4.2.4.	Creación de una herramienta de cuantificación de secuencias IR.....	50
5.	Resultados	52
5.1.	Herramienta de cuantificación de imágenes termográficas	52

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

5.1.1.	Paneles de selección y modificación	53
5.1.2.	Botones	59
1.1.2.	Visualización de resultados	60
5.1.3.	Paneles de ayuda.....	68
5.2.	Resultados de cuantificación.....	69
5.2.1.	Bloqueo fallido	69
5.2.2.	Aumento de temperatura del contralateral.....	72
5.2.3.	BSL correcto sin aumento del miembro contralateral	74
6.	Discusión	77
7.	Conclusiones.....	79
8.	líneas futuras.....	80
9.	Bibliografía	81

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	objetivos del presupuesto.....	84
2.	Presupuesto estimado.....	85
3.	Presupuesto final.....	87

Índice de figuras

Figura 1. Evolución en tres fases del SDRC. Fase aguda o inflamatoria (fase 1), fase distrófica (fase 2) y fase atrófica (fase 3)	19
Figura 2. Esquema de un nervio espinal y un ganglio simpático, componente del tronco simpático. Fibras: sensitivas (1) y motoras (2). Médula espinal (3): sustancia blanca (4) y sustancia gris (5). Astas de la médula: anterior (6) y posterior (7). Ganglio espinal (8). Nervio espinal (9). Ramas: dorsal (10) y ventral (11). Ramos comunicantes (12): blanco (13) y gris (14). Tronco simpático (15): ramo interganglionar (16) y ganglio paravertebral (17). Ganglio prevertebral (18) [7].....	23
Figura 3. (Izq.) Imagen IR de las manos de un paciente con SDRC antes del bloqueo simpático. (dcha.) Imagen IR de las manos de un paciente con SDRC después el bloqueo [12].	27
Figura 4. (Izq.) Imagen IR de las manos de un paciente con osteomielitis antes del tratamiento (Dcha.) Imagen IR de las manos de un paciente con osteomielitis después del tratamiento [12].	28
Figura 5. Imágenes IR del pecho en los que se observan anomalías en las distribuciones térmicas que pueden asociarse con lesión o patología [12].....	29
Figura 6. Imágenes IR durante la técnica de acupuntura (antes, durante, 5 minutos después y 20 minutos después) en diferentes puntos de las manos (HeGu, piel y músculo).....	30
Figura 7. Panel de mediciones estadísticas del software Research IR [16].....	33
Figura 8. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Profile Plot de Research IR [16]	34
Figura 9. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Temporal Plots de Research IR [16] ...	34
Figura 10. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Histogram del software Research IR [16]	34
Figura 11. Ejemplo de las imágenes de termografía infrarroja empleadas en el estudio de Chan Woo Cho et al. [17]	35
Figura 12. Distribución de la diferencia de temperatura entre ambos miembros [17].....	36
Figura 13. Cámara IR FLIR E60 [18]	37
Figura 14. Logo FLIR Tools	38
Figura 15. Logo ThermaCAM researcher PRO [20]	38
Figura 16. Logo de Matlab [21]	38
Figura 17. Pipeline de la metodología.....	39
Figura 18. Imagen IR adquirida y visualizada en FLIR Tools	40
Figura 19. Imagen anatómica extraída mediante FLIR Tools de la imagen IR de la izquierda	40
Figura 20. Pantalla del software FLIR Tools en la que se muestra la imagen termográfica adquirida con la imagen anatómica asociada. Además, se muestran la escala de temperatura, los datos de cámara y los parámetros relativos a las condiciones ambientales en el momento de la captura.....	40

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

Figura 21. Pantalla del software FLIR Tools en la que se muestra la imagen termográfica adquirida. Además, se muestran la escala de temperatura, los datos de cámara y los parámetros relativos a las condiciones ambientales en el momento de la captura	41
Figura 22. Proceso de conversión y extracción de las imágenes adquiridas	42
Figura 23. Separación de los pies mediante los rectángulos rojo (pie izquierdo) y verde (pie derecho)	42
Figura 24. Pies separados en imágenes IR	43
Figura 25. Pipeline de la segmentación de las imágenes IR.....	43
Figura 26. Ejemplo de dilatación [22]	44
Figura 27. Ejemplo de erosión [22]	44
Figura 28. Límites de la máscara binaria que sirve para la segmentación de la planta del pie ..	45
Figura 29. Opción de modificar de la herramienta PencilROI con los waypoints que permiten la modificación de las dimensiones de la máscara	45
Figura 30. Localización del primer dedo o hallux sobre la imagen IR	46
Figura 31. Localización de los 5 dedos sobre la imagen IR en orden	46
Figura 32. Regiones anatómicas de interés detectadas en las plantas de los pies obtenidas del artículo de Gauci et al [23]	47
Figura 33. Pipeline del proceso de extracción de las regiones de la planta y los talones.....	47
Figura 34. Máscaras correspondientes a las regiones de los pies extraídas. A) Pie derecho B) Pie izquierdo.....	48
Figura 35. Límites de las regiones de interés sobre las imágenes de termografía de los pies derecho e izquierdo, respectivamente	49
Figura 36. Herramienta de cuantificación de secuencias IR creada con el GUI de Matlab.....	52
Figura 37. Pantalla de visualización de los resultados obtenidos tras la extracción de regiones	52
Figura 38. Panel de selección de la modalidad de adquisición de las secuencias a cuantificar (recuadro rojo)	53
Figura 39. Panel de selección del pie afectado por el SDRC de las secuencias a cuantificar (recuadro rojo)	54
Figura 40. Panel de modificaciones de las regiones extraídas y cuantificadas (recuadro en rojo)	54
Figura 41. Selección de la región 8 del pie izquierdo para modificarla.....	55
Figura 42. Modificación de la región 8 del pie izquierdo moviendo los waypoints para adaptarlos a la forma deseada.....	55
Figura 43. Resultado final de la modificación de la región 8 del pie izquierdo.....	56
Figura 44. Eliminación de la región número 8 del pie izquierdo.....	56

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

Figura 45. Creación de un contorno mediante la herramienta pencilROI dentro de la herramienta de cuantificación	57
Figura 46. Resultado de la creación de una región con la herramienta pencilROI integrada en la herramienta cuantificable	57
Figura 47. Resultado del desplazamiento de una región con la herramienta pencilROI integrada en la herramienta cuantificable	58
Figura 48. Rotación de las regiones de la planta del pie hacia la derecha (-15°).....	58
Figura 49. Rotación de las regiones de la planta del pie hacia la izquierda (+15°).....	59
Figura 50. Botón de 'Comenzar' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación	59
Figura 51. Botón de 'Terminar' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación	60
Figura 52. Botón de 'Analizar datos' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación.....	60
Figura 53. Pantalla de visualización del resultado de la segmentación y extracción de imágenes IR (recuadro rojo)	61
Figura 54. Resultado de la segmentación y cuantificación en el panel de visualizaciones.....	61
Figura 55. Gráfica de temperatura media de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada.....	62
Figura 56. Gráfica de temperatura máxima de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada.....	62
Figura 57. Gráfica de temperatura mínima de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada.....	63
Figura 58. Selector de regiones para representar gráficamente los parámetros de temperatura	64
Figura 59. Tabla con los valores de temperatura media, desviación estándar, temperatura máxima y temperatura mínima en grados centígrados de todas las regiones de un <i>frame</i>	64
Figura 60. Selector del <i>frame</i> del que se quieren ver los datos de temperatura	65
Figura 61. Botón 'Exportar'. Este botón exporta los datos de temperatura a un documento de Excel	65
Figura 62. Visualización de los resultados obtenidos en el panel de gráficas y parámetros (región 1 y <i>frame</i> 1).....	66
Figura 63. Resultados obtenidos en la cuantificación de imágenes IR (no secuencias)	66
Figura 64. Resultados obtenidos en la cuantificación de secuencia	67
Figura 65. Formato del documento de Excel. (1) Las filas se corresponden con el marco temporal (cada imagen IR en segundos). (2) Las columnas se corresponden con las 11 regiones del pie, el instante temporal y el pie correspondiente(dcho. O izq.) (3) En cada hoja de cálculo se guarda cada uno de los parámetros adquiridos	67
Figura 66. Cuadro de texto con recomendaciones acerca de la navegación para facilitar la interacción al usuario.....	68

Figura 67. Ejemplo 1 de mensaje para facilitar la navegación tras la selección de uno de los pies	68
Figura 68. Plantilla de apoyo para ver la correspondencia de los nombres de las regiones con su localización en ambos pies.....	69
Figura 69. Secuencia del sujeto cuyo bloqueo ha sido fallido.....	70
Figura 70. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de ambos pies.....	71
Figura 71. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona media plantar de ambos pies	71
Figura 72. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona del talón de ambos pies	72
Figura 73. Secuencia del sujeto cuyo bloqueo a afectado a la temperatura de ambos miembros (miembro enfermo y contralateral)	73
Figura 74. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de los dedos de ambos pies....	73
Figura 75. Gráficas correspondientes a las temperaturas medias de la zona media plantar de ambos pies	74
Figura 76. Gráficas correspondientes a las temperaturas medias de la zona del talón de ambos pies	74
Figura 77. Secuencia del BSL con aumento normal de temperatura.....	75
Figura 78. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de los dedos.....	75
Figura 79. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona media de la planta del pie.....	76
Figura 80. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias del talón.....	76

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las causas del SDRC [4].....	16
Tabla 2. Resumen de las manifestaciones clínicas del SDRC, separadas en función de si se trata de manifestaciones sensoriales, autonómicas o motoras [3], [5].	18
Tabla 3. Nuevos criterios de la IASP para el diagnóstico del Síndrome del Dolor Regional Complejo (SDRC) [3]	20
Tabla 4. Resumen de los tratamientos empleados para el SDRC	21
Tabla 5. Tabla resumen de los conceptos de dilatación y erosión [22]	44
Tabla 6. Fórmulas de la media y la desviación típica	50
Tabla 7. Presupuesto estimado del personal (Elaboración propia)	85
Tabla 8. Presupuesto estimado de los materiales físicos (Elaboración propia)	85
Tabla 9. Presupuesto estimado de los materiales no físicos (Elaboración propia).....	86
Tabla 10. Presupuesto estimado total (Elaboración propia).....	86

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

Tabla 11. Presupuesto final del personal (Elaboración propia)	87
Tabla 12. Presupuesto final de los materiales físicos (Elaboración propia).....	87
Tabla 13. Presupuesto final de los materiales no físicos	87
Tabla 14. Presupuesto final del proyecto (Elaboración propia).....	88

Acrónimos

SDRC: Síndrome del Dolor Regional Complejo

BSL: Bloqueo Simpático Lumbar

IASP: *International Association for the study of Pain* (Asociación Internacional para el Estudio del Dolor)

AMA: *American Medical Association* (Asociación de Medicina Americana)

SNC: Sistema Nervioso Central

SNP: Sistema Nervioso Periférico

SNS: Sistema Nervioso Simpático

IR: Infrarrojo

TIR: Termografía Infrarroja

NETD: *Noise Equivalent Temperature Difference* (Ruido equivalente a la diferencia de temperatura)

FOV: *Field of Vision* (Campo de Visión)

CGRP: *Calcitonin-gen-related-peptide*

TAC: Tomografía Axial Computarizada

FPA: *Focal Plane Array*

SEDAR: Sociedad Española de Anestesiología, Reanimación y Terapia del Dolor

MEMORIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA**

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Síndrome de Dolor Regional Complejo

Según la *International Association for the study of Pain (IASP)* el Síndrome de Dolor Regional Complejo (SDRC) se define como una situación clínica con dolor continuo y desproporcionado ocurrido semanas o meses después de un traumatismo o fractura [1]. Esta afección no suele responder al tratamiento analgésico convencional y las pruebas no muestran anomalías [2].

El término SDRC fue introducido en 1994. Anteriormente se la conocía como “atrofia aguda inflamatoria” y más adelante el término evolucionó a “distrofia simpática refleja”. Ambos términos, actualmente, hacen referencia al SDRC de tipo I. El SDRC de tipo II se conocía anteriormente como causalgia y estaba relacionado con una lesión en el nervio periférico [2].

En el año 1994 se produjo un excesivo número de diagnósticos de SDRC por ser demasiado laxos los criterios de diagnóstico de la enfermedad. Esto provocó que en el 2007 se introdujera una revisión de los criterios establecidos en el año 2003 en Budapest para resolver el problema del excesivo número de casos. Estos criterios de Budapest pasaron a llamarse criterios de la IASP [1], [2]. Los nuevos criterios dieron lugar a que un 15% de los casos no pudieran ser clasificados dentro de los dos tipos de SDRC antes descritos, por lo que fue necesario describir un nuevo subtipo: SDRC no específico. Sigue siendo necesario mejorar estos criterios para facilitar el diagnóstico en el futuro [2].

1.1.1. Epidemiología y etiopatogenia

Debido a la dificultad en el diagnóstico, los datos epidemiológicos son muy variables. Se calcula que la prevalencia del SDRC tras una fractura traumática oscila entre el 0,03% y el 37% [3]. Las edades varían en los distintos estudios consultados, siendo la edad media 45 años [2], [4]. Diferentes estudios realizados sitúan al SDRC con una incidencia de 26,2 casos por cada 100.000 habitantes en los Países Bajos [3] y 5,46 casos por cada 100.000 habitantes, además de una prevalencia de 20,57 casos por cada 100.000 habitantes, en EE.UU [3]. El SDRC afecta a más mujeres que a hombres (2-3 veces más frecuente), en edades de entre 50 y 70 años y aparece predominantemente en las extremidades superiores [3]. Se ha observado, además, la predominancia del hemicuerpo izquierdo respecto al derecho, pudiéndose afectar cualquier localización, incluidos órganos intraabdominales o pélvicos [4]. Se estima que el 20-35% de los pacientes presenta algún grado de incapacidad como consecuencia del proceso [4]. En la mayoría de los pacientes se reconocen factores desencadenantes, solo el 5-10% de los casos se producen de manera espontánea. Entre los factores predominantes se encuentran los traumatismos, fracturas y cirugías previas. Actualmente no existe relación entre la intensidad de la causa y la gravedad [2], [3]. Las causas del SDRC se pueden clasificar en causas potenciales, posibles y estadísticamente significativas (

Tabla 1) [4].

Tabla 1. Clasificación de las causas del SDRC [4]

Causas potenciales	Causas posibles	Causas estadísticamente significativas
Trauma menor (60-70%): fractura de Colles, fractura de metacarpianos, etc.	Persistencia de mecanismos irritativos de nervios periféricos	Fumar cigarrillos
Cirugía menor: síndrome del túnel carpiano, enfermedad de Dupuytren, etc.	Regeneración incompleta de nervios periféricos	
Tratamiento antituberculoso o fenobarbital	Actividad neurotransmisora anormal Deprivación nutricional secundaria a irrigación arteriovenosa anormal	Esquizofrenia y depresión
Causas atípicas: embarazo, postparto, diabetes mellitus, tumores malignos, enfermedad de Parkinson, patologías del SNC	Dolor central Predisposición genética o familiar	

Analizando diferentes perfiles de pacientes se puede establecer un perfil de riesgo del SDRC, concluyendo que las mujeres, principalmente posmenopáusicas, con antecedentes de traumatismo o fracturas con inmovilización y dolor intenso en las fases iniciales tras la lesión, tienen más probabilidad de padecer la afección.

1.1.2. Fisiopatología

En la inflamación del SDRC no se detectan marcadores convencionales de respuesta inflamatoria [3]. La patogénesis de la enfermedad sigue siendo de origen dudoso y en el 35% de los casos no se ha observado un factor desencadenante [4]. A partir de determinadas observaciones, como el hecho de que el bloqueo del Nervio Simpático mejora los casos con afección bilateral o que la actividad del SNS regulada por el hipotálamo (temperatura corporal) aumenta en el área dañada, supone que se asocie el SDRC a un origen neurogénico [3], [4].

Las fibras nerviosas C tienen, además de una actividad aferente, una actividad eferente secretora. Estas fibras nerviosas C liberan neuropéptidos como la sustancia P o la *Calcitonin-gene-related-peptide* (CGRP). Estas sustancias inducen la aparición de edema, vasodilatación, eritema o hipertermia. La CGRP se asocia a la vez con alteraciones autonómicas, por ejemplo, la hiperhidrosis o un mayor crecimiento de pelo en la zona afectada. La sustancia P, sin

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

embargo, se asocia más con la regulación de la actividad de los osteoclastos y la osteoporosis localizada asociada. Otra sustancia asociada también al SDRC es la Endotelina-, que se encuentra en mayor medida en la zona afectada que en la contralateral. Sin embargo, el óxido nítrico se encuentra en menor concentración [3].

Por otro lado, como factor desencadenante se considera que la liberación de citocinas proinflamatorias, como pueden ser las interleucinas o el factor de necrosis tumoral α (TNF- α), tras producirse un traumatismo, podría facilitar la síntesis y la liberación de estos neuropéptidos en los terminales de las fibras C [3].

La disfunción autonómica, es decir, la actividad anormal del Sistema Nervioso Autónomo, también está presente en el SDRC, pero esta es variable en función de la fase de la enfermedad [3]. Una inhibición inicial del sistema nervioso central junto con sus neuronas vasoconstrictoras induce vasodilatación en la zona afectada por el síndrome. Esto da lugar a extravasación, edema y sufrimiento celular. De esta manera se entra en un círculo vicioso mantenido por la liberación de sustancias tóxicas [5].

Como se ha mencionado ya varias veces, una de las manifestaciones clínicas del SDRC es la inflamación. Debido a que durante la enfermedad los mecanismos de drenado del edema se ven afectados, la fase edematosa e inflamatoria da lugar a una fibrosis de importancia variable. Esto explica las modificaciones observadas en la segunda fase de la enfermedad [5].

La liberación de sustancias como las citoquinas desencadena una sensibilización periférica y, a su vez, existe una sensibilización central que produce alteraciones a nivel autonómico, del dolor y del sistema motor. En función del paciente y sus circunstancias varía la participación de los diferentes mecanismos que finalmente desembocan en el SDRC [5].

A nivel fisiológico, del SDRC se sabe que hay una actividad neuronal anormal que involucra a todo el sistema nervioso. Existen diferentes mecanismos para tratar de explicar la fisiopatología:

- Respuesta de restauración aberrante.
- Reacción inflamatoria intensificada.
- Desuso protector.
- Sistema nervioso simpático disfuncional.
- Disfunción mioaponeurótica.
- Anormalidades del sistema nervioso central [5].

Estudios de neuroimagen han encontrado una disminución del área somatosensorial del área afectada por el córtex si se compara con el miembro no afectado. La representación sensorial de la extremidad afectada está distorsionada y su área se encuentra reducida. En las imágenes neuronales se observan fenómenos de plasticidad neuronal. La extensión de reorganización está relacionada con la intensidad del dolor y el grado de hiperalgesia (alteración del sistema nervioso central y periférico que provoca una percepción exagerada del dolor). Algunos autores atribuyen este efecto a un aumento del área somatosensorial del miembro sano. Además, se ha observado una desinhibición primaria del córtex motor [2].

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

El enigma que envuelve el mecanismo de actuación de la afección explica la existencia de multitud de estudios para analizar cuáles podrían ser los factores desencadenantes del SDRC. Unos estudios advierten la presencia de anticuerpos IgG frente a antígenos de neuronas autonómicas en pacientes con SDR. Eso hace pensar en la posible participación de un mecanismo inmunológico. Otros hablan de una predisposición familiar, lo que invitaría a hablar de un factor genético desencadenante, pero estos datos no son concluyentes. Por último, numerosos estudios consideran que existe una relación entre el SDRC y algunos trastornos como ansiedad, estrés y depresión, pero no se habla de factor de predisposición [2].

1.1.3. Manifestaciones clínicas

El SDRC presenta diferentes síntomas y signos, que pueden variar entre pacientes e incluso en el mismo paciente en función de la fase en la que se encuentre su enfermedad. La Tabla 2 resume la variedad de síntomas asociados a manifestaciones sensoriales, autonómicas y motoras [5],[3].

Tabla 2. Resumen de las manifestaciones clínicas del SDRC, separadas en función de si se trata de manifestaciones sensoriales, autonómicas o motoras [3], [5].

Manifestaciones clínicas	
Manifestaciones sensoriales	<ol style="list-style-type: none">1. Dolor2. Hiperalgnesia3. Alodinia
Manifestaciones autonómicas	<ol style="list-style-type: none">1. Edema2. Cambios de la temperatura cutánea que se localizan en la región afectada3. Coloración cutánea4. Vello y uñas5. Fenómenos sudomotores6. Atrofia cutánea, muscular y ósea
Manifestaciones motoras	<ol style="list-style-type: none">1. Debilidad muscular2. Temblor esencial3. Mioclonías y distonías

El dolor es la principal manifestación sensorial del SDRC. Es un síntoma clave y aparece en el 90% de las personas que padecen la afección. Este dolor puede ser espontáneo, con intensidad variable, pero puede empeorar con la actividad física, los cambios de temperatura o la inmovilización. Se describe como un dolor quemante, punzante o urente localizado en estructuras más profundas como músculo o hueso (68%) [3], [5]. También se encuentra la hiperalgnesia (dolor severo ante un leve estímulo doloroso) y la alodinia (aparición de dolor ante estímulos no dolorosos como el roce cutáneo) como manifestaciones sensoriales de la enfermedad [5].

El edema suele aparecer en el 80% de los casos y se considera una manifestación clínica de tipo autonómico. Suele aparecer enseguida, como edema blando y congestivo. A medida que

avanza la enfermedad el edema distal puede evolucionar y hacerse más duro, e incluso asociarse a la limitación de movilidad [3], [5]. Dentro de estas manifestaciones autonómicas también se encuentran los cambios de temperatura cutánea de la zona afectada. Numerosos estudios hablan de una diferencia de temperatura de hasta 1°C entre la zona afectada y la contralateral [3]. También se ha comprobado que hasta un 40% de los casos presenta una disminución progresiva de la temperatura. Con frecuencia se suele observar una piel hiperémica, rojiza, en las primeras fases de la enfermedad y avanzar hasta presentar livideces en las fases más crónicas. Otras manifestaciones autonómicas pueden ser: la hiperhidrosis, las modificaciones en el vello y las uñas del pie afectado, y la atrofia cutánea, muscular y ósea [3].

Por último, existen una serie de manifestaciones y alteraciones clínicas asociadas al movimiento. En primer lugar, aparece una debilidad muscular con pérdida de fuerza e incapacidad para realizar movimientos complejos. En las primeras fases del SDRC puede que el edema y el dolor dificulten la movilidad, pero en las fases más avanzadas puede aparecer atrofia, fibrosis y contracturas, dificultando aún más esa movilidad. Otras alteraciones motoras son el temblor esencial del miembro afectado, las mioclonías (movimientos involuntarios, breves y rápidos) y la distonía (contracciones musculares e involuntarias que pueden ser sostenidas o intermitentes, causando movimientos de torsión repetidos y posturas anómalas que se producen por la contracción simultánea de músculos agonistas y antagonistas) [3], [5].

1.1.4. Evolución del SDRC

La mayoría de los pacientes se recuperan en 12 meses, mientras que algunos sufren una prolongación de la enfermedad que puede llegar a varios años. Aunque no se cuente con un patrón definido, si se distinguen tres fases (Figura 1).



Figura 1. Evolución en tres fases del SDRC. Fase aguda o inflamatoria (fase 1), fase distrófica (fase 2) y fase atrófica (fase 3)

La fase aguda o inflamatoria es la fase inicial y se caracteriza principalmente porque su manifestación clínica más significativa es el dolor. En esta fase predominan las manifestaciones sensoriales y autonómicas (Tabla 2). Con el tiempo la lesión avanza hasta extenderse a zonas más proximales, surgen alteraciones tróficas y sudomotoras, con aparición de piel sudada, fría y cianótica [2], [3]. En la fase distrófica predominan los trastornos vasomotores y vegetativos con alteraciones autonómicas como hiperhidrosis, frialdad, crecimiento del vello y estrías cutáneas, edema duro y profundo, cianosis, atrofia muscular y ósea. En esta fase persiste el dolor y la rigidez articular con mayor dificultad de movilidad [3]. En la fase atrófica se inician las alteraciones motoras, el dolor puede disminuir, al igual que las manifestaciones autonómicas. Aparece atrofia cutánea, muscular y ósea, con retracción muscular, rigidez articular y anquilosis [2], [3], (reducción parcial o total de la movilidad de una articulación

debido generalmente a que dos huesos se han unido dentro de la articulación, pero también se puede producir a consecuencia de la rigidez de los tejidos articulares).

1.1.5. Diagnóstico

El SDRC no dispone de una prueba *gold-standard* para su diagnóstico. Es por esto que el diagnóstico de la enfermedad que predomina es el diagnóstico clínico [3]. Este se basa en la elaboración de una compleja historia clínica que incluye la severidad y duración de los síntomas y signos, tipo de fractura y gravedad de la lesión, además de la exploración física del miembro afecto [4]. Los nuevos criterios de diagnóstico de las IASP (Tabla 3) han mejorado la especificidad y sensibilidad de los diagnósticos [3].

Tabla 3. Nuevos criterios de la IASP para el diagnóstico del Síndrome del Dolor Regional Complejo (SDRC) [3]

Nuevos criterios de la <i>International Association for the Study of Pain (IASP)</i>	
Dolor continuo, desproporcionado para el evento que lo pudo provocar	
Síntomas	Sensoriales (hiperalgesia, alodinia)
	Vasomotores (asimetría de la temperatura, cambio del color de la piel)
	Sudomotores (edema, sudoración asimétrica)
	Motor/trófico (disminución de la amplitud del movimiento o disfunción motora como debilidad, temblor o distonía). También se pueden producir cambios tróficos en pelo, uñas y piel
Signos	Sensoriales: evidencia de hiperalgesia (a la punción) y alodinia (al tacto, presión, etc.)
	Vasomotores: evidencia de asimetría de la temperatura cutánea (<1°C), asimetría del color cutáneo o cambios en el color cutáneo
	Sudomotores: evidencia de edema, cambios de sudoración y/o asimetría
	Motores: evidencia de disminución del rango de movilidad y/o disfunción motora (temblor, distonía, debilidad) y/o cambios tróficos
Diagnóstico diferencial	Descartar otras patologías que puedan explicar los síntomas y signos previos

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

Puesto que se trata de criterios clínicos, la historia clínica y la exploración son importantísimos para realizar el diagnóstico [4], [3]. Estos criterios se van a basar en la duración e intensidad de los síntomas. Muy importante a la hora de diagnosticar la enfermedad el tenerla en mente previamente. Esto facilitará su diagnóstico y tratamiento precoz, evitando secuelas irreversibles, tanto físicas como psicológicas [4]. Algunas exploraciones complementarias pueden ayudar a confirmar el diagnóstico. El laboratorio no aporta datos específicos, pero es útil para el diagnóstico diferencial [2].

Las manifestaciones clínicas no son muy específicas y pueden encontrarse en numerosas enfermedades [2]. Por ese motivo existe un cuarto punto en la Tabla 3 que dice que se han descartado otras enfermedades que puedan explicar dichos síntomas y signos, como las enfermedades reumáticas, la artritis, infecciones posquirúrgicas, celulitis, neuritis o neuralgias, trombosis o síndrome compartimental [3].

La radiografía simple puede mostrar signos de osteoporosis evolutiva asociada a fenómenos de reabsorción ósea. También se puede emplear la gammagrafía ósea, que mostraría alteraciones debidas a una hipervascularización. Otras pruebas son: resonancia magnética, la termografía, la tonodesitometría o la fluxometría cutánea [3].

1.1.6. Tratamiento

Muchos autores [5], [6], consideran que el inicio temprano e intensivo del tratamiento del SDRC reduce las posibilidades de que esta se convierta en crónica, aunque no existen evidencias que lo confirmen [5].

El objetivo principal del tratamiento del SDRC es el control de las manifestaciones clínicas, especialmente del dolor, mejorar la calidad de vida, evitar la discapacidad y la limitación de movilidad [2]. Por esta razón, el tratamiento del SDRC requiere un abordaje multidisciplinar que no solo está encaminado al alivio y control del dolor, sino que a la vez se dirija a la recuperación funcional del miembro afectado [3]. Se han propuesto numerosos tratamientos tanto farmacológicos como no farmacológicos atendiendo a los diferentes mecanismos fisiológicos del SDRC, pero no hay evidencias claras de su eficacia [2], [3]. Los tratamientos utilizados actualmente son los que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de los tratamientos empleados para el SDRC

Tratamiento rehabilitador	<ul style="list-style-type: none">• Básico para intentar evitar la atrofia y las contracturas musculares• Importante la intervención del paciente (puede ser difícil debido al dolor)• Puede disminuir el dolor y mejorar la movilidad• Intensidad de la rehabilitación en función de la severidad del síndrome• Drenaje linfático para mejorar el edema• La estimulación eléctrica transcutánea (TENS) puede mejorar el dolor en casos sin hiperalgesia o alodinia severa.• La terapia ocupacional puede mejorar la función y coordinación del miembro• Algunos estudios sugieren la importancia de la terapia de espejo en el SDRC
---------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tratamiento farmacológico	<ul style="list-style-type: none">• Antiinflamatorios no esteroideos (AINEs)• Opiáceos, tanto menores (tramadol) como mayores (morfina, oxicodona, fentanilo, hidromorfona, buprenorfina)• Adyuvantes para dolor neuropático (antiepilépticos tricíclicos y antidepresivos)• Ketamina (anestésico con efecto analgésico)• Glucocorticoides (asociados a edema e hipertemia)• Limpiadores de radicales libres (cierta eficacia en la prevención y el tratamiento en fases agudas y con afectación moderada)• Calcitonina (no está demostrado que mejore las alteraciones osteoporóticas, pero ofrecen beneficios)• Bifosfonatos (dolor, edema y movilidad)• Vasodilatadores• Anestésicos tópicos (lidocaína)
Técnicas intervencionistas	<ul style="list-style-type: none">• Bloqueos Nerviosos Simpáticos.• Simpatomía.• Neuroestimulación eléctrica medular• Perfusiones intratecales

1.2. Bloqueo simpático lumbar (BSL)

El sistema nervioso simpático está implicado en mecanismos del dolor neuropático, vascular y visceral. El bloqueo de los nervios simpáticos es una fuente básica de información que puede aportar una idea certera sobre el papel del sistema nervioso autónomo en un síndrome doloroso concreto.

La indicación del BSL se basa en la observación del hecho de que en determinadas circunstancias el dolor es modulado por el sistema nervioso simpático. Se sabe que la neurona posganglionar simpática actúa no solo con función efectora, sino que también recoge estímulos eferentes vehiculados a través de los nervios espláncnicos y ramos comunicantes grises. El BSL pretende lograr la interrupción de las aferencias simpáticas que originan la disminución de la resistencia periférica con aumento de la temperatura local y el *stop* de las aferencias viscerales de los miembros inferiores que viajan con los nervios simpáticos [7]. Está demostrada su utilidad en el tratamiento del dolor en el SDRC de tipo I y tipo II [7], [8]. El objetivo de este tipo de bloqueos en este síndrome es actuar sobre el flujo simpático eferente [7].

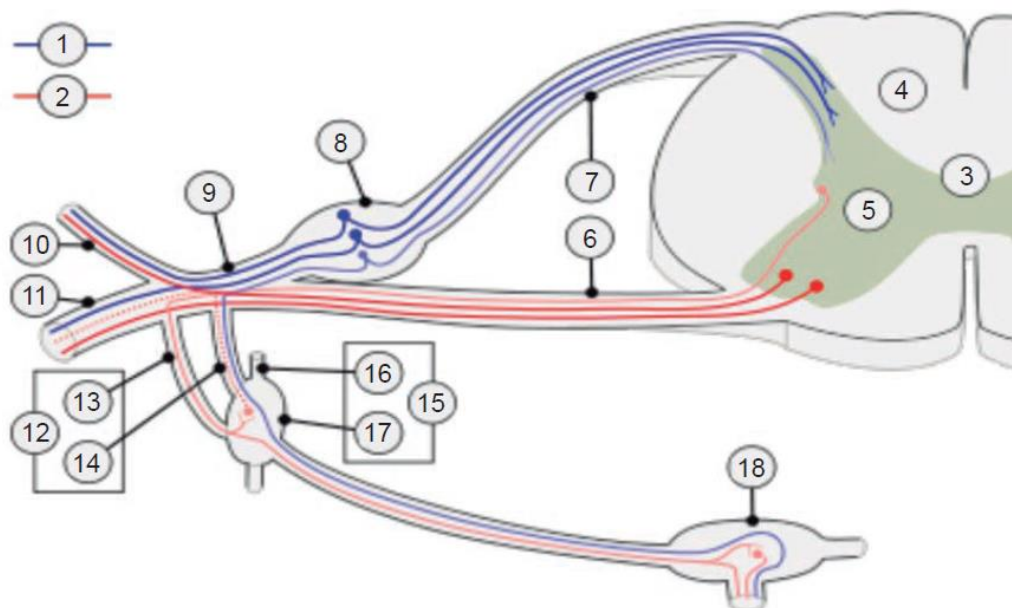


Figura 2. Esquema de un nervio espinal y un ganglio simpático, componente del tronco simpático. Fibras: sensitivas (1) y motoras (2). Médula espinal (3): sustancia blanca (4) y sustancia gris (5). Astas de la médula: anterior (6) y posterior (7). Ganglio espinal (8). Nervio espinal (9). Ramos: dorsal (10) y ventral (11). Ramos comunicantes (12): blanco (13) y gris (14). Tronco simpático (15): ramo interganglionar (16) y ganglio paravertebral (17). Ganglio prevertebral (18) [7].

1.2.1. Técnica

La técnica del BSL se puede dividir en dos fases. Primero, se accede vía percutánea al objetivo, comprobando y asegurando la correcta localización. Después, se realiza el bloqueo mediante anestésicos locales [7]. Para lograr una correcta localización y asegurar el bloqueo percutáneo de la cadena simpática lumbar se emplean técnicas de imagen. Se han descrito BSL con éxito realizados con la ayuda de TAC y resonancia magnética, pero no son prácticas habituales por necesitar de una gran infraestructura. Lo más recomendable es acompañar el bloqueo con técnicas de fluoroscopia convencional [7].

La técnica de punción lumbar de Reid es la más utilizada y es de gran utilidad a la hora de dejar catéteres para perfusión continua de anestésicos locales en la cadena simpática lumbar [7]. La técnica se realiza en el quirófano o en la sala de rayos x intervencionista con los medios necesarios de monitorización y de soporte vital avanzado [7]. En todos los casos se procede a canalizar el acceso venoso y a monitorizar al paciente según los estándares de la SEDAR. El nivel de sedación/anestesia indicado debe ser el adecuado para permitir el procedimiento, utilizando el menor número de fármacos posible, pero considerando que una sedación o analgesia inapropiada puede resultar en profundo discomfort para el paciente por falta de cooperación o respuesta excesiva al estrés.

El BSL es un procedimiento doloroso y no siempre bien tolerado. El paciente se coloca en decúbito lateral y mediante fluoroscopia se marcan las apófisis espinosas de L2, L3, L4. Se traza una línea paralela a 4.5 cm y los puntos de intersección son los puntos de entrada de las agujas que se introducen con un ángulo de 70 u 80 grados hacia la línea media, hasta contactar con las apófisis transversas a 3 o 4 cm de la piel. Se retira la aguja y se dirige medial e

inferiormente para que deslice por la apófisis transversa y supere el cuerpo vertebral alcanzando el retroperitoneo. Se repetirá el procedimiento en cada nivel. Por tanto, se necesitarán tres agujas. Se comprobará la posición la posición final de las agujas mediante la administración de contraste iodado control radiológico [7].

1.2.2. Signos de eficacia del bloqueo

Aunque existan signos objetivos, otros signos como la presencia de alodinia, disestesias, la hiperalgesia o anestesia dolorosa pueden requerir una exploración exhaustiva en las que herramientas de valoración del dolor neuropático tienen un importante papel. El efecto placebo y las grandes dosis de anestésico local pueden dificultar la interpretación del bloqueo. Ente los signos objetivos de bloqueo simpático se destaca [7]:

- Dilatación venosa
- Dilatación arterial con disminución del tiempo de llenado capilar debido a la caída de las resistencias regionales sin la modificación de la presión de perfusión.
- Disminución del retorno venoso con descenso del gasto cardíaco y presión arterial si el bloqueo es extenso y bilateral.
- Aumento de la temperatura cutánea y sensación de calor en la extremidad.
- Desaparición del dolor en reposo.

1.3. Imágenes termográficas

La termografía infrarroja es un método no destructivo y sencillo, que permite determinar la distribución superficial de temperatura del área a analizar [9],[10]. La termografía es una técnica en la que destaca su capacidad para repetirse tantas veces como se desee, con garantías en cuanto a la repetitividad de los resultados.

La ley de Stefan-Boltzmann, enunciada por los austriacos Josef Stefan y Ludwig Boltzmann, afirma que la intensidad irradiada E (energía por unidad de superficie y de tiempo, también conocida como emitancia) por el cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (Ecuación 1). Así, un pequeño aumento de la temperatura se traduce en un gran aumento de la luminosidad. Es decir, un cuerpo que emita una temperatura de 576K (273 °C) emitirá dieciséis veces más energía que cuando se encuentra a la mitad de temperatura, esto es, a 273K (0 °C) [11]. Por eso, todos los materiales con temperaturas mayores al cero absoluto emiten energía en forma de radiación, modelizada por la ley de Plank [9]. Cuando se trata de un cuerpo real (cuerpo gris) esta ley se expresa como muestra la Ecuación 2. En la Ecuación 2, ϵ , es la emisividad. La emisividad tiene un valor comprendido entre 0 y 1 y es la propiedad que indica la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Para el cuerpo negro tiene un valor de 1; cuanto menor sea el valor de la emisividad, como la que representan los metales pulidos, mayor será el porcentaje de radiación reflejada, es decir, más difícil será conocer la temperatura del cuerpo [11].

$$E = \sigma T^4$$

Ecuación 1

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Ecuación 2

La radiación infrarroja está comprendida en la banda entre 0.75 μm a 1000 μm [9]. Las cámaras infrarrojas usualmente trabajan en dos bandas: de 2 a 5.6 μm y de 8 a 14 μm , las cuales se eligen porque la absorción atmosférica en estas longitudes de onda es menor. Las cámaras infrarrojas están compuestas por una matriz de sensores llamada FPA (*Focal Plane Array*) [9]. Estos sensores son transductores que absorben la energía infrarroja y producen una señal eléctrica S . Esta señal es proporcional a la radiación que llega al sensor. Es importante la configuración del parámetro de emisividad de la muestra para que el *software* de la cámara pueda calcular la temperatura para cada sensor de la matriz, la transforma en una imagen visible, en donde cada nivel de temperatura se representa mediante un color o nivel de gris configurables [9]. Hay que tener presente que es el *software* de la cámara el que calcula la temperatura puesto que la cámara lo que mide es la radiación emitida por los cuerpos. Las cámaras infrarrojas son lo que hacen de esta técnica una técnica no invasiva pues detectan la radiación infrarroja emitida sin entrar en contacto con el objeto [10]. Las imágenes obtenidas pueden considerarse como mapas térmicos del área que se estudia, que en el caso de la medicina revela las condiciones fisiopatológicas asociadas a distintos trastornos [10]. Los principales parámetros que caracterizan la cámara son:

- Resolución (número de píxeles)
- Velocidad de adquisición de los datos.
- Distancia focal mínima.
- Precisión.
- Sensibilidad. Se expresa en NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) que representa la diferencia de temperatura entre dos puntos de la imagen que resulta en una señal igual al ruido aleatorio de *background* y se mide en $^{\circ}\text{C}$.
- FOV (*Field of Vision*). Se trata de la región en el espacio que contiene una cantidad específica de energía radiada, que es recogida por el sistema óptico de un termómetro infrarrojo, y se expresa normalmente en grados.

1.4. Aplicación de la termografía en medicina

El cuerpo humano es homeotérmico, es decir, garantiza la supervivencia mediante la autogeneración y autorregulación de los niveles esenciales de temperatura. El cuerpo humano además se considera prácticamente un cuerpo negro, en términos de termografía, por tener un factor de emisividad de 0.98. Lo cual permite saber con muy poco error la temperatura de la superficie de la piel y poder obtener patrones de anomalías clínicas en la distribución de temperatura [12], [13].

La asociación entre la temperatura del cuerpo humano y la enfermedad es muy antigua. Durante generaciones los médicos han tenido que confiar en el termómetro clínico, trabajando en un rango muy estrecho cercano a 37, principalmente para detectar fiebre [14].

La aplicación en medicina se fundamenta en la fisiología térmica humana y en las bases fisiopatológicas de termorregulación cutánea [10]. La termografía se usa para enfermedades en las cuales la distribución de temperatura en la superficie de la piel puede reflejar la presencia de inflamación en tejidos subyacentes, o un aumento o disminución del flujo sanguíneo debido a anomalías clínicas. El aumento del flujo sanguíneo arterial se correlaciona con un aumento de temperatura, mientras que el aumento del flujo sanguíneo venoso se correlaciona con una disminución.

La principal ventaja de la termografía, además de tratarse de una herramienta fácil de manejar en el diagnóstico y el monitoreo es que, al ofrecer una medición de temperatura bidimensional en tiempo real, se puede seguir el progreso de una enfermedad o los efectos de medidas terapéuticas. Esto permite demostrar, sobre todo al inicio, los cambios sufridos [14]. A veces los tratamientos y los efectos del tratamiento se prolongan tanto en el tiempo que se emplea la termografía para asegurarse de que surte el efecto deseado y es eficaz [12], [14]. Todo esto lo hace apto como prueba diagnóstica o medida de resultado para ensayos clínicos. Las imágenes termográficas difieren de los estudios radiográficos de imagen habituales en que, mientras estos ponen de manifiesto anomalías estructurales, la termografía permite obtener la expresión física de las alteraciones funcionales que justifican los síntomas de los pacientes [10].

Es necesario establecer unas condiciones estándar para realizar la adquisición de imágenes infrarrojas, pero debido a la falta de tiempo, la falta de colaboración por parte del paciente y al desconocimiento, no se llevan a cabo. La termografía se aplica a numerosos casos y al final hay que tener diferentes aspectos en cuenta para cada uno de ellos [12].

1.4.1. Síndrome del dolor regional complejo

La termografía es muy importante en el monitoreo y el seguimiento del tratamiento del dolor. Para poder hacer un seguimiento del dolor es importante conocer su intensidad, pero en la actualidad no se cuenta con ninguna herramienta que permita valorar esa intensidad. Para evaluar la intensidad del dolor solo se puede confiar en la percepción del paciente, lo cual dificulta saber si el tratamiento es útil o no lo es [12], [13].

En concreto, la termografía infrarroja se utiliza para monitorear una forma particular del dolor: el dolor neuropático y mantenido sistemáticamente. Este tipo de dolor necesita de la realización de bloqueos del sistema nervioso simpático para disminuir su intensidad [12], [13].

Los bloqueos simpáticos suponen un alivio significativo, pero no hay manera de saber si se debe al bloqueo o si se debe a un efecto psicológico. Las fibras simpáticas afectan al flujo sanguíneo al variar el tamaño de los vasos. Se espera un aumento de la temperatura de la piel de los bloqueos simpáticos porque la variación de la perfusión cutánea se correlaciona con la variación de temperatura superficial [12], [13].

Los cambios de temperatura de la piel aportan una gran información sobre el éxito de la intervención. A parte de la percepción del paciente, la termografía infrarroja se puede utilizar como herramienta diagnóstica con extraordinaria sensibilidad y repetibilidad [12], [13].

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

En el SDRC la variación de temperatura en la superficie de la piel del miembro afectado se considera un criterio diagnóstico. Existe una buena correlación entre la temperatura de la piel y la actividad del nervio simpático en este síndrome. Por tanto, la temperatura de la piel es un buen predictor de la actividad simpática. Esta afección también suele tratarse con bloqueos simpáticos, teniendo un fuerte impacto en la perfusión cutánea. Por lo general el dolor se reduce a las pocas horas después de inyectar el anestésico, pero el tratamiento consume tiempo y, como se ha mencionado anteriormente, el paciente puede perder la paciencia. Por esa razón, la termografía es útil para aumentar el cumplimiento de la terapia. En la Figura 3 se muestra la diferencia de temperatura en el miembro afectado (brazo izquierdo) tras el bloqueo simpático. En este caso se confirmaría la hipótesis acerca de la correlación existente entre la actividad simpática afectada por el síndrome y la distribución asimétrica de la temperatura [12], [15].

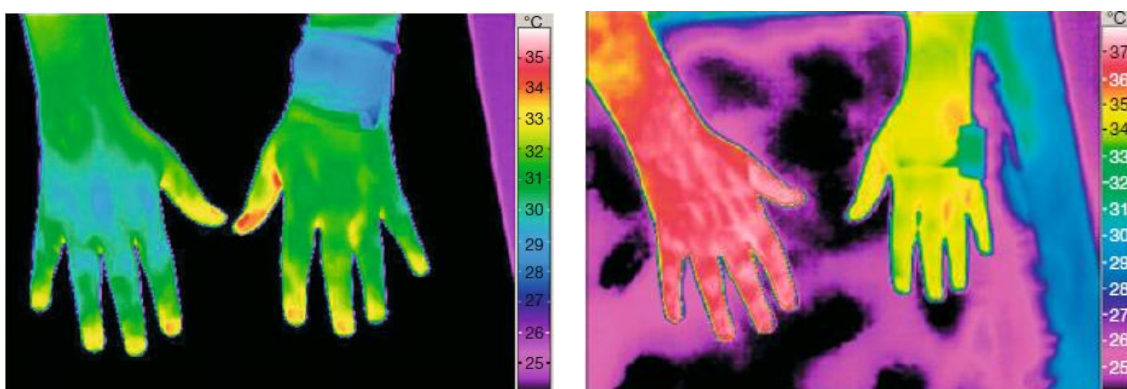


Figura 3. (Izq.) Imagen IR de las manos de un paciente con SDRC antes del bloqueo simpático. (dcha.) Imagen IR de las manos de un paciente con SDRC después el bloqueo [12].

1.4.2. Otras aplicaciones

A parte de la aplicación en el SDRC, que es la que más interesa para la realización del presente trabajo, existen una serie de aplicaciones de la termografía en medicina muy interesantes. Las aplicaciones no se limitan a un campo concreto de la medicina. Unos ejemplos son: la utilización de la termografía para monitorear el flujo coronario durante una operación de revascularización de miocardio, la evaluación de pacientes para realizar un triaje o la detección del SARS durante el 2003 en el transporte público, aeropuertos y trenes con el objetivo de prevenir la expansión del virus mediante la medición de temperatura de los individuos y localizar los casos de fiebre que provienen de lugares [14], [15]. Actualmente, la termografía se emplea en aeropuertos y lugares donde hay un flujo de personas continuo y de procedencias distintas para controlar la pandemia producida por el SARS-CoV-2.

Osteomielitis

La osteomielitis es una infección dolorosa de los huesos y la médula. Esta enfermedad afecta a los dedos de los pies y se asocia con diabetes mellitus. Es una enfermedad cuyo dolor también es neuropático. El tratamiento es largo y complicado, consiste en la administración de antibióticos durante mucho tiempo y en ocasiones es necesaria la intervención quirúrgica. Para

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

medir la eficacia de los antibióticos se emplea la termografía. Los antibióticos están correlacionados con la disminución del flujo sanguíneo en el área afectada.

En un cuerpo humano sano la distribución de temperatura es simétrica, al igual que el flujo sanguíneo regulado por la actividad simpática. En los tratamientos de dolor sistemático mantenido la termografía infrarroja permite probar la eficacia de los bloqueos de las cadenas simpáticas con el fin de determinar si la neuroablación está indicada y es eficaz [12], [15].

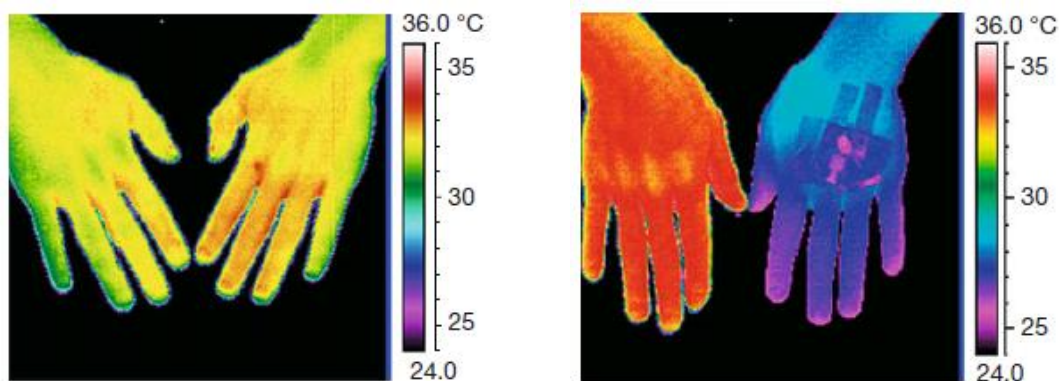


Figura 4. (Izq.) Imagen IR de las manos de un paciente con osteomielitis antes del tratamiento (Dcha.) Imagen IR de las manos de un paciente con osteomielitis después del tratamiento [12].

Cáncer de mama

La termografía infrarroja también se emplea en la detección precoz del cáncer de mama. Debido a que no es invasivo, ni radiactivo y que es pasivo, la termografía infrarroja es más aceptada. En las zonas cancerosas la actividad celular es mayor, lo que supone un aumento del flujo sanguíneo y, por tanto, de la temperatura. La termografía mide la temperatura de la superficie de la mama, es decir, el calor generado por las microcirculaciones sanguíneas durante el proceso de adquisición. Una actividad química aumentada junto con el aumento de flujo sanguíneo provoca que en las zonas precancerosas o cercanas al cáncer la temperatura sea mayor que en el resto de áreas. El aumento del flujo sanguíneo se produce debido al aumento del metabolismo de las células cancerosas. El crecimiento es mayor y la demanda de nutrientes aumenta, siendo necesario el aumento del flujo para cubrir dicha demanda [12], [13].

Al tratarse de un proceso pasivo, disminuye la acumulación de radiación en las mujeres y hombre jóvenes, mejorando la precisión. Es deseable dar nuevos enfoques que incluyan los análisis de regresión, el diagnóstico altamente preciso utilizando IR y sistemas de cámaras digitales de alta resolución [12], [13].

Se realizan análisis simétricos de patrones térmicos en el pecho con el fin de detectar zonas anormales (zonas con mayor temperatura). Las zonas anormales no tienen por qué ser zonas cancerosas necesariamente, pero una distribución no homogénea de la temperatura puede suponer una alteración patológica, ya sea por inflamación, infección o trauma. Por esa razón, la termografía sirve para realizar detecciones precoces al localizar zonas que podrían presentar riesgo de ser cáncer. En la Figura 5 se muestran dos imágenes IR del pecho en los que se

pueden observar anomalías en las distribuciones de temperatura y que podrían ser zonas patológicas [12], [13].

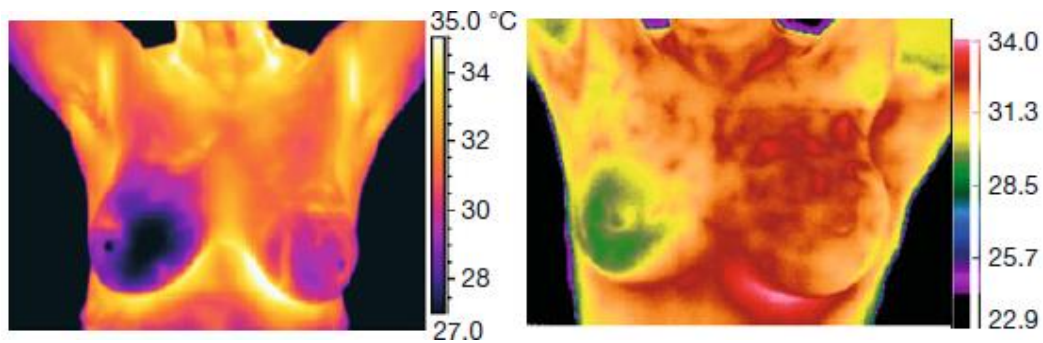


Figura 5. Imágenes IR del pecho en los que se observan anomalías en las distribuciones térmicas que pueden asociarse con lesión o patología [12]

Acupuntura

La acupuntura es una técnica china que se emplea para diferentes tipos de enfermedades. La falta de evidencias científicas hace que la medicina convencional a menudo no acepta ni cree en la mitigación de síntomas con acupuntura. En cualquier caso, sí hay evidencias de que la inserción de la aguja en el punto de HeGu (punto 4 del meridiano del intestino grueso) provoca un aumento de temperatura, y que la inserción de la aguja en piel y músculo produce un descenso (Figura 6) [12], [13].

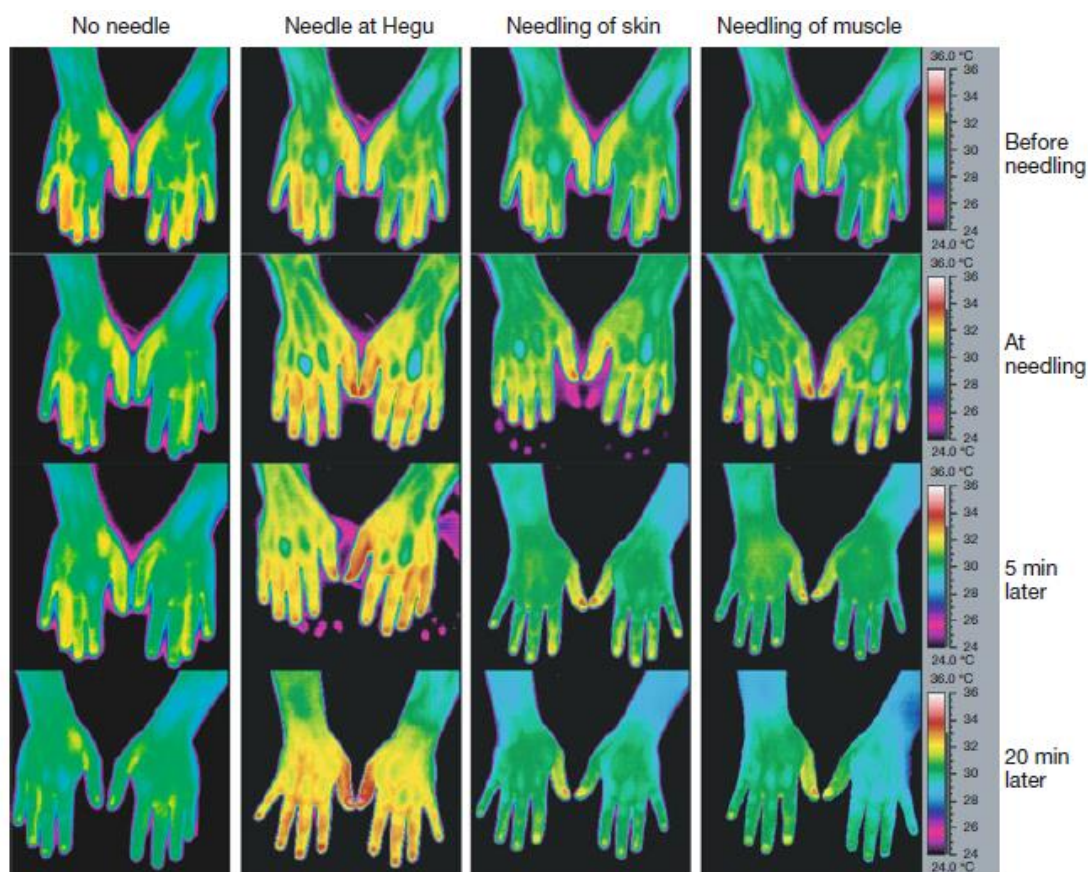


Figura 6. Imágenes IR durante la técnica de acupuntura (antes, durante, 5 minutos después y 20 minutos después) en diferentes puntos de las manos (HeGu, piel y músculo)

Fenómeno de Raynaud

El fenómeno de Raynaud consiste que ante temperaturas frías o emociones fuertes se producen espasmos vasculares que bloquean el flujo sanguíneo a los dedos de las manos y los pies, las orejas y la nariz. Es una enfermedad propia de climas fríos y se relaciona con una respuesta α -adrenérgica exagerada. También se asocia con afecciones reumáticas que es lo que permite su reconocimiento. Las imágenes IR sirven para diagnosticar casos que clínicamente no lo han sido, sobre todo si la piel se muestra normal tras la inspección, aunque se reporte dolor [14].

Úlceras por presión

Cuando los tejidos se comprimen durante mucho tiempo, se producen defectos en la piel que pueden evolucionar hasta producirse necrosis. La termografía en este caso sirve para observar la distribución de temperatura con el objetivo de evaluar riesgos y prevenir úlceras. En pacientes con diabetes de alto riesgo se podría realizar un reconocimiento temprano y tratamiento de los signos previos. Esto permite una mayor prevención de úlceras [14].

Osteoartritis

En la osteoartritis se han observado aumentos de temperatura en los casos en los que se producen cambios degenerativos y disminuciones de temperatura en el caso de enfermedad grave. Algunos estudios han destacado el aumento de la temperatura en la rodilla y tobillo con osteoartritis en comparación con pacientes sanos. La termografía aquí también se emplea para monitorear a los pacientes tras endoprótesis de rodilla [14].

Reumatismos de tejidos blandos

Algunos ejemplos son:

- Espasmos y lesión muscular. La termografía sirve para detectar situaciones patológicas en las que se pueden producir espasmos. Estas zonas se correlacionan con un aumento de la temperatura. También se puede emplear para detectar lesiones musculares agudas por aumento de la temperatura debido a la inflamación en estados tempranos del trauma. Se ha observado como en las cicatrices y lesiones de larga duración se producen situaciones de hipotermia. Además, en las articulaciones con movilidad reducida la temperatura disminuye al disminuir la contracción muscular [14]
- Codo de tenista [14]
- Fibromialgia [14]

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta software que permita realizar el seguimiento del tratamiento del Síndrome de Dolor Regional Complejo (SDRC) mediante el análisis de secuencias de vídeo de imágenes de termografía infrarroja, introduciendo así una dimensión cuantitativa en este tratamiento y reduciendo al máximo la subjetividad y variabilidad de este. Para ello, se propondrá una metodología de adquisición de imágenes de termografía durante el tratamiento del SDRC, así como se desarrollará una herramienta que permita el análisis y cuantificación de estas imágenes, convirtiendo así el tratamiento en independiente de la percepción del paciente (dolor y calor), contando así con una metodología que permitirá un análisis reproducible en el tiempo. Para ello se proponen dos objetivos secundarios:

- Monitorización del tratamiento del SDRC mediante la adquisición de secuencias de termografía infrarroja.
- Desarrollo de una herramienta de extracción de regiones para poder introducir una dimensión cuantitativa al análisis de secuencias de termografía IR.

Para cumplir con los objetivos propuestos se va a proponer una metodología de adquisición de las secuencias de termografía y una metodología de extracción de regiones para desarrollar la herramienta *software* de análisis infrarrojo.

3. ESTADO DEL ARTE. MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS

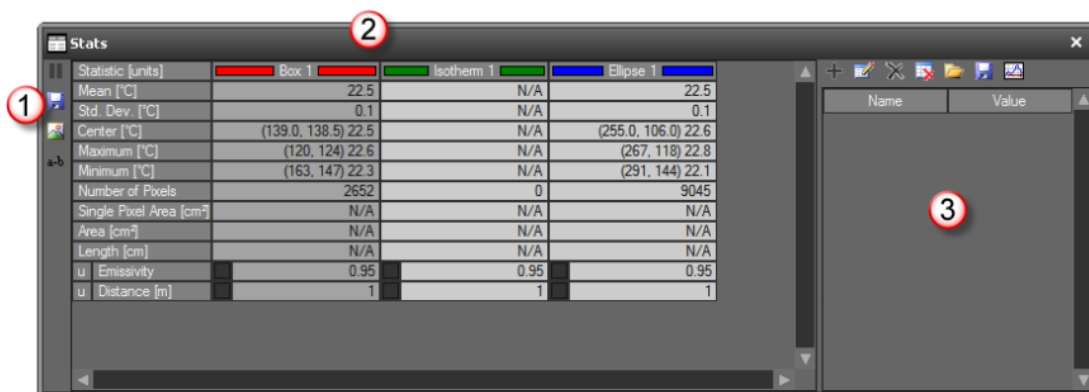
El siguiente capítulo tiene como objetivo analizar los proyectos de investigación y los *softwares* que existen hasta la fecha para el análisis y la cuantificación de imágenes IR aplicadas al SDRC.

3.1. Research IR

Research IR es una herramienta de adquisición y análisis de imágenes de termografía infrarroja para entornos de I+D [16]. Cuenta con un menú de herramientas de análisis que consiste en dibujar regiones de interés (ROIs) con una gran variedad de herramientas de dibujo. Dispone de opciones para dibujar ROIs circulares, poligonales o de forma irregular, con la limitación de que no pueden desplazarse o modificarse. Es necesario para analizar una zona dibujarla cada vez que se quiera analizar. Este *software* permite el análisis de temperatura de las imágenes IR mediante la interacción del usuario con las ROIs y las imágenes, es decir, de forma manual [16].

El *software* cuenta con un visor de estadística que muestra la variedad de estadísticas disponibles para cada ROI dibujada [16]. Se divide en tres áreas:

- Barra de herramientas de la table de estadística. Estas funciones paran las actualizaciones de las ROIs en las imágenes que se siguen actualizando a medida que se van adquiriendo, guardan los datos estadísticos de cada una de las ROIs, elimina o añade una columna con una ROI nueva y resta dos ROIs.
- Barra de herramientas de estadística. Cada fila muestra los parámetros estadísticos que se analizan en las ROIs que como se muestra en la Figura 7 son la media de temperatura de la ROI, la desviación estándar, la temperatura del centro de la ROI, temperatura máxima, temperatura mínima, entre otros.
- Funciones de medición. Esta herramienta permite definir expresiones matemáticas basadas en los valores de los parámetros estadísticos.



1. Stats table toolbar
2. Stats table
3. Measurement functions

Figura 7. Panel de mediciones estadísticas del software Research IR [16]

Además, la herramienta permite graficar las distribuciones de los valores estadísticos a lo largo de una ROI como se puede ver en la Figura 8, los valores de esos mismos parámetros a lo largo del tiempo (Figura 9) y la distribución de los valores dentro de una ROI (Figura 10)

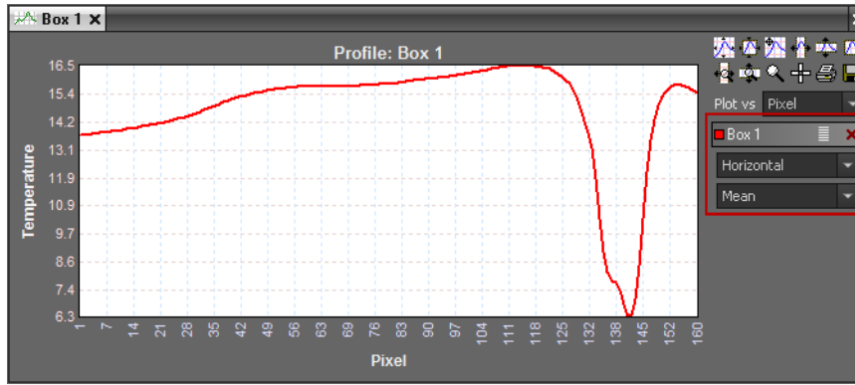


Figura 8. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Profile Plot de Research IR [16]

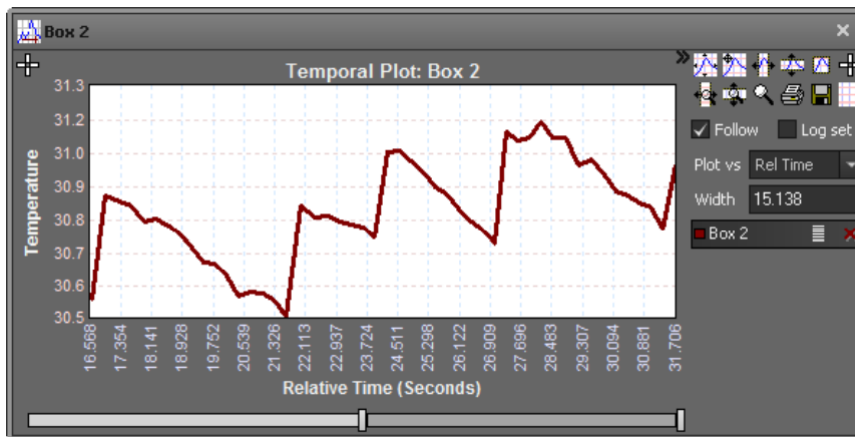


Figura 9. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Temporal Plots de Research IR [16]

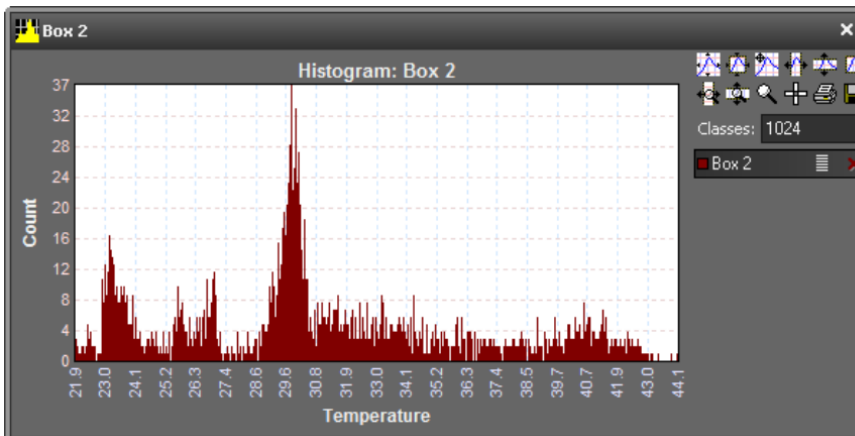


Figura 10. Ejemplo de gráfica creada con la herramienta Histogram del software Research IR [16]

Por último, esta aplicación permite la adquisición de estas imágenes termográficas y se pueden configurar las adquisiciones (valor de emisividad, distancia, valores de humedad, etc.). También se pueden realizar segmentaciones basadas en umbrales, filtrando aquellos píxeles que se correspondan con valores de radiación determinados, eliminándolos del análisis estadístico [16].

3.2. Estudio multicéntrico de la asimetría térmica de la piel en el SDRC

De acuerdo con la IASP y la Asociación Médica Americana (AMA) dentro de los criterios diagnósticos del SDRC se encuentra la presencia de una asimetría térmica. Se ha asumido que la temperatura de la piel del miembro afectado disminuye respecto de la del miembro contralateral. Según el artículo de Chan Woo Cho et al. [17]. Se realizó un estudio retrospectivo y multicéntrico con el objetivo de examinar la distribución de temperatura de la piel en pacientes con SDRC y la asimetría térmica frente a la duración de los síntomas. Se seleccionaron sujetos con SDRC de tipo 1 y de tipo 2. Después de confirmar que padecían el síndrome atendiendo a los criterios de la IASP, las imágenes IR adquiridas se evaluaron para observar las diferencias de temperatura existentes entre ambos miembros (Figura 11) [17].

Mediante el uso de la termografía infrarroja se tomaron medias de la temperatura de la piel. Las imágenes se capturaron siguiendo unos protocolos estándar. Previamente, los pacientes se aclimataron en una sala de aislamiento a una temperatura y humedad adecuada durante unos 20 minutos. Se utilizó la cámara infrarroja IRIS-5000 que detectaba las temperaturas dentro de un rango de 17 a 40°C. Después, el módulo de visualización mostraba las diferencias térmicas con 256 niveles de color, con una resolución de 0,1°C. Las diferencias de temperatura de la piel en reposo en las zonas más dolorosas de la extremidad afectada y el lado contralateral se obtuvieron restando la temperatura de la piel del pie no afectado a la temperatura de la piel del pie con el síndrome. Se cogió un valor absoluto de diferencia de temperatura de un estudio previo que sirvió de valor representativo de la anormalidad de la piel [17].

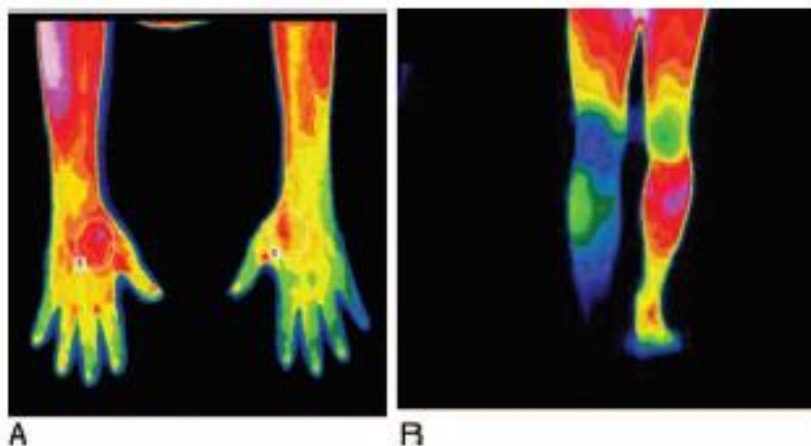


Figura 11. Ejemplo de las imágenes de termografía infrarroja empleadas en el estudio de Chan Woo Cho et al. [17]

Los datos fueron analizados con SPSS y se trazó la distribución de las diferencias de temperatura en un histograma en el que la proporción de pacientes que cumplían los criterios de temperatura de la IASP (<1°C) y la AMA (extremidad fría). La prueba de Kolmogorov-Smirnov sirvió para comprobar la distribución normal de los datos, y se analizó la correlación de Spearman entre las diferencias de temperatura y la duración de los síntomas. Para investigar la diferencia media de las diferencias de temperatura de los cuatro grupos de duración de los síntomas (0-3 meses, 4-6 meses, 7-12 meses y >12 meses), se realizó un análisis de varianza. En él, los valores de p menores de 0.05 se consideraron estadísticamente significativos [17].

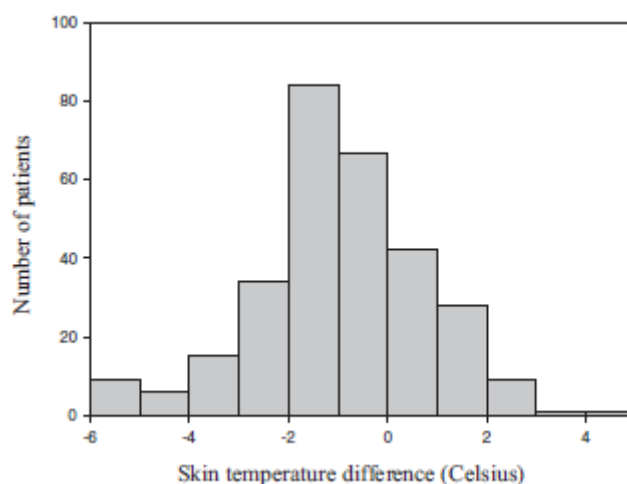


Figura 12. Distribución de la diferencia de temperatura entre ambos miembros [17]

Tras el estudio se concluyó que la media de duración de los síntomas era de 6 meses y la media de diferencia de temperatura entre miembros afectados y no afectados era de $-0.72^{\circ}\text{C} \pm 1.65^{\circ}\text{C}$, tal y como se muestra en la Figura 12. Se investigó la distribución de pacientes en los cuales disminuía la temperatura con respecto al tiempo que llevaban manifestando síntomas y se comprobó cómo no existía una correlación entre ambos parámetros debido a que muchos pacientes no se encontraban dentro de los criterios de la IASP y la AMA. La media de diferencia de temperatura en los grupos con diferentes duraciones de los síntomas no difería significativamente. Esos hallazgos sugerían que la piel no varía de temperatura con respecto al tiempo [17].

En este estudio la termografía se empleó para detectar la temperatura de la piel en pacientes con SDRC y permitió visualizar los cambios de temperatura en ambos miembros (miembro afectado y miembro no afectado). En la detección del SDRC se sabe que la termografía infrarroja tiene una alta sensibilidad y especificidad con respecto a otras técnicas. Además, hay una alta fiabilidad entre examinadores a la hora de usar la termografía infrarroja para detectar anomalías en la piel en pacientes con SDRC cuando se determina una ROI en función de la historia del paciente y sus síntomas [17].

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este capítulo se comentarán brevemente los materiales empleados para poder realizar el presente proyecto de fin de máster, tanto los físicos como los no físicos (*software*), además del proceso que se ha llevado a cabo para realizar la cuantificación de imágenes termográficas.

4.1. Materiales

Con respecto a los materiales, los dividiremos en dos tipos:

- Materiales físicos: Cámara FLIR E60
- Materiales no físicos: *softwares* de procesamiento de imágenes termográficas (FLIR Tools y ThermoCAM Researcher PRO) y Matlab 2019b.

4.1.1. Materiales físicos

Cámara FLIR E60

Dentro de los materiales físicos que se necesitan para la realización del proyecto se encuentra la cámara termográfica FLIR E60. Con esta cámara se obtienen imágenes termográficas con una resolución de 320x240 píxeles. Además, la imagen infrarroja es escalable en la imagen anatómica que también se puede adquirir. El rango de temperaturas empleado de esta cámara infrarroja es de -20°C a 120°C con una exactitud de $\pm 2^\circ\text{C}$ o de $\pm 2\%$ de lectura, para temperaturas ambientes que oscilen entre 10°C y 35°C. Una de las características más importantes de las cámaras termográficas es la sensibilidad, o también conocido como NETD. Para esta cámara el valor de NETD es muy pequeño, 0.05 °C, lo que supone una gran sensibilidad de adquisición. Por último, este tipo de cámaras permite hacer un análisis de medidas por área seleccionada. Los parámetros extraídos del área son: temperatura máxima, mínima y media de temperaturas [18].



Figura 13. Cámara IR FLIR E60 [18]

4.1.2. Materiales no físicos

FLIR Tools v.6.4

FLIR Tools es un software diseñado para el análisis de imágenes termográficas, así como para para actualizar la cámara FLIR y crear informes de inspección de las imágenes termográficas. Asimismo, se puede emplear para la adquisición de secuencias radiométricas conectando la cámara habilitada para ello a un ordenador con este programa instalado [19].



Figura 14. Logo FLIR Tools

ThermaCAM researcher Pro v.2.1

ThermaCAM Researcher es un software de análisis, medición y almacenamiento digital en tiempo real. También permite almacenar y recuperar digitalmente imágenes IR estáticas, secuencias radiométricas de video digital IR en vivo, datos directamente desde la cámara IR de FLIR, además de análisis profundo y preciso de eventos térmicos [20].



Figura 15. Logo ThermaCAM researcher PRO [20]

Matlab

Matlab es un *software* que combina un entorno de escritorio para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación basado en las matemáticas de matrices y arrays [21].



Figura 16. Logo de Matlab [21]

4.2. Metodología

A continuación, a lo largo de este apartado se explican los pasos que se han seguido para realizar la cuantificación de las imágenes termográficas. Atendiendo a la Figura 17, en primer lugar, se adquirieron las imágenes con la ayuda de la cámara FLIR E60 que se explicó en el apartado anterior. Posteriormente se trataron las imágenes para más adelante iniciar la segmentación de las plantas de los pies (zonas de interés clínico) y, finalmente, analizar los datos de temperatura extraídos.

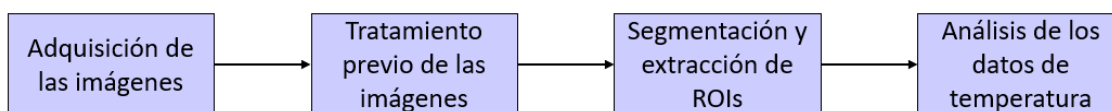


Figura 17. Pipeline de la metodología

4.2.1. Metodología de adquisición de las imágenes termográficas

Las imágenes empleadas en este trabajo han sido adquiridas de dos maneras diferentes. Por un lado, se tiene una modalidad de adquisición 1, que consiste en la adquisición de imágenes de termografía cada 60 segundos. Por otro lado, se tiene una modalidad de adquisición 2, que consiste en la adquisición de una secuencia radiométrica (formada por imágenes capturadas cada 10 segundos). Las imágenes adquiridas, en ambas modalidades, han sido adquiridas con fondo, por lo que se muestran más elementos además de las zonas de interés y, también aparecen ambos pies. Para la segmentación de imágenes termográficas se suele recomendar la extracción de una imagen anatómica que sirva para extraer referencias estructurales. Puesto que durante la adquisición de las secuencias radiométricas no se puede extraer imagen anatómica debido a las condiciones de la cámara termográfica usada, se ha decidido diseñar la metodología prescindiendo de ella.

Como se ha explicado previamente, la adquisición de las imágenes se hace durante el BSL con lidocaína con el fin de comprobar la efectividad del bloqueo para, posteriormente, inyectar el fármaco. Antes de administrar el medicamento (levobupivacaína 0,2% 10 ml con triamcinolona 80 mg), se realiza el BSL con 2 ml de lidocaína al 2%, tras lo cual se capturaron imágenes seriadas del cambio de temperatura en la planta de ambos pies. La inyección de lidocaína en el punto correcto produce un aumento de la temperatura en la planta del pie afectado por el SDRC. Para la correcta realización del BSL y la inyección del fármaco se emplea la fluoroscopia. Debido a que uno de los efectos del BSL es la variación de esa distribución superficial de temperatura, se hace un registro de imágenes termográficas durante dicho procedimiento, con el objetivo de poder visualizar la distribución superficial de temperatura en la planta del pie. En esta modalidad se comienzan a capturar imágenes IR de los pies cada 60 segundos. La cámara está configurada para que la captura de la imagen IR sea manual.

Como resultado se puede ver en la Figura 18 y en la Figura 19, cómo son las imágenes termográficas adquiridas con la cámara FLIR y la imagen anatómica extraída mediante el *software* FLIR Tools. Como se ha mencionado anteriormente, en ambas imágenes se ve como no se ha eliminado el fondo durante la adquisición y como se han adquirido ambos pies a la vez.

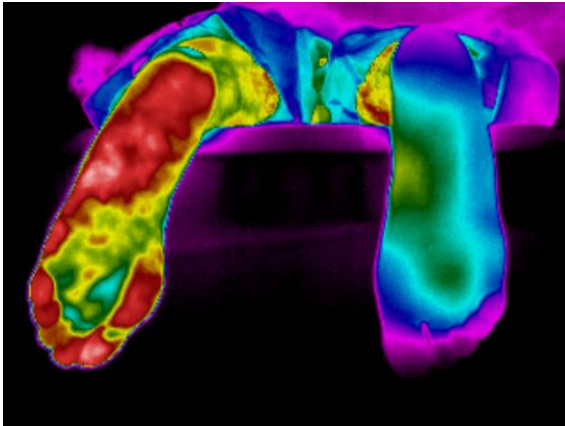


Figura 18. Imagen IR adquirida y visualizada en FLIR Tools



Figura 19. Imagen anatómica extraída mediante FLIR Tools de la imagen IR de la izquierda

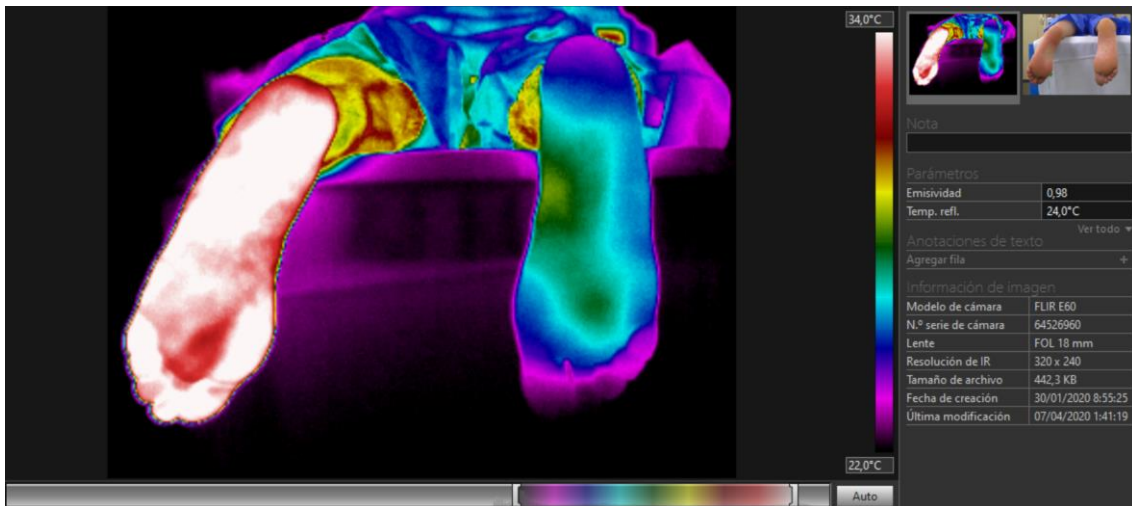


Figura 20. Pantalla del software FLIR Tools en la que se muestra la imagen termográfica adquirida con la imagen anatómica asociada. Además, se muestran la escala de temperatura, los datos de cámara y los parámetros relativos a las condiciones ambientales en el momento de la captura

Al igual que en la modalidad de adquisición 1, se realiza el bloqueo simpático lumbar con lidocaína mientras se registra una secuencia radiométrica con la cámara FLIR E60 que toma imágenes IR de forma automática cada 10 segundos. En esta modalidad, de la misma manera que en la anterior, las imágenes termográficas son adquiridas con fondo. Además, en la captura del vídeo también se han registrado los dos pies a la vez. En la imagen posterior se muestra uno de los *frames* correspondiente a una secuencia radiométrica. Como se puede ver no hay una imagen anatómica asociada que pueda extraerse.

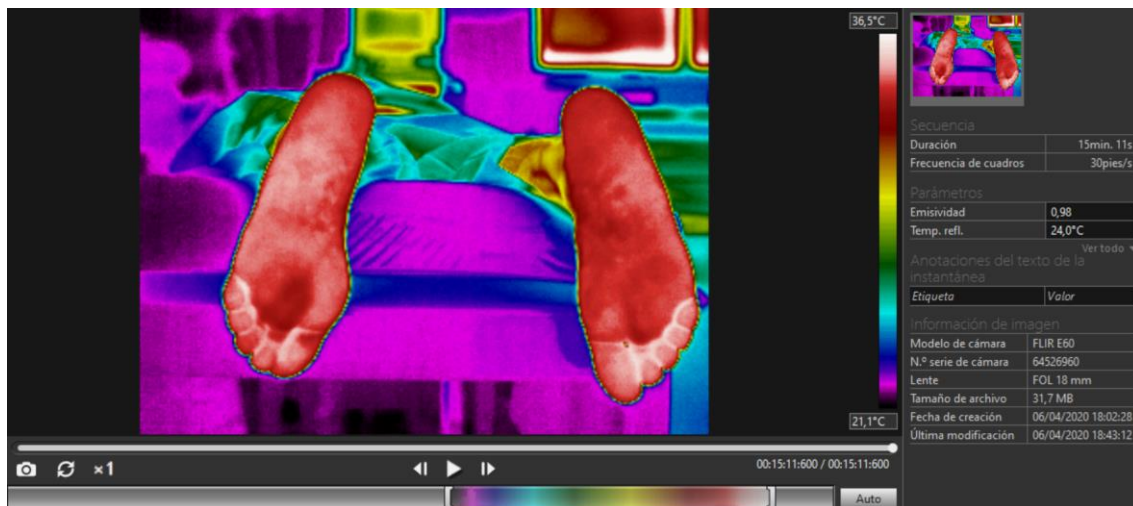


Figura 21. Pantalla del software FLIR Tools en la que se muestra la imagen termográfica adquirida. Además, se muestran la escala de temperatura, los datos de cámara y los parámetros relativos a las condiciones ambientales en el momento de la captura

4.2.2. Metodología para el desarrollo de la herramienta *software*

1. Tratamiento previo de las secuencias radiométricas y las imágenes IR

Tras la adquisición se realiza un tratamiento de las imágenes antes de cargarlas en Matlab para comenzar la segmentación y posterior cuantificación. Las imágenes termográficas para este trabajo se han cargado en Matlab como .mat. Esto se debe a que en formato .jpg los valores de intensidad de cada píxel se encontraban en el rango de 0 a 255. Las imágenes termográficas adquiridas tenían un valor de píxel correspondiente a la temperatura registrada con la cámara.

Por un lado, esto suponía una pérdida de información, puesto que para obtener la temperatura media hubiera sido necesario reescalar las imágenes haciendo corresponder el 0 con el valor mínimo de temperatura y el máximo con el valor 255. Convirtiendo cada *frame* adquirido a un .mat esto no era necesario, puesto que se conserva la temperatura como valor del píxel.

Por otro lado, las imágenes obtenidas en FLIR Tools que posteriormente se cargan en Matlab aparecen con una marca de agua que supone un nuevo cambio en las dimensiones de la imagen y que en ocasiones supone la eliminación de zonas de interés con la consiguiente pérdida de información.

Como se muestra en la Figura 22, las imágenes IR que se adquieren y se revisan en el *software* de FLIR Tools, después se cargan en el *software* de ThermaCam Researcher PRO. Con esta aplicación de escritorio las imágenes termográficas que inicialmente estaban en formato jpg se pueden convertir a otros formatos. Uno de esos formatos es el .mat, formato de documento de archivos Matlab. Las imágenes anatómicas se extraen a partir de las imágenes IR en el *software* de FLIR Tools.



Figura 22. Proceso de conversión y extracción de las imágenes adquiridas

Tras la conversión de formatos y la extracción de las imágenes anatómicas, es importante crear una estructura de directorios con las imágenes de los bloqueos de cada sujeto que facilite subirlas a Matlab. En la Figura 24 se muestran los pies separados en las imágenes IR y las imágenes anatómicas.

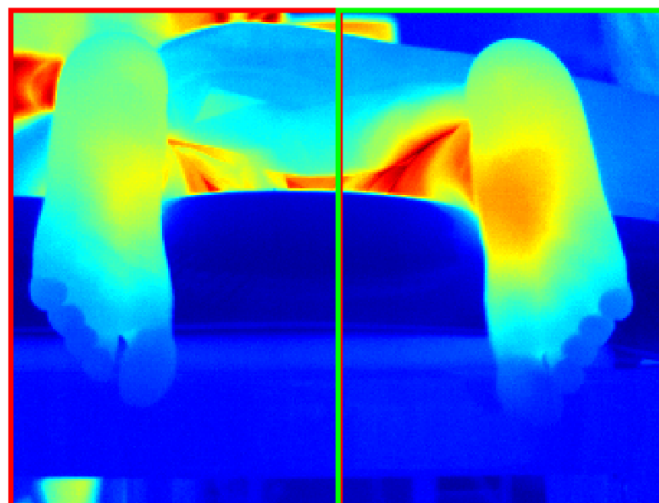


Figura 23. Separación de los pies mediante los rectángulos rojo (pie izquierdo) y verde (pie derecho)

Una vez que las imágenes se cargan, el siguiente paso es separar de cada imagen los pies, es decir, por un lado, los pies derechos y, por otro lado, los pies izquierdos. Esto se logra creando un rectángulo cuyas dimensiones sean la mitad de las columnas de la matriz de la imagen y el mismo número de filas. En la Figura 23 se muestra el recorte de la imagen original para separar ambos pies. Este proceso se realiza para las imágenes anatómicas si se trata del primer tipo de modalidad de adquisición.

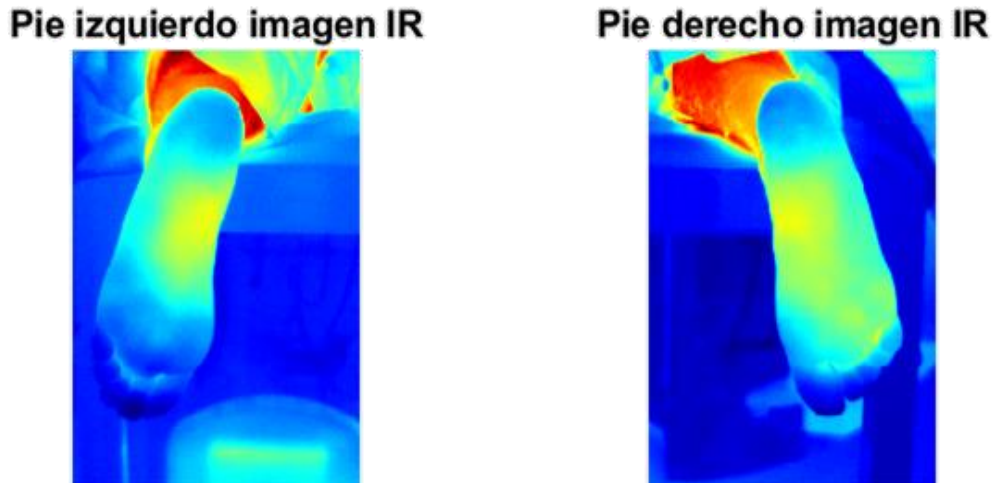


Figura 24. Pies separados en imágenes IR

1.1.1. Segmentación y extracción de ROIs

La segmentación de la planta de los pies y la extracción de regiones es la misma independientemente de la modalidad de adquisición con la que se esté trabajando. A continuación, se explican los pasos a seguir para segmentar y extraer las regiones que finalmente se cuantificarán para cada modalidad.

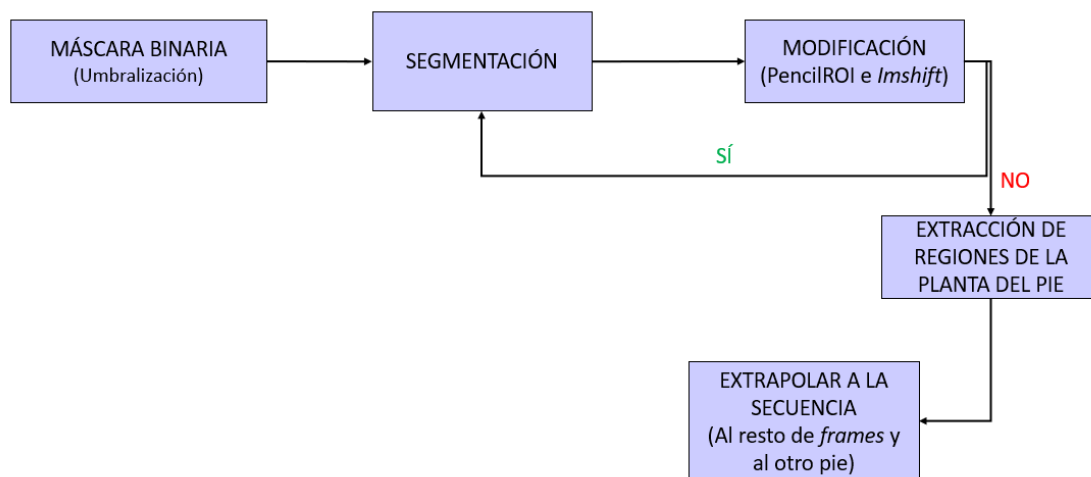


Figura 25. Pipeline de la segmentación de las imágenes IR

1. Máscara binaria y segmentación

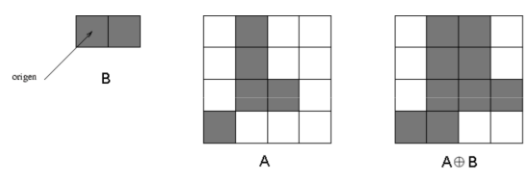
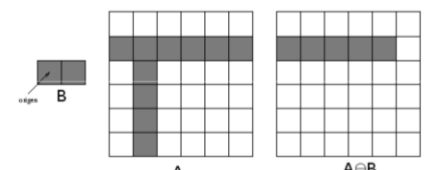
Para la extracción de las regiones cuantificables es necesario realizar la segmentación de una de las plantas del pie. Las imágenes IR de las secuencias a analizar se caracteriza porque la intensidad del píxel se corresponde con el valor de la temperatura en Kelvin. Es por ello, que es necesario transformar esa imagen a una escala de grises normalizada (de 0 a 1). Puesto que el objetivo es la diferenciación del objeto de interés (pie) del fondo, se crea una máscara binaria

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

empleando un umbral de 0.8 con el último *frame* de la secuencia. El resultado es una máscara en la que se intuye el pie. La elección del último *frame* se debe a que al tratarse de casos en los cuales las temperaturas aumentan considerablemente, ese aumento es lo que permite diferenciar el objeto del fondo, y por consiguiente segmentarlo. La opción de poder modificar esa máscara se debe a que la distribución de temperatura no tiene porqué ser homogénea, ni tiene por qué extenderse a la totalidad de la superficie plantar. De tal modo la máscara es modificada para poder ajustarse mejor a las dimensiones del pie del paciente con el que se vaya a trabajar.

Para mejorar la segmentación se utilizan operadores morfológicos [22] que van a permitir mejorar la calidad de la máscara de segmentación. Para este trabajo la aplicación de operaciones morfológicas tiene como fin: rellenar regiones, eliminar regiones que no son de interés y engrosar las verdaderamente importante. Por esta razón las operaciones morfológicas que se realizan son la erosión y la dilatación (Tabla 5).

Tabla 5. Tabla resumen de los conceptos de dilatación y erosión [22]

Dilatación	Erosión
<p>La dilatación se define como:</p> <p>La dilatación hace más visibles los objetos y rellena los huecos en los objetos (Figura 26).</p>	<p>La erosión se define como:</p> <p>La erosión elimina las islas y los objetos pequeños para que solo queden los objetos sustantivos (Figura 27).</p>
 <p>Figura 26. Ejemplo de dilatación [22]</p>	 <p>Figura 27. Ejemplo de erosión [22]</p>

Las máscaras obtenidas son muy diferentes, no siguen ningún tipo de patrón y dependen del aumento de temperatura que se produzca tras el BSL. Por esta razón y porque, además, las imágenes cuentan con fondo, las operaciones morfológicas facilitan la segmentación del verdadero objeto de interés y eliminan cualquier objeto que, aunque se encuentre por encima del pie, no es importante para el análisis cuantitativo de las imágenes IR. Además, la programación de la segmentación incluye seleccionar, en caso de segmentarse varias regiones, la región más grande que se asume que será el pie.

2. Modificación

Modificación de la máscara binaria

Es necesaria una modificación de la segmentación, de tal manera que se obtenga la planta del pie únicamente y en su totalidad, puesto que se trata de la zona de interés clínico de la que se

obtendrán las temperaturas. Por todo ello, partiendo de la máscara binaria con ayuda de la aplicación de Matlab PencilROI se va a realizar la edición del ROI.

Para la modificación, en primer lugar, se obtienen los límites exteriores de los objetos de la máscara binaria (Después, se llama a la función pencilROI y se selecciona la opción de editar ROI. Mediante el desplazamiento de los *waypoints* se va ajustando el contorno que se muestra en color verde a la zona que interesa ser segmentada.

Finalmente, se obtiene la nueva máscara binaria partiendo de la ROI modificada de forma interactiva y se realiza la segmentación sobre la imagen IR. En las figuras posteriores se muestra la nueva máscara binaria junto con el resultado de la segmentación de ambas imágenes (Figura 28 y Figura 29).

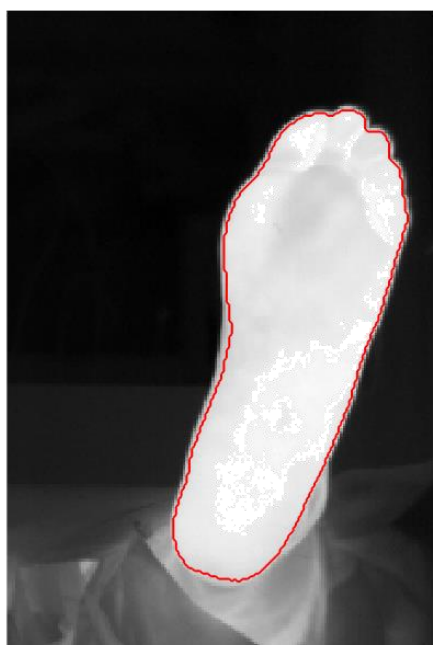


Figura 28. Límites de la máscara binaria que sirve para la segmentación de la planta del pie

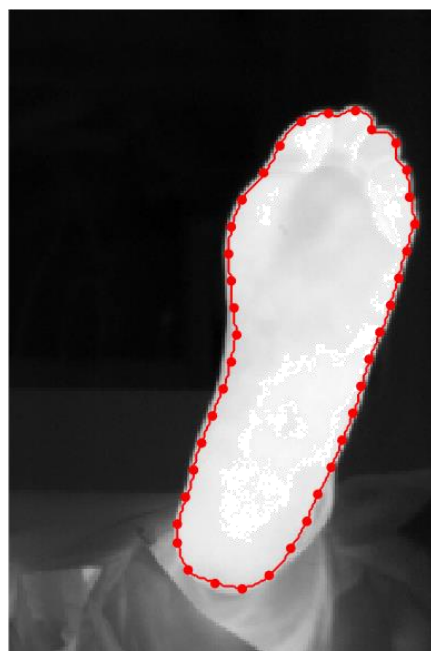


Figura 29. Opción de modificar de la herramienta PencilROI con los waypoints que permiten la modificación de las dimensiones de la máscara

3. Colocación de los dedos

Puesto que para la realización de este análisis cuantificable de regiones es necesario detectar estructuras sobre imágenes funcionales, se colocan los dedos sobre la planta del pie. Los dedos de los pies son difíciles de diferenciar dentro de la imagen IR si no se cuenta con referencias estructurales. Por esa razón, es mucho más sencillo si mediante una serie de puntos se colocan ROIs circulares en las zonas correspondientes a la localización de los dedos, que posteriormente puedan ajustarse.

Para ello se visualiza la imagen IR y se habilita la opción de seleccionar puntos sobre dicha imagen. Se seleccionan los dedos clicando sobre ellos, aproximadamente en la parte central. Tras seleccionar el dedo, tal y como se muestra en las imágenes posteriores, se coloca una ROI

circular. El proceso se repite para los 5 dedos del *frame* sobre el que se ha realizado la misma segmentación de la planta. El orden de selección de los dedos es desde el primer dedo, o hallux, hasta el quinto dedo.



Figura 30. Localización del primer dedo o hallux sobre la imagen IR

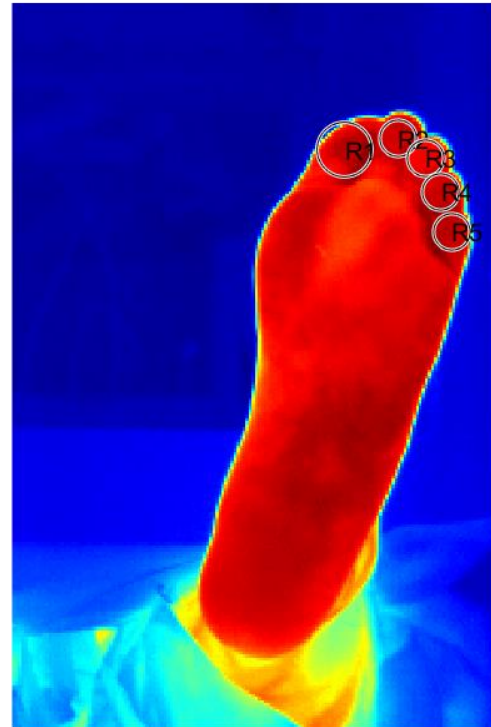


Figura 31. Localización de los 5 dedos sobre la imagen IR en orden

Tras la obtención de las regiones de los dedos, se crea una plantilla que sirve de imagen anatómica, con referencias estructurales, que permite la obtención del resto de regiones que se distribuyen a lo largo de la planta del pie. En la plantilla se extraen los dedos de los pies para que el algoritmo de extracción de regiones detecte bordes en esas zonas, asumiendo que se trata de los dedos de los pies.

4. Extracción de regiones cuantificables de la planta del pie

La última parte de la segmentación consiste en la extracción de áreas de la planta del pie que más adelante sirvan para hacer un seguimiento del aumento de temperatura. Es importante recordar que ese aumento es el que determinará si el BSL mediante lidocaína se realiza correctamente para tratar el SDRC.

Para esta parte se utilizó el código de Matlab de Jean Gauci et al. [23] El código utiliza la imagen anatómica para extraer regiones sobre la imagen IR (Figura 32). En primer lugar, se obtienen las regiones correspondientes a los dedos de los pies mediante la detección de bordes aplicando un filtro Gaussiano. Después, tal y como se muestra en la Figura 33, se obtienen los círculos de la planta del pie (regiones 27 y 33) y de los talones (regiones 30 y 36) Una vez que se obtiene la posición correcta de los círculos se dibujan los rectángulos, correspondientes con las regiones 28, 29, 25 y 34, en la planta y, 31, 32, 38 y 37, en los talones (Figura 32) [23].

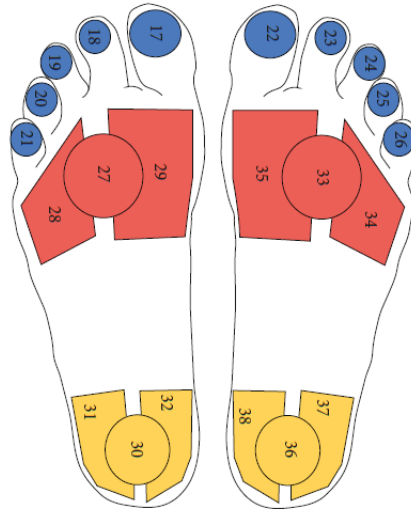


Figura 32. Regiones anatómicas de interés detectadas en las plantas de los pies obtenidas del artículo de Gauci et al [23]

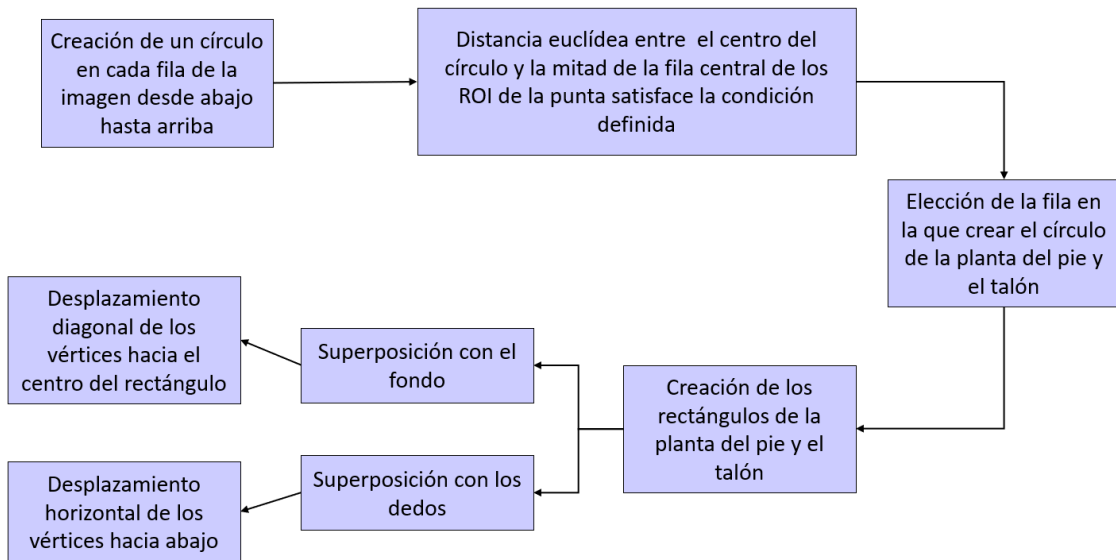


Figura 33. Pipeline del proceso de extracción de las regiones de la planta y los talones

Como se muestra en la Figura 33, para la extracción de las regiones de la planta media y el talón, en primer lugar, se crean círculos en cada una de las filas desde el borde inferior hasta el borde imaginario creado que separa la zona de los dedos de los pies del resto del pie. Los círculos que se crean son definidos por la Ecuación 3, donde r es la coordenada y del centro del círculo, establecido en la fila de la correspondiente iteración; $c(W_r)$ es la coordenada x del centro del círculo, establecido en el punto medio del ancho horizontal del pie en la fila r , W_r ; y βW_r es el diámetro del círculo donde β se define de acuerdo con el tamaño deseado de la ROI. El proceso iterativo termina en la fila r^* cuando la distancia Euclídea $d(\cdot)$ entre el centro del círculo C , denotado por C_{xy} , y la fila central de las ROI de la punta, R , satisface la Ecuación 4, donde τ se fija de acuerdo con la posición en la que se desee colocar la ROI. Cuando se tiene una fila candidata para fijar el centro del círculo, r^* , se comienzan a crear las regiones poligonales cercanas de acuerdo con la Ecuación 5 y la Ecuación 6, donde W_{rect1} y W_{rect2} son

iguales a αW_{r*} , el ancho de los cuadriláteros con un valor α fijado en función del tamaño que se desee [23].

$$C = (c(W_r), r, \beta W_r) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$d(C_{xy}, R) = \tau \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q1_c = (C_x - \frac{\beta W_{r*}}{2} - \frac{W_{rect1}}{4}, r^*) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Q2_c = (C_x - \frac{\beta W_{r*}}{2} - \frac{W_{rect2}}{4}, r^*) \quad \text{Ecuación 6}$$

Para colocar las regiones evitando los solapamientos y superposiciones con los dedos de los pies, se realizan desplazamientos horizontales y oblicuos, evitando coincidir con los dedos de los pies. Además, para evitar el solapamiento de las regiones de la planta media y del talón, se asignan los píxeles comunes a las regiones circulares. El resultado de las máscaras correspondiente a las regiones extraídas son las que se ven en la Figura 34. La extracción de regiones se realiza únicamente en el último *frame* del pie izquierdo. Posteriormente, se extrapolan esas regiones al resto de la secuencia, incluyendo las imágenes correspondientes al pie derecho. Para extrapolarla al pie derecho, se invierten las máscaras y se colocan sobre la imagen IR derecha (Figura 34 (A)) [23].

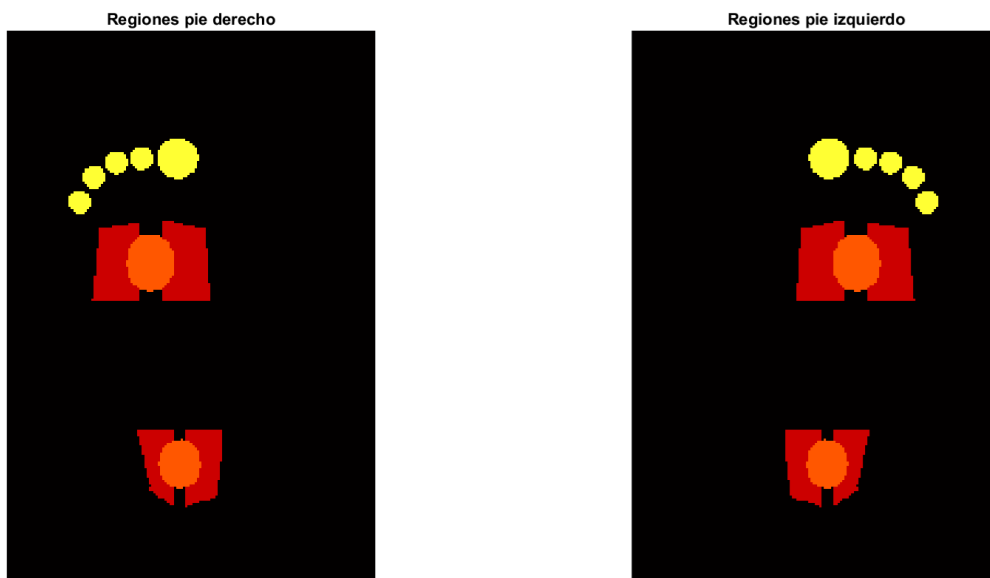


Figura 34. Máscaras correspondientes a las regiones de los pies extraídas. A) Pie derecho B) Pie izquierdo

Para este trabajo, en esta modalidad, este código no sufrió ninguna modificación. Se ejecutó sobre la plantilla mencionada anteriormente y la imagen IR segmentada, y se obtuvieron las regiones de interés (Figura 35).



Figura 35. Límites de las regiones de interés sobre las imágenes de termografía de los pies derecho e izquierdo, respectivamente

5. Modificación de las ROIs extraídas

Atendiendo al estado del arte realizado en el capítulo 3 de este trabajo y a las imágenes que se muestran en la Figura 35, se observó la necesidad de implementar dentro de la herramienta de cuantificación una serie de métodos de edición de ROIs. Estos métodos de edición de ROI se consiguieron al incluir en la herramienta *software* que se desarrolla en este trabajo la herramienta de edición pencilROI. Esta herramienta, previamente desarrollada en el año 2016 [24], tiene implementados una serie de métodos que permiten dibujar regiones de interés, eliminarlas, modificarlas mediante el desplazamiento de *waypoints* y desplazarlas por toda la imagen. El objetivo de estos métodos es colocar en la zona correcta las regiones en los casos en los que se hayan movido los pies y no se localicen las zonas de análisis. De esta manera, se eliminan errores debido a la selección de píxeles del fondo.

4.2.3. Análisis de los datos de temperatura extraídos

Atendiendo a la Figura 17, el siguiente paso tras la extracción de las regiones cuantificables es la obtención de las temperaturas medias, máximas y mínimas de cada región con el fin de realizar un análisis y determinar la evolución de la temperatura a lo largo de la secuencia.

El código de Jean Gauci et al [23] ya tenía implementada la obtención de la temperatura media por región extraída. Como añadido se ha obtenido la desviación típica, o desviación estándar, la temperatura máxima y la temperatura mínima. El motivo de obtener la desviación estándar es saber cuánto se desplazan los valores del valor esperado (valor medio). La desviación estándar es importante para analizar los datos porque tiene en cuenta cada uno de los valores de temperatura.

Tabla 6. Fórmulas de la media y la desviación típica

Media	Desviación típica
$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{N}$ <p><i>Ecuación 7</i></p>	$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{N}}$ <p><i>Ecuación 8</i></p>

En la Tabla 6 se recogen las fórmulas de la media (valor esperado) y de la desviación típica. Estos valores se obtienen en Matlab utilizando los métodos *mean* y *std*. El objetivo de la obtención de estos datos es observar en el tiempo una variación en la distribución de temperatura, que siguiendo las bases teóricas del BSL, se debe corresponder con un aumento de la temperatura superficial plantar. Para ello se han obtenido también la temperatura máxima y mínima de cada región. De esta forma se puede observar si el valor máximo de temperatura aumenta o disminuye, al igual que la temperatura mínima y la media. El objetivo es observar los 4 parámetros y determinar la significancia de cada uno de ellos para poder extraer las conclusiones.

Para una mejor visualización y concepción de los datos las unidades empleadas son los grados Celsius por tratarse de la unidad con la que más familiarizada se está. Para ellos a cada valor de píxel se le ha restado 273 (valor 0 en grados centígrados).

Los datos se visualizan en una tabla, donde se recogen todos los valores de las regiones para un mismo *frame*, y en gráficas donde el eje x se corresponde con la línea de tiempos y el eje y se corresponde con los valores de temperatura para cada instante. Puesto que se cuenta con dos adquisiciones en las cuales el tiempo entre una imagen y la siguiente es diferente, en función de la modalidad en la que se esté realizando el análisis el eje x cambiará. En el caso de la modalidad 1, los puntos estarán equiespaciados 60 segundos y en el caso de la modalidad 2 serán 10 segundos.

Finalmente, estos datos se almacenan y se exportan a un Excel con varias hojas y en cada una de ellas se almacenan los datos de cada parámetro por separado, es decir, una hoja con temperatura media, otra con temperatura máxima, y así sucesivamente.

4.2.4. Creación de una herramienta de cuantificación de secuencias IR

El objetivo primero de este trabajo, tal y como dice el título, es la creación de una herramienta de cuantificación de secuencias IR para pacientes con SDRC. Es por ello, que una vez implementados todos los métodos anteriormente descritos de segmentación y extracción de regiones cuantificables, se ha diseñado y creado una interfaz gráfica con la cual el usuario puede interactuar para realizar la cuantificación de secuencias IR de diversos pacientes. Para lograrlo, se ha utilizado la GUI de Matlab.

Para la creación de la interfaz se han implementado botones que llaman a los métodos de segmentación y modificación, que permite seleccionar el tipo de modalidad de adquisición o el pie que sufre la afección, que permiten visualizar los resultados (imagen IR segmentada y tabla de valores de temperatura en Kelvin) y que permiten guardar los resultados en formato .mat

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

en el directorio de trabajo. La interfaz cuenta con dos pantallas diferentes, una de interacción durante la segmentación y otra de visualización de los parámetros de cuantificación de las secuencias y exportación de los resultados.

Para la creación de la interfaz, además, se han tenido en cuenta aspectos de robustez, usabilidad y diseño. El objetivo de la herramienta interactiva es que sea fácil de usar, intuitiva, visual y funcional. Es por ello, que se han integrado los métodos y funciones de cuantificación con cuadros de texto que facilitan la navegación al usuario sin perder de vista un diseño atractivo.

5. RESULTADOS

5.1. Herramienta de cuantificación de imágenes termográficas

En Figura 36 se muestra la pantalla principal de la herramienta de cuantificación de secuencias IR creada con la GUI de Matlab y en la Figura 37 se muestra la pantalla de visualización de los resultados obtenidos que pueden exportarse, además, a Excel.

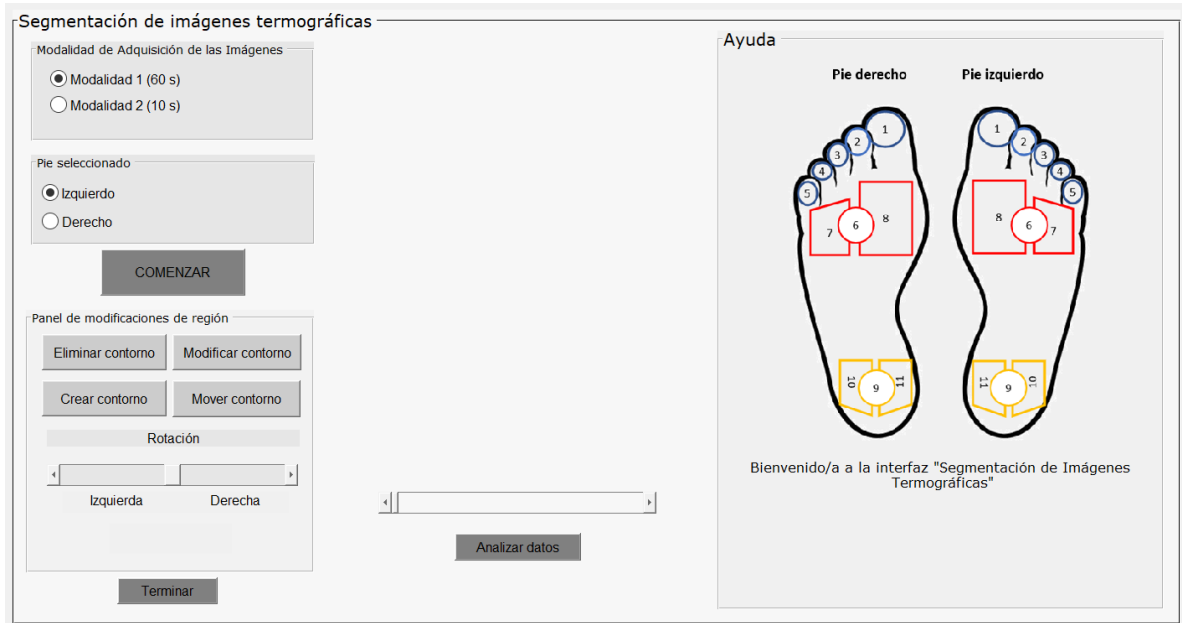


Figura 36. Herramienta de cuantificación de secuencias IR creada con el GUI de Matlab

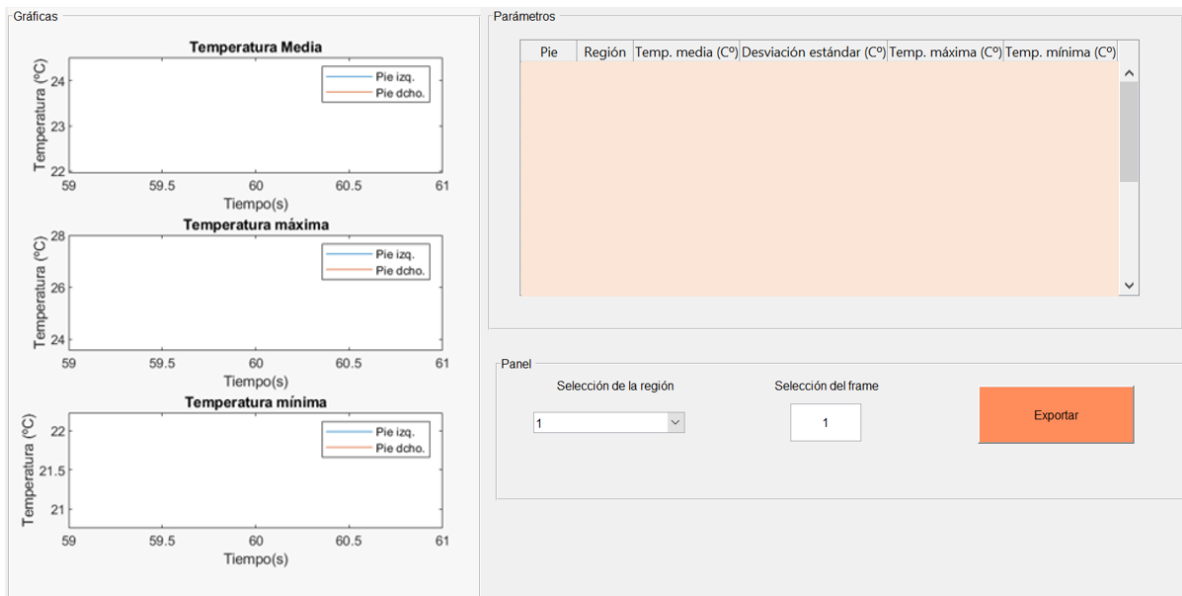


Figura 37. Pantalla de visualización de los resultados obtenidos tras la extracción de regiones

5.1.1. Paneles de selección y modificación

1. Panel de selección de modalidad de adquisición

Durante todo el trabajo se ha hablado de las dos modalidades de adquisición, es por esa razón, por la cual se ha implementado un panel en el cual se puede seleccionar el tipo de modalidad con el que se va a trabajar. Este aspecto es importante debido a que en la modalidad 1 se cargan imágenes anatómicas e imágenes IR. Sin embargo, en la modalidad 2 subir la secuencia IR. En la Figura 38 se muestra en el recuadro rojo el panel de selección de modalidad.

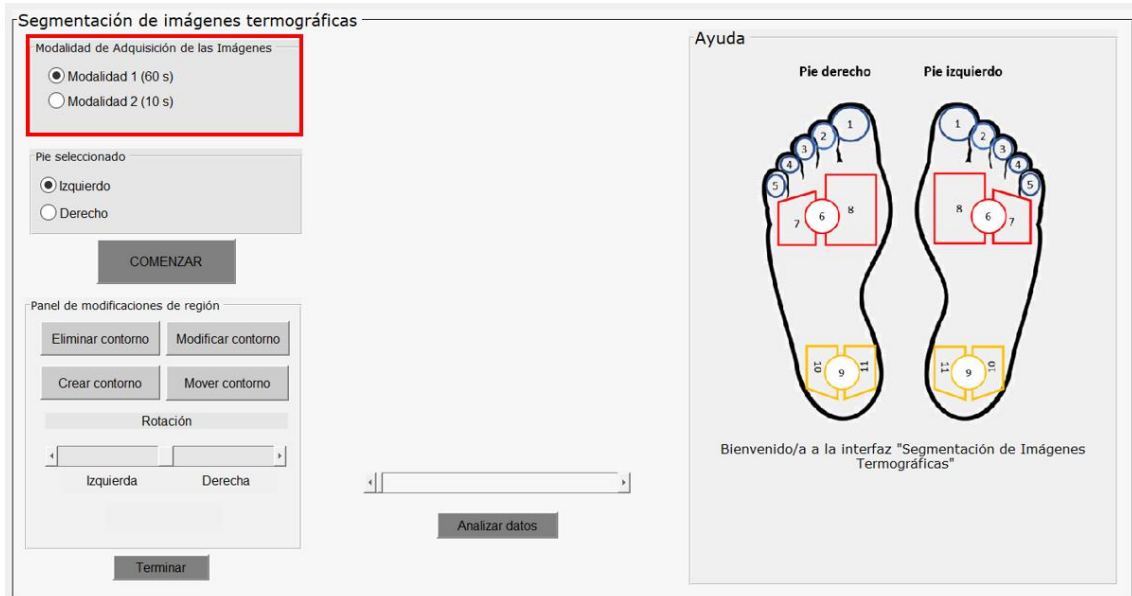


Figura 38. Panel de selección de la modalidad de adquisición de las secuencias a cuantificar (recuadro rojo)

2. Panel de selección de pie

Las personas que sufren ese SDRC en los miembros inferiores suelen sufrirlo en unos de los dos. Esto es por lo que se ha creado un panel de selección en el cual se puede elegir el pie afectado. También se puede realizar la cuantificación en el pie no afectado, es decir, el pie contralateral, para realizar un análisis asimétrico. En la Figura 39 en el recuadro rojo se encuentra el panel de selección de pie afectado por el síndrome.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

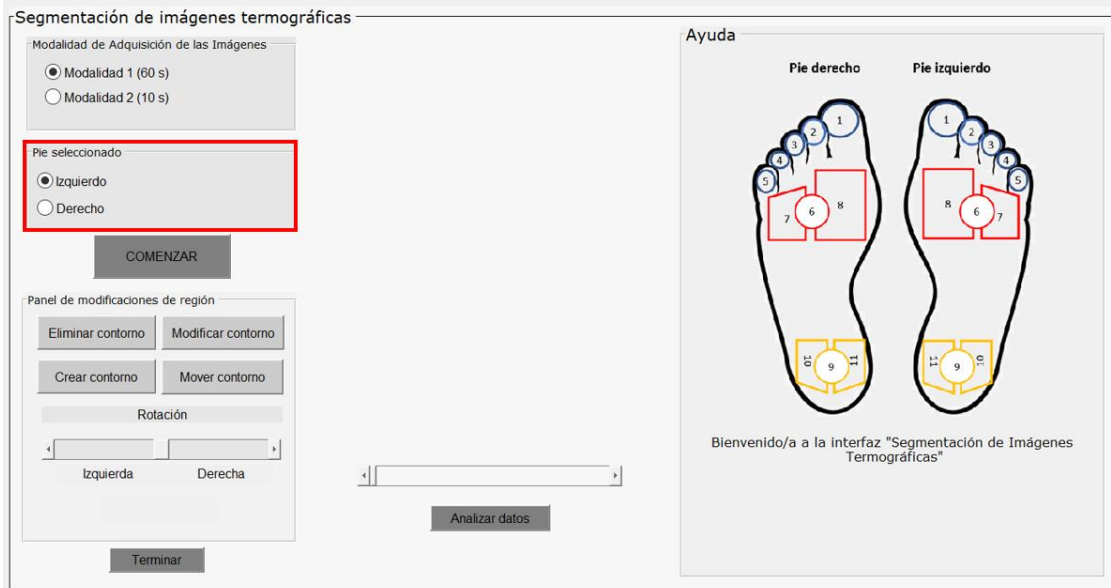


Figura 39. Panel de selección del pie afectado por el SDRC de las secuencias a cuantificar (recuadro rojo)

3. Panel de modificaciones

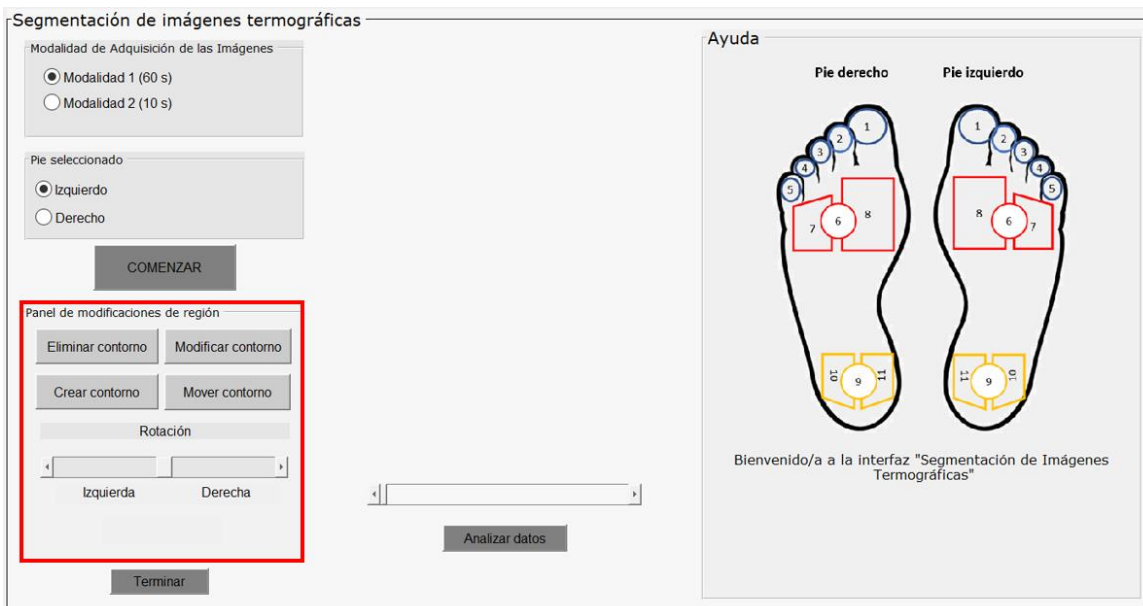


Figura 40. Panel de modificaciones de las regiones extraídas y cuantificadas (recuadro en rojo)

El panel de modificaciones (Figura 40) tiene como objetivo la mejora de las regiones extraídas para evitar comprometer los datos de temperatura. Atendiendo a las opciones de modificación que ofrece la herramienta pencilROI junto con la herramienta shift las opciones de modificación son:

- **Modificar contorno.** Esta opción funciona de la misma manera que la modificación de la máscara binaria. La única diferencia es que ahora no solo se puede modificar la máscara binaria correspondiente a la planta del pie, sino que además se pueden modificar las regiones cuantificables extraídas a partir del código de Jean Guaci et al. En primer lugar, se selecciona una región (Figura 41) y después se modifica la región

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

ajustando y moviendo los *waypoints* (Figura 42). Tras la modificación, se pulsa el botón terminar y se muestra el resultado final (Figura 43).

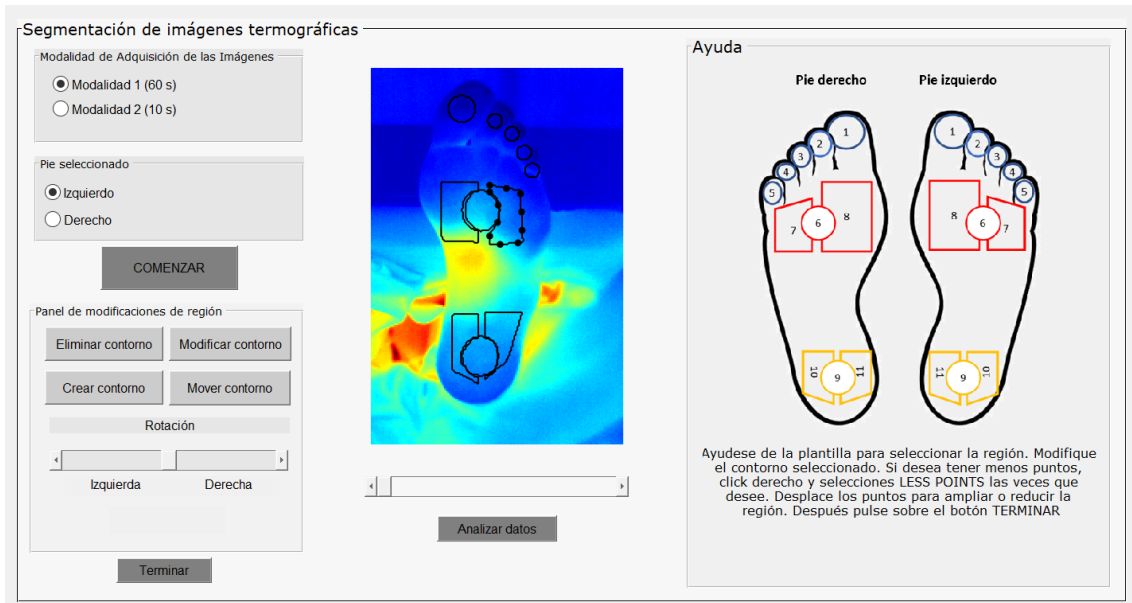


Figura 41. Selección de la región 8 del pie izquierdo para modificarla

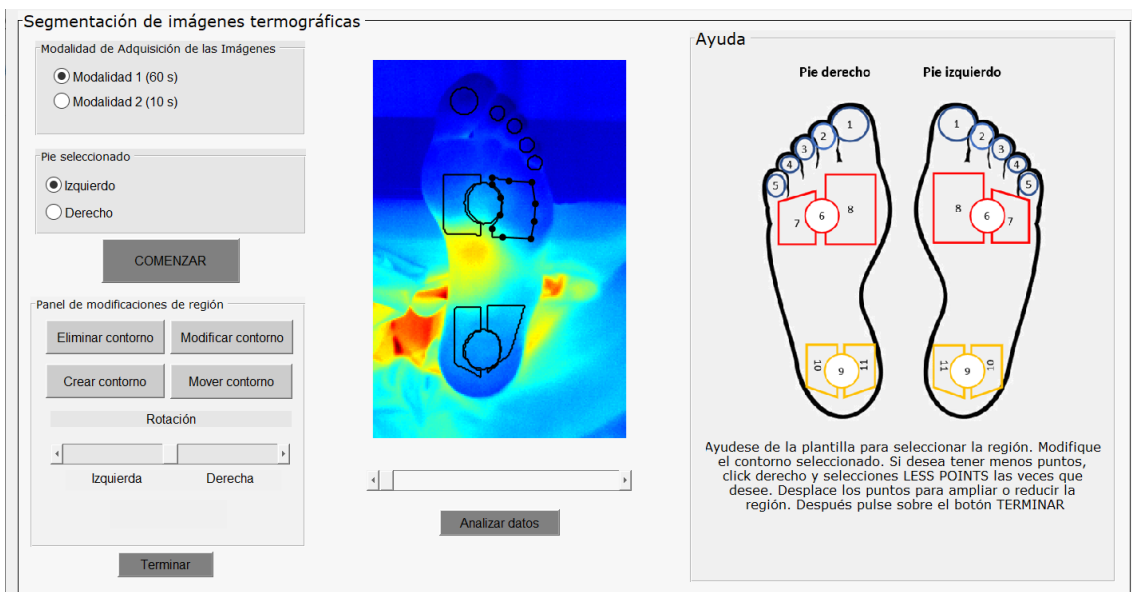


Figura 42. Modificación de la región 8 del pie izquierdo moviendo los waypoints para adaptarlos a la forma deseada

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

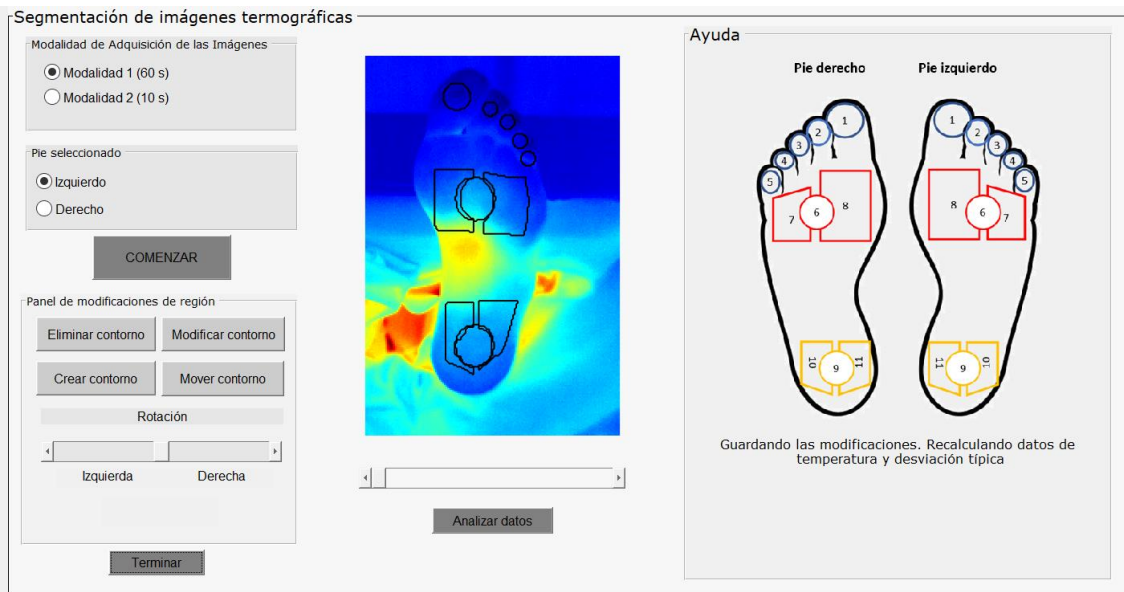


Figura 43. Resultado final de la modificación de la región 8 del pie izquierdo

- Eliminar contorno. Al pulsar sobre esta opción se puede eliminar cualquier región que aparece en el panel de visualización (Figura 53) pinchando sobre ella. En la Figura 44 se muestra como la región 8 ha desaparecido tras utilizar la opción “Eliminar contorno”.

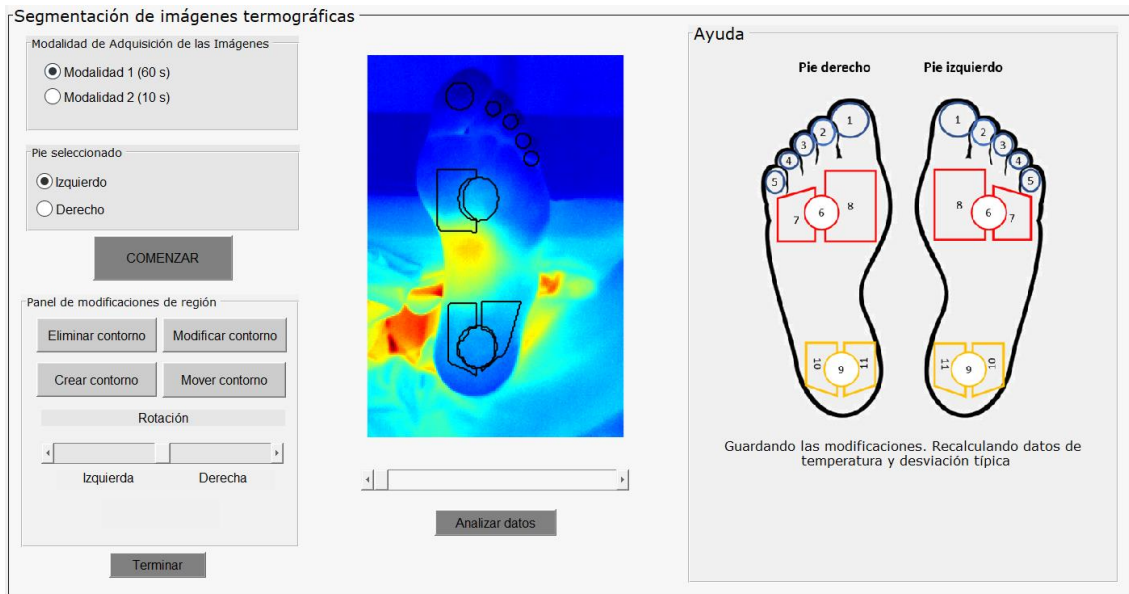


Figura 44. Eliminación de la región número 8 del pie izquierdo

- Crear contorno. De la misma manera que se dibujan las ROIs para crear la plantilla, se puede crear una región que no exista sobre la imagen IR segmentada final. En primer lugar, se selecciona la opción de “Crear región”, se muestra la imagen térmica para poder dibujar sobre ella y se dibuja la región que se necesita para completar la extracción (Figura 45). El resultado se puede ver en la Figura 46.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

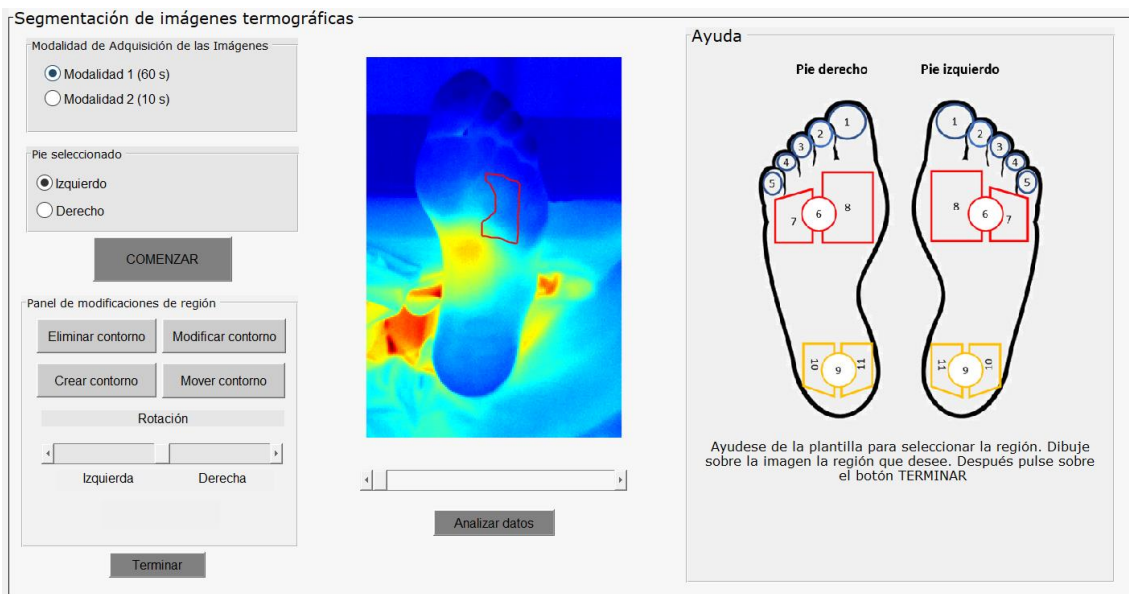


Figura 45. Creación de un contorno mediante la herramienta pencilROI dentro de la herramienta de cuantificación

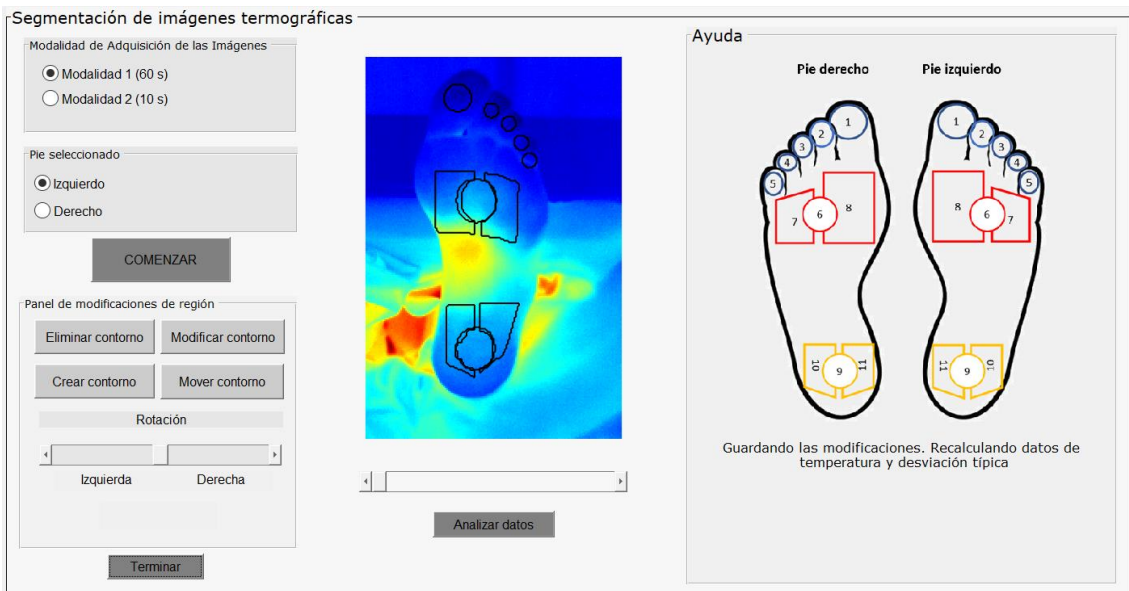


Figura 46. Resultado de la creación de una región con la herramienta pencilROI integrada en la herramienta cuantificable

- Mover contorno. Otra de las opciones de la herramienta pencilROI es el desplazamiento de una región sobre la imagen. En este caso al seleccionar la opción “Mover contorno” y clicar sobre él, éste puede desplazarse y colocarse en la parte que más convenga para el análisis de la secuencia.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

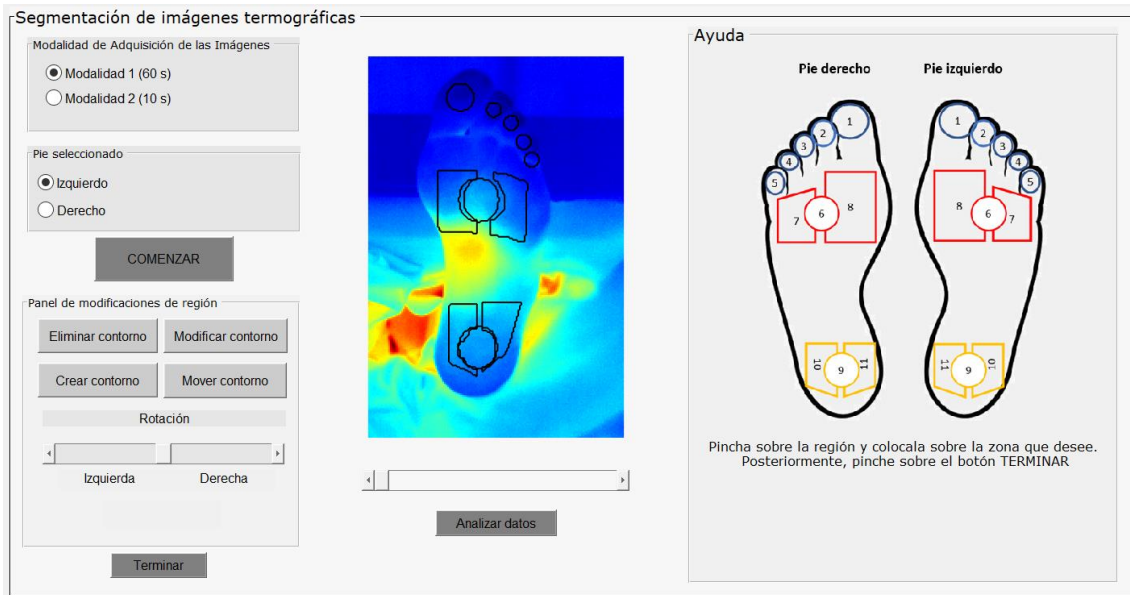


Figura 47. Resultado del desplazamiento de una región con la herramienta pencilROI integrada en la herramienta cuantificable

- Rotación. Puesto que en ocasiones el paciente puede mover los pies y rotarlos, se ha habilitado la opción de rotar hacia la derecha (Figura 48) o hacia la izquierda (Figura 49). La rotación se hace de 15 grados en 15 grados para evitar rotaciones muy bruscas y cambios en la geometría de las regiones.

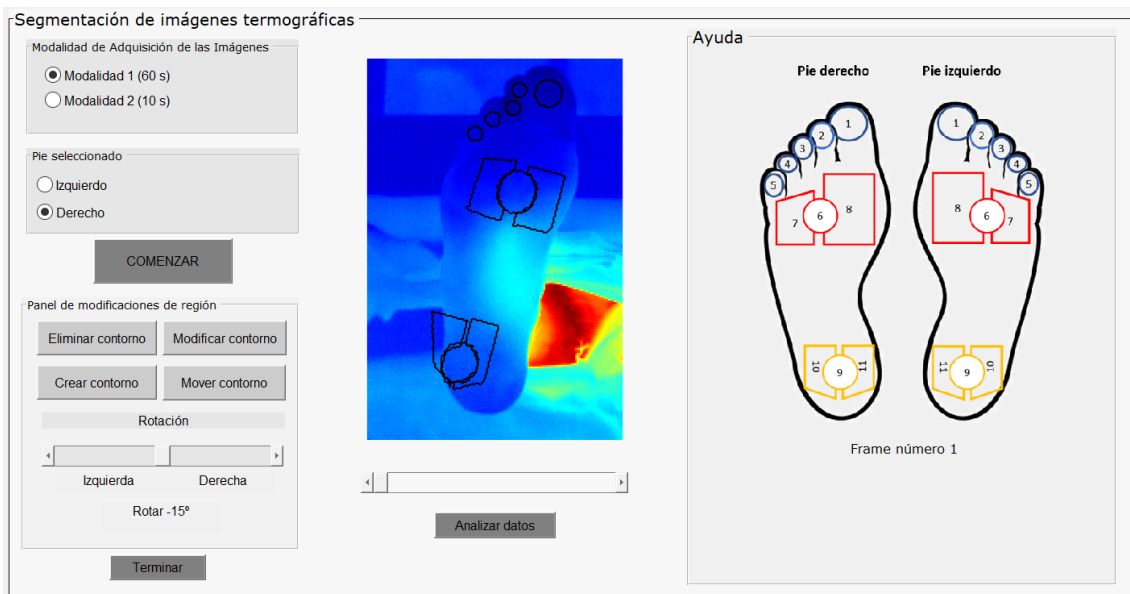


Figura 48. Rotación de las regiones de la planta del pie hacia la derecha (-15°)

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

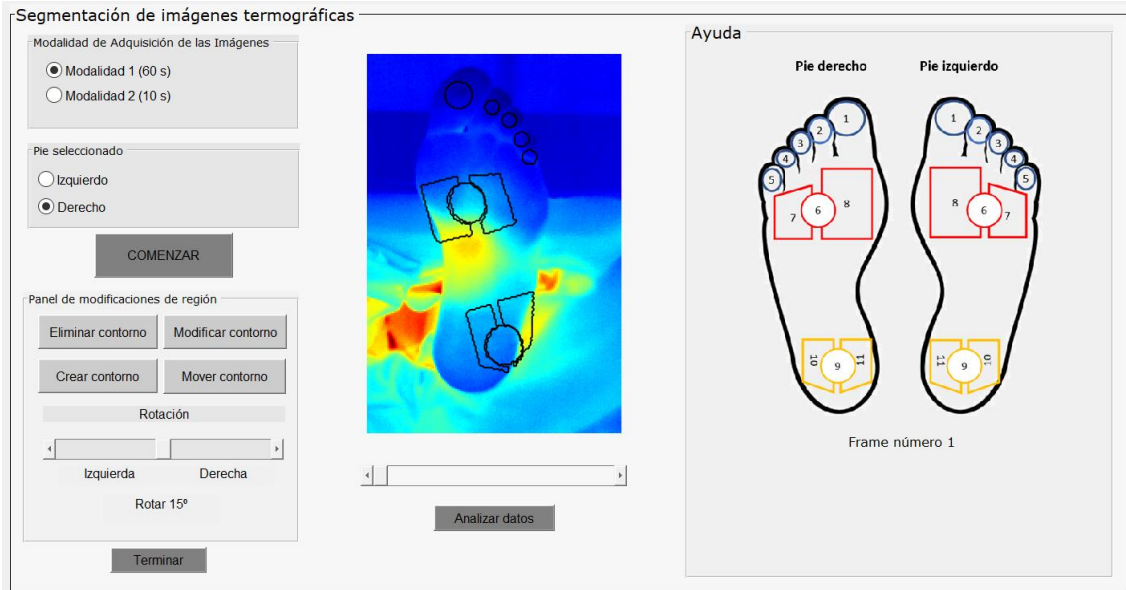


Figura 49. Rotación de las regiones de la planta del pie hacia la izquierda (+15°)

5.1.2. Botones

1. Comenzar

Tras la elección de la modalidad y del pie que se desea cuantificar al clicar sobre el botón “Comenzar” se abren las pestañas del directorio de trabajo con el fin de cargar las imágenes que se van a analizar. A continuación, en función de la modalidad seleccionada se iniciará el proceso de segmentación y cuantificación correspondiente.

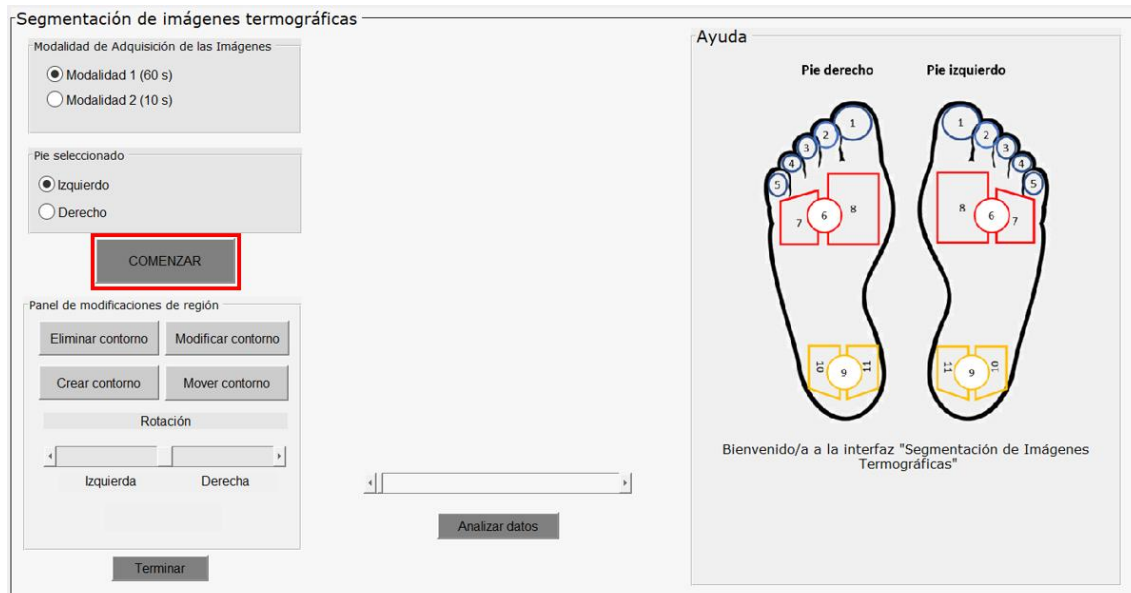


Figura 50. Botón de 'Comenzar' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación

2. Terminar

Tras la modificación de cualquier región es necesario pulsar el botón “Terminar”. Este botón finaliza las modificaciones, guarda las nuevas regiones y recalcula los datos de media y desviación estándar de las temperaturas.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

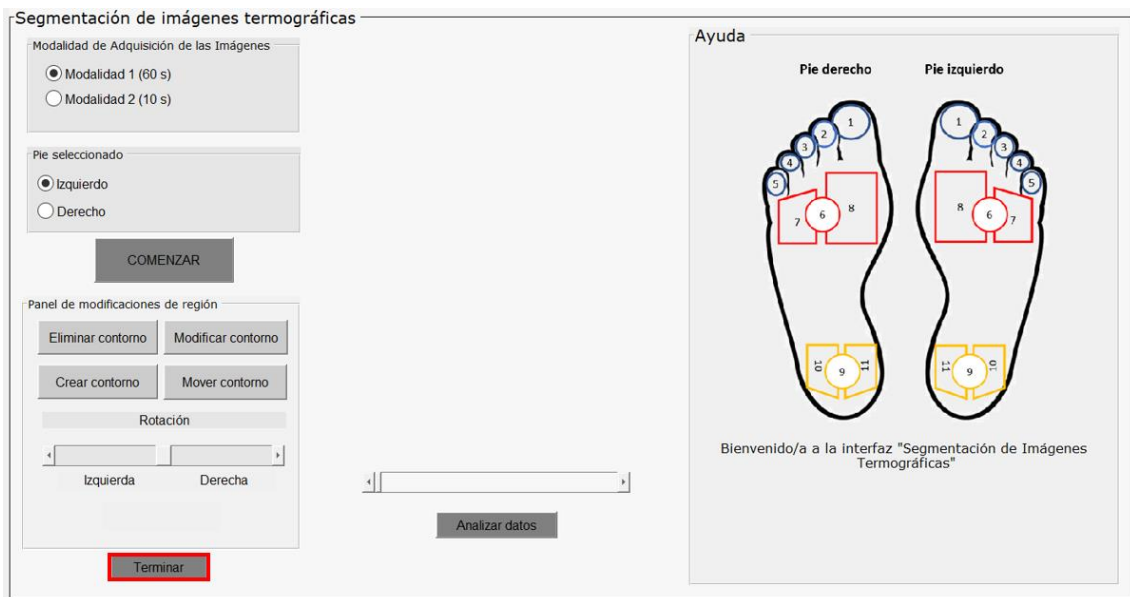


Figura 51. Botón de 'Terminar' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación

3. Analizar datos

Este botón recarga la pantalla de visualización de datos (Figura 37) y actualiza los valores tras las modificaciones en las regiones. El resultado es la pantalla de visualización de datos con los nuevos valores.

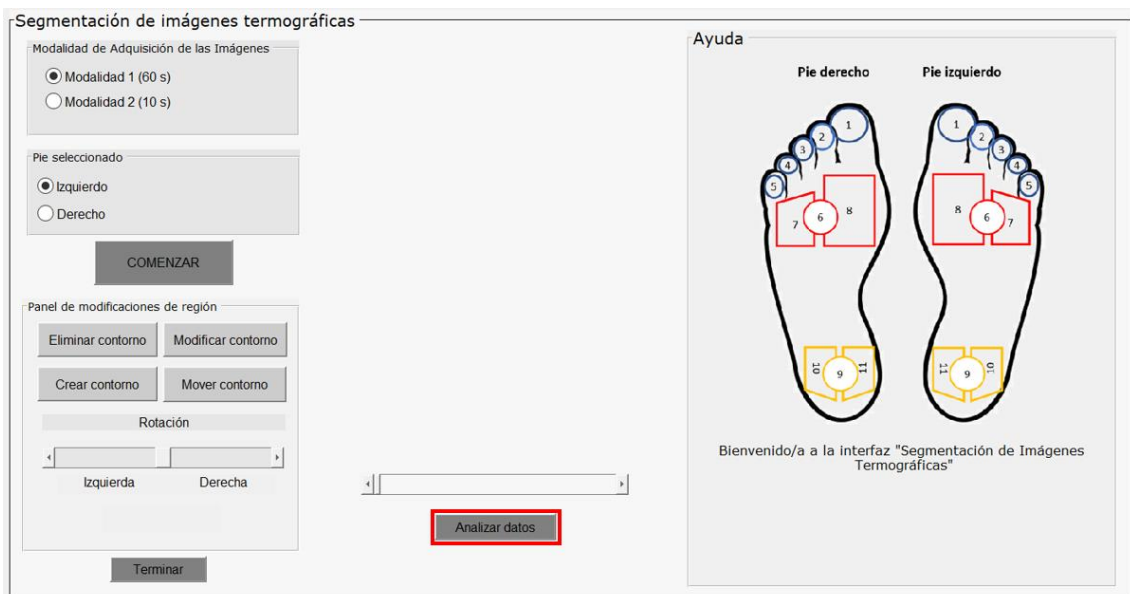


Figura 52. Botón de 'Analizar datos' (recuadro rojo) en la herramienta de cuantificación

1.1.2. Visualización de resultados

1. Visualización de imágenes

Durante todo el proceso e interacción por parte del usuario todas las imágenes se muestran en el “panel de visualización” (Figura 53) y se muestra el resultado final para poder realizar las modificaciones o exportar los datos en caso de estar conformes con las extracciones y cuantificaciones (Figura 54).

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

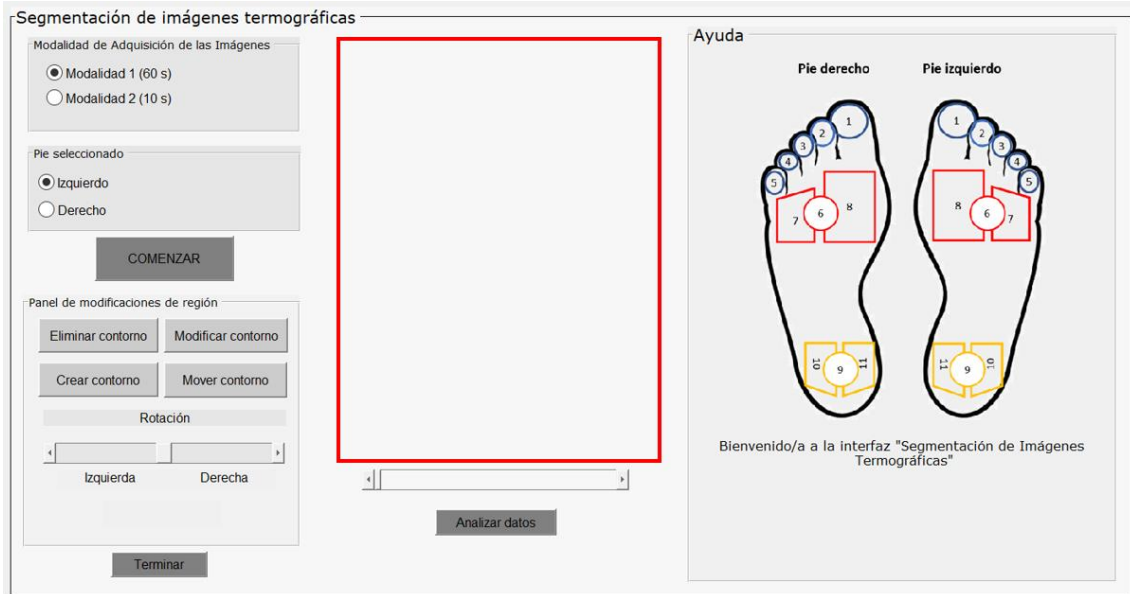


Figura 53. Pantalla de visualización del resultado de la segmentación y extracción de imágenes IR (recuadro rojo)

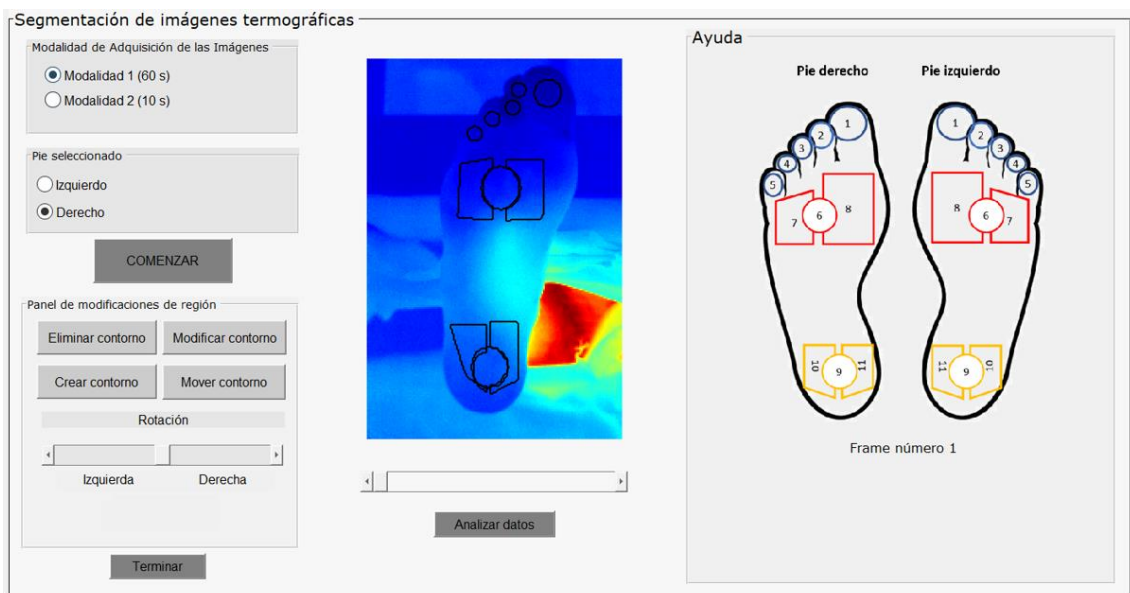


Figura 54. Resultado de la segmentación y cuantificación en el panel de visualizaciones

[1] Visualización de temperaturas por regiones

Los valores obtenidos de los parámetros extraídos de las regiones se visualizan y recogen de la manera que se muestra en la Figura 37. Por una parte se tiene un panel de gráficas en las que se puede ver como se representan los valores de temperatura media (Figura 55), temperatura máxima (Figura 56) y temperatura mínima (Figura 57) de una región a lo largo del tiempo. Además, se puede ver como se compara la misma región en ambos pies. Esto permite realizar un análisis asimétrico y permitirá saber cuál de los pies padece el SDRC.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

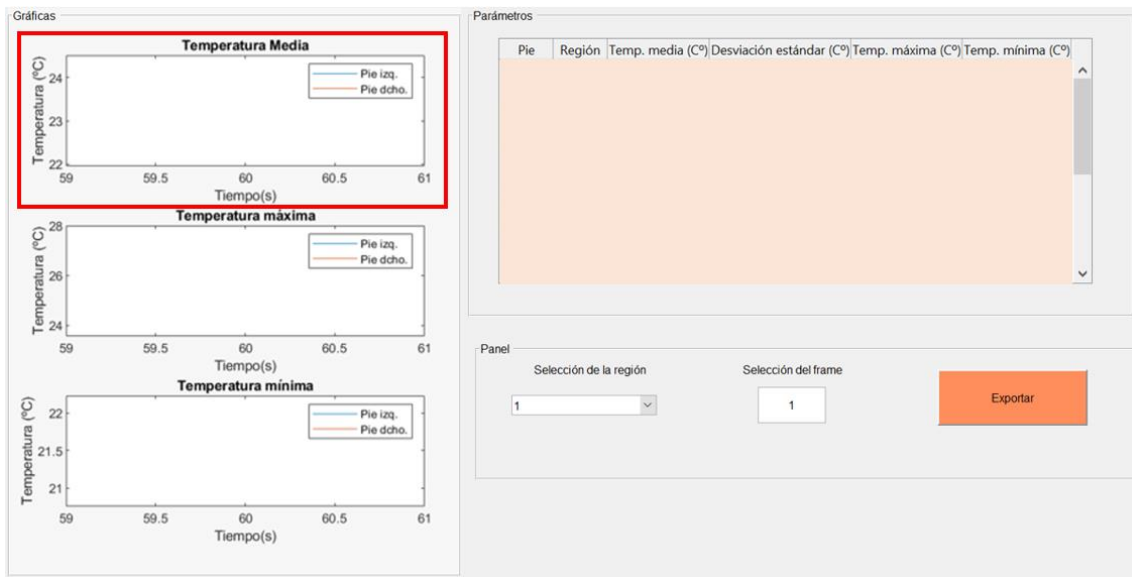


Figura 55. Gráfica de temperatura media de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada

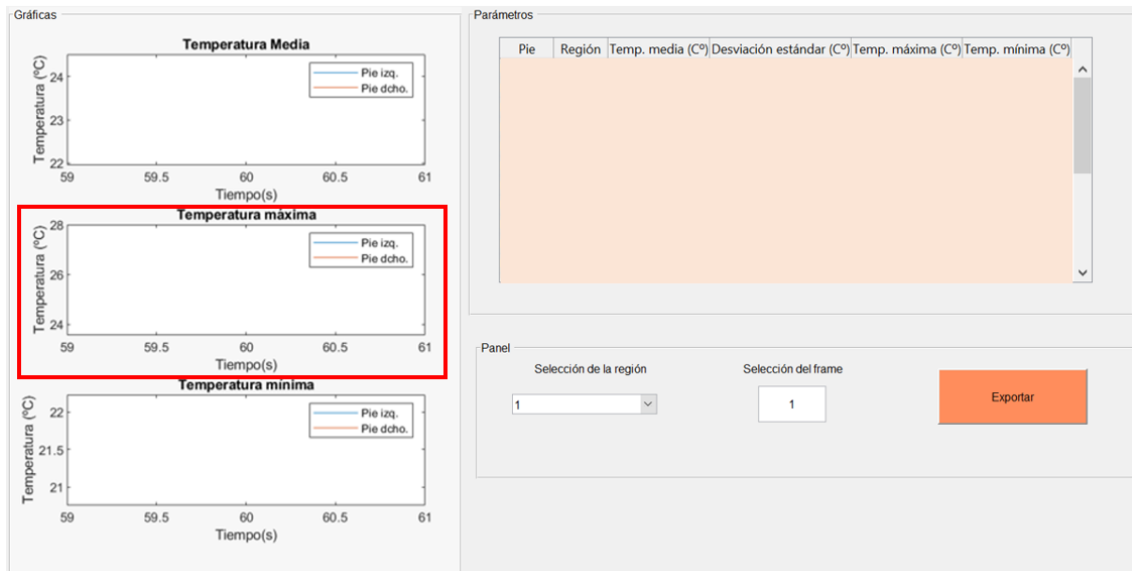


Figura 56. Gráfica de temperatura máxima de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

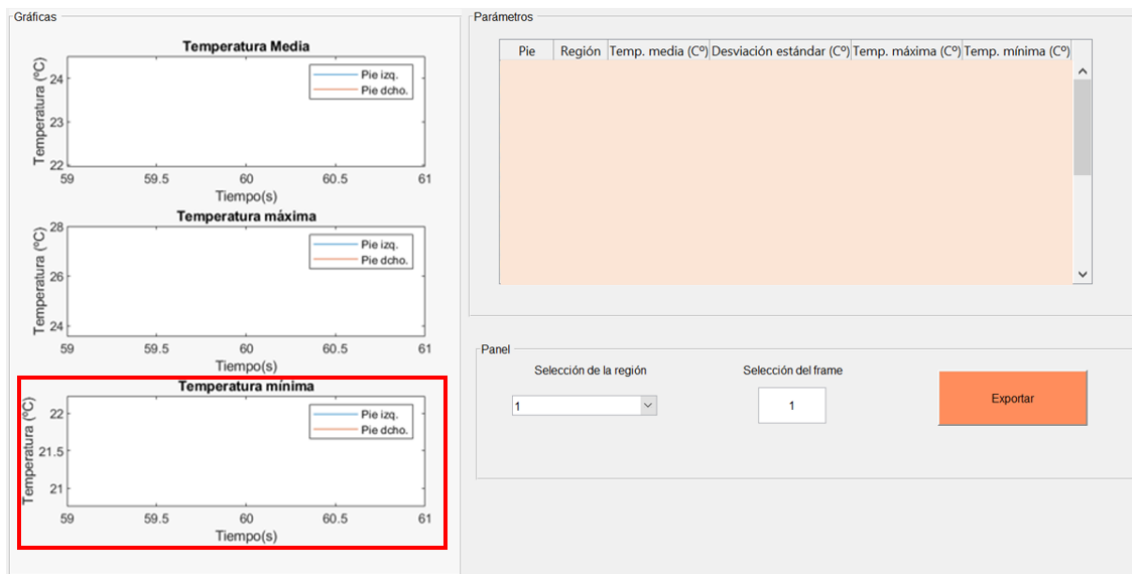


Figura 57. Gráfica de temperatura mínima de ambos pies (recuadro rojo) para la región seleccionada

Para cambiar de región se cuenta con un menú desplegable que permite seleccionar cualquiera de las 11 regiones (Figura 58). Al seleccionar la región se modifican automáticamente las gráficas de temperatura media, máxima y mínima.

Por otro lado, se tiene un panel en el cual podemos observar una tabla cuyas filas se corresponden con las 11 regiones de los pies y cuyas columnas se corresponden con los cuatro parámetros extraídos en Celsius. En la tabla (Figura 59) se mostrarán los valores correspondientes a un solo *frame*, que podrá seleccionarse con el cuadro de texto editable que se puede ver en la Figura 60. El *frame* que se muestre se corresponderá con el pie seleccionado con anterioridad en el panel de selección de pie (Figura 39). Una vez realizadas las modificaciones pertinentes y visualizados los datos se pueden exportar en formato .xlsx al presionar sobre el botón “Exportar” (Figura 61).

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC



Figura 58. Selector de regiones para representar gráficamente los parámetros de temperatura

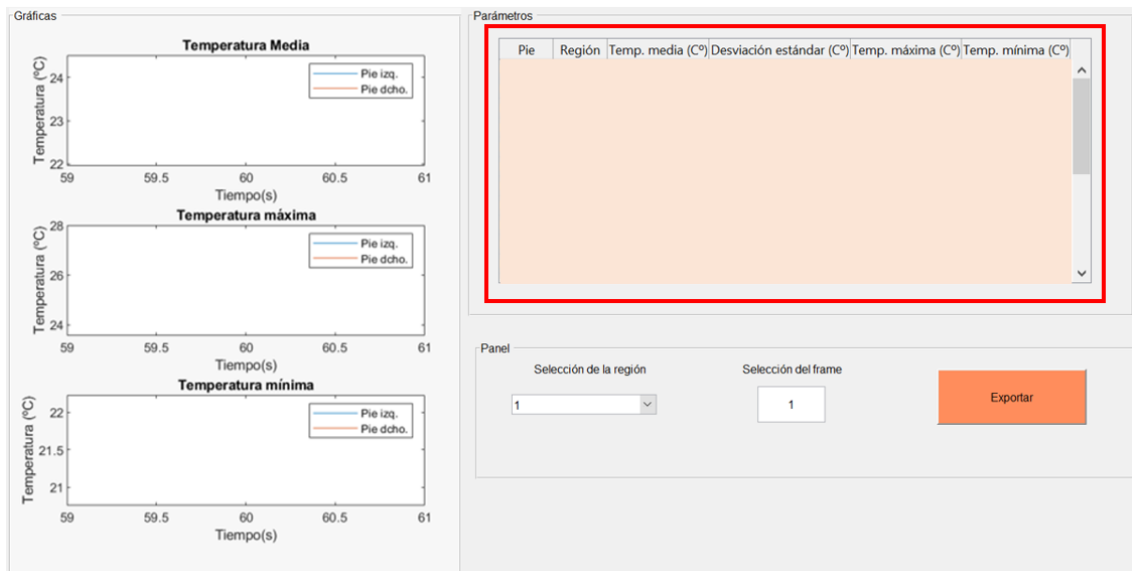


Figura 59. Tabla con los valores de temperatura media, desviación estándar, temperatura máxima y temperatura mínima en grados centígrados de todas las regiones de un *frame*

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

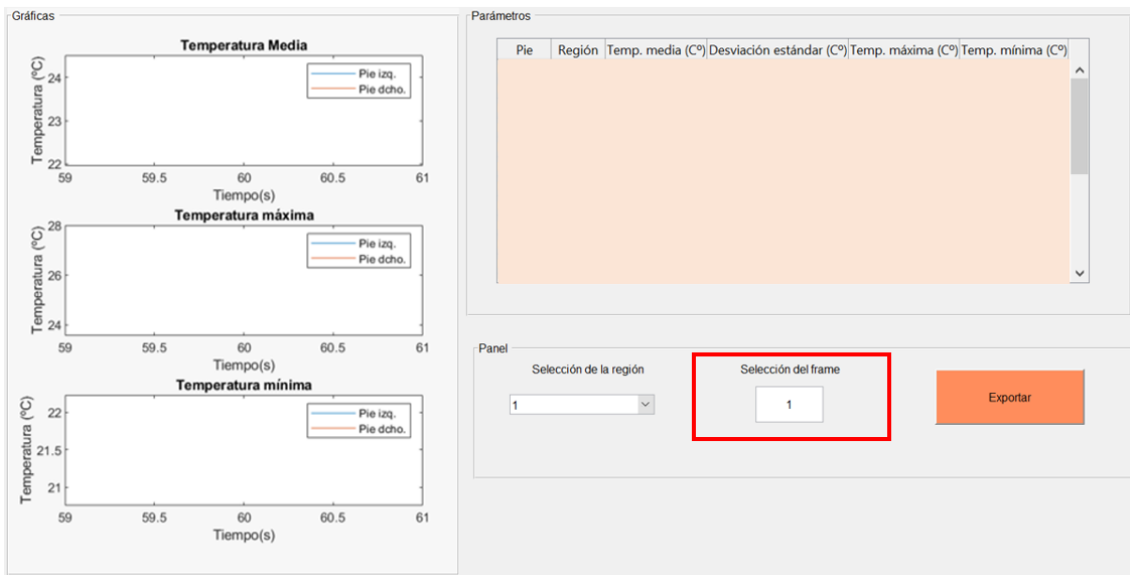


Figura 60. Selector del *frame* del que se quieren ver los datos de temperatura



Figura 61. Botón 'Exportar'. Este botón exporta los datos de temperatura a un documento de Excel

Los resultados se mostrarían tal y como se pueden ver en la Figura 62, la Figura 63 y la Figura 64. Se puede ver como las gráficas muestran los valores para una región concreta y ese valor se ve modificado en el tiempo. En la Figura 63 se puede ver como el eje de coordenadas x es diferente del de la Figura 64. Esto se debe a lo explicado anteriormente, se trata de los resultados obtenidos para dos modalidades diferentes en las cuales se han registrados datos en periodos diferentes de tiempo. En la Figura 63 el tiempo en desde que se registra un dato hasta que se registra otro es de 60 segundos, mientras que para la Figura 64 es de 10 segundos. Se puede ver, también, como en naranja se muestra el pie derecho y en azul el pie izquierdo. A simple vista se puede ver que en la Figura 63 es el pie derecho, pero para la Figura 64 es pronto para saberlo. Esto se debe a que en la modalidad 1 han transcurrido 15 minutos, mientras que en la modalidad 2 solo han transcurrido 3 minutos.

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

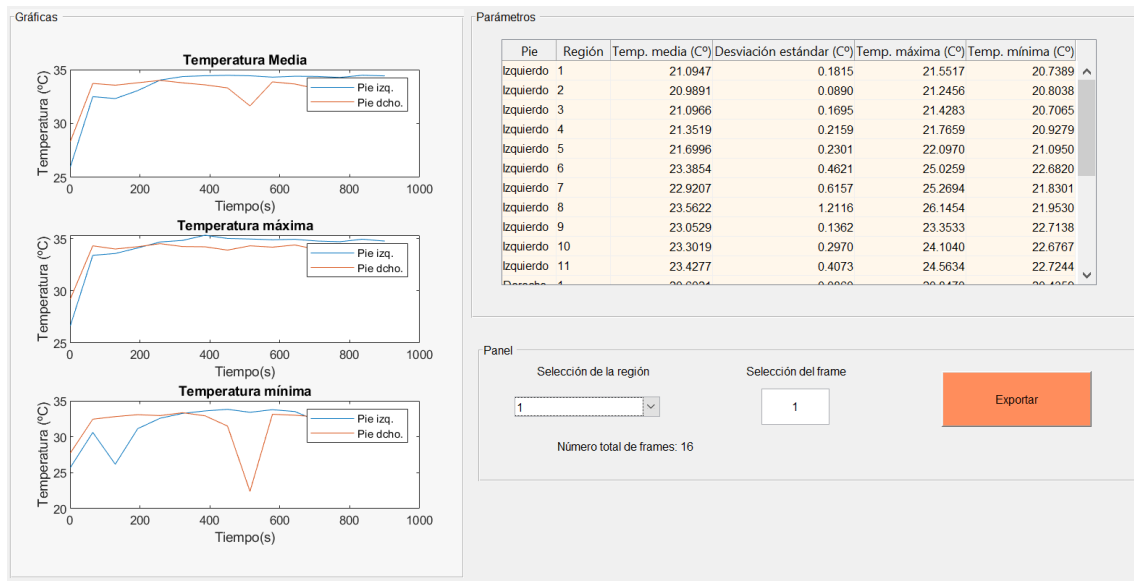


Figura 62. Visualización de los resultados obtenidos en el panel de gráficas y parámetros (región 1 y frame 1)

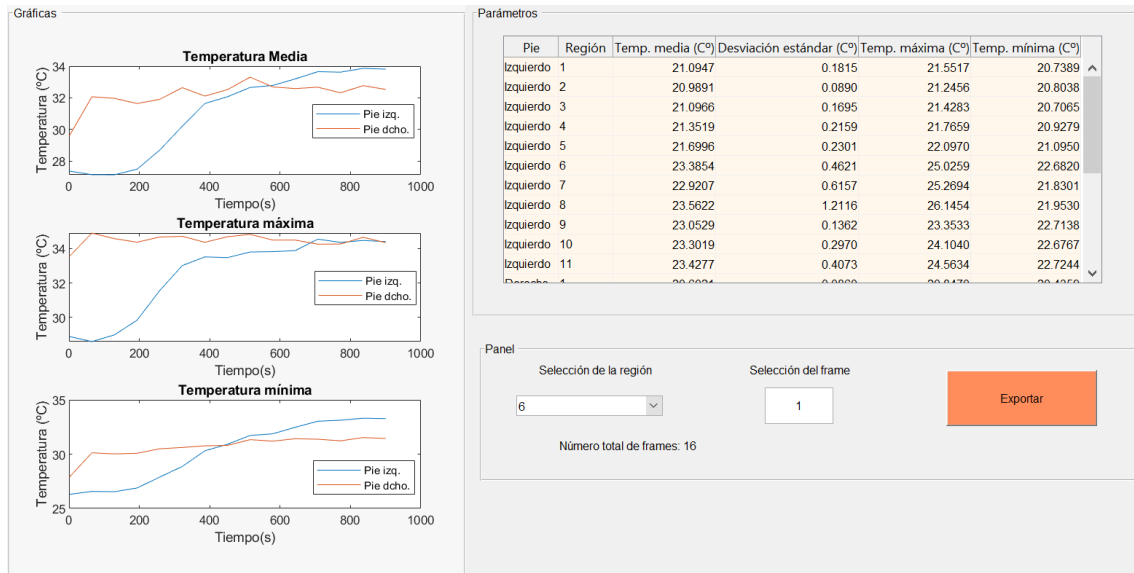


Figura 63. Resultados obtenidos en la cuantificación de imágenes IR (no secuencias)

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

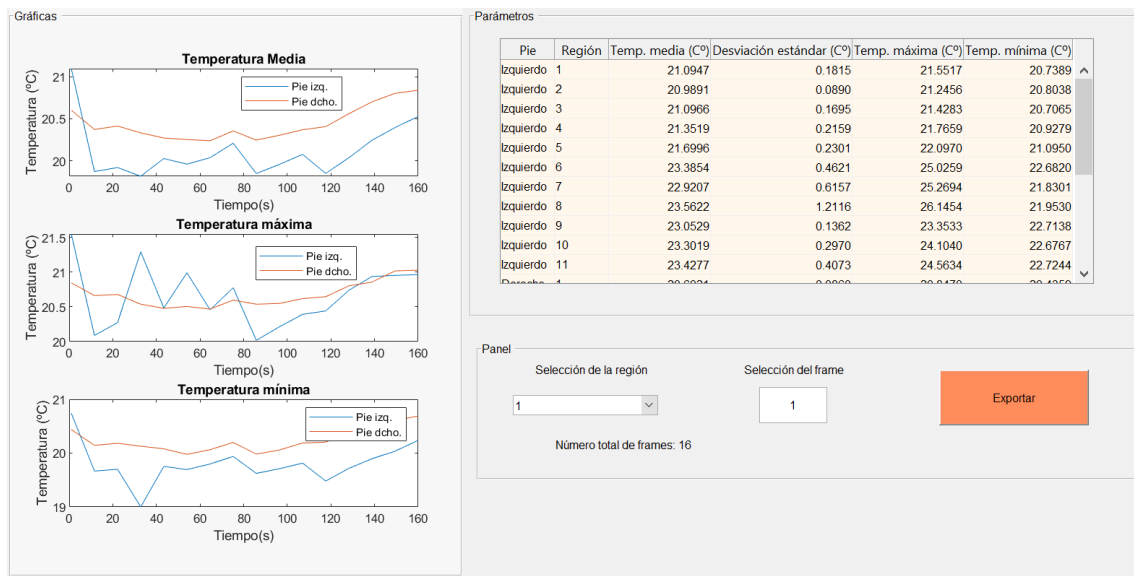


Figura 64. Resultados obtenidos en la cuantificación de secuencia

Los datos al final son exportados en formato .xlsx atendiendo a la plantilla que se muestra en la Figura 65. Los cuatro parámetros se almacenan en hojas de cálculo diferentes. Estas hojas de cálculo se rellenan teniendo en cuenta que las filas se corresponden con los diferentes instantes de tiempo, es decir, los *frames*, y las columnas las diferentes regiones. Por tanto, cada columna se corresponderá con la evolución en el tiempo de cada región.

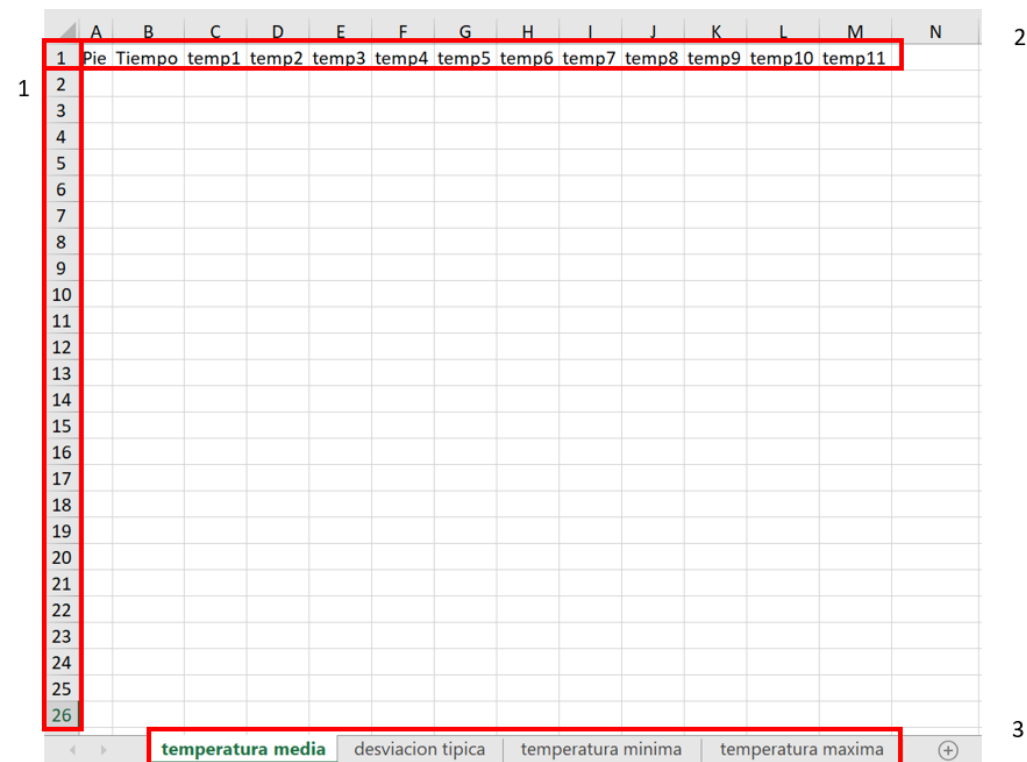


Figura 65. Formato del documento de Excel. (1) Las filas se corresponden con el marco temporal (cada imagen IR en segundos). (2) Las columnas se corresponden con las 11 regiones del pie, el instante temporal y el pie correspondiente(dcho. O izq.) (3) En cada hoja de cálculo se guarda cada uno de los parámetros adquiridos

5.1.3. Paneles de ayuda

1. Cuadro de ayuda durante la navegación

Con el objetivo de darle robustez a la interfaz se ha creado un cuadro de texto que genera diferentes mensajes durante la navegación (Figura 66). El objetivo es que el usuario sepa manejar la interfaz y optimizar su uso. En la Figura 67 se pueden ver dos ejemplos de mensaje que se generan al interactuar con las diferentes partes de la herramienta de cuantificación.

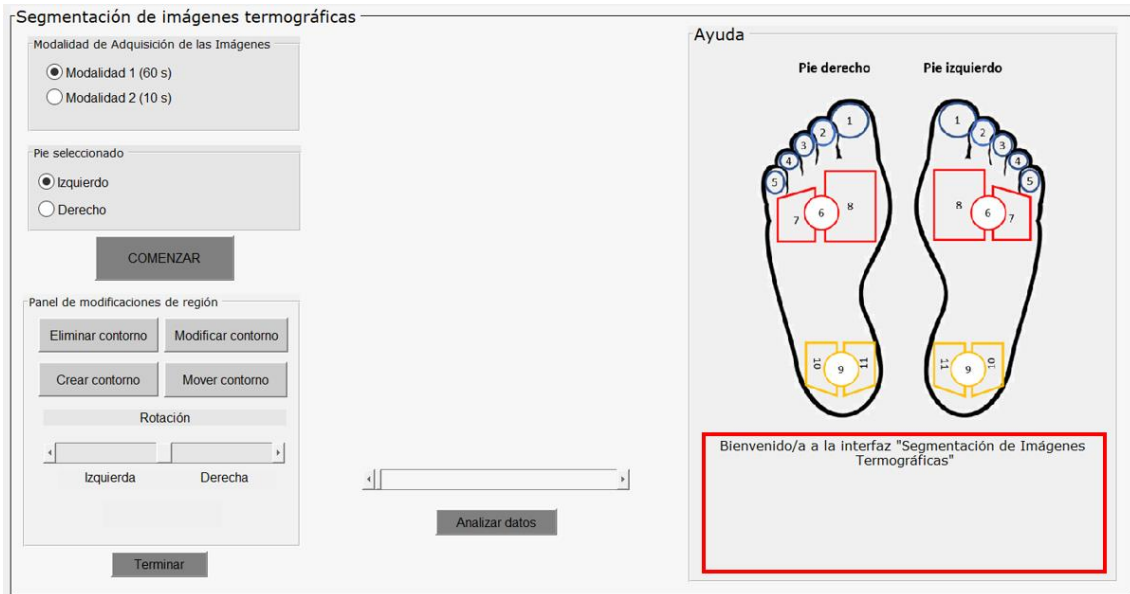


Figura 66. Cuadro de texto con recomendaciones acerca de la navegación para facilitar la interacción al usuario

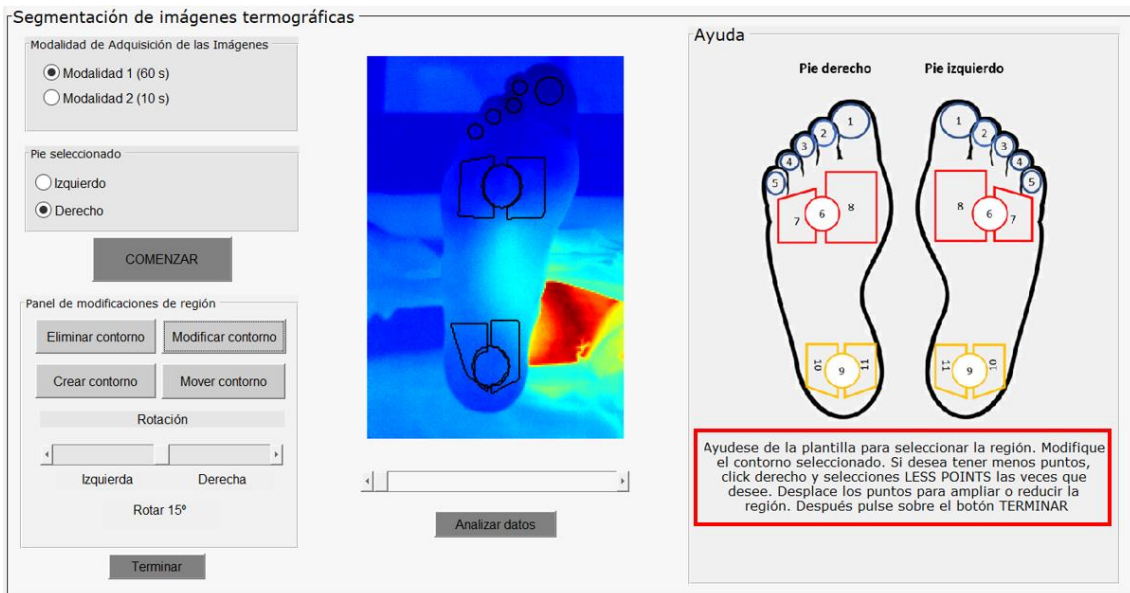


Figura 67. Ejemplo 1 de mensaje para facilitar la navegación tras la selección de uno de los pies

2. Guía de regiones

Puesto que cada región extraída tiene un número asignado para facilitar al usuario el conocimiento y localización de cada una de las regiones se ha creado un panel de ayuda que sirva de apoyo durante el proceso de cuantificación. Este panel cuenta con la imagen de las regiones de ambos pies y un cuadro de texto que explica como guardar las modificaciones de las regiones (Figura 68).

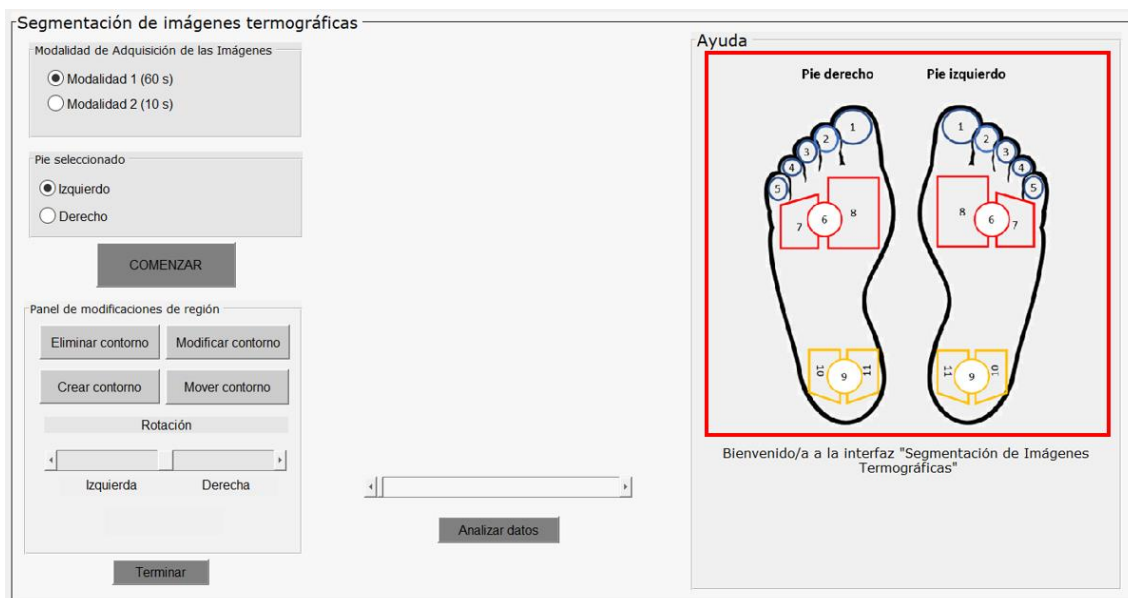


Figura 68. Plantilla de apoyo para ver la correspondencia de los nombres de las regiones con su localización en ambos pies

5.2. Resultados de cuantificación

A continuación, se van a mostrar los resultados de la cuantificación de tres sujetos correspondientes a un bloqueo fallido (no aumenta la temperatura), un bloqueo con aumento de temperatura en ambos pies y un bloqueo normal. Para entender el siguiente apartado es importante comentar que se cuenta con unos 10 sujetos a los cuales se les ha aplicado un tratamiento intervencionista del SDRC basado en el BSL con lidocaína que consta de 3 bloqueos espaciados en el tiempo.

5.2.1. Bloqueo fallido

El BSL número 3 del sujeto 3 fue fallido. Atendiendo a las imágenes de la Figura 69 en la cual según pasa el tiempo la temperatura de ambos pies (pie sano y pie enfermo no varía). Esto puede deberse a que a la hora de la realizar el BSL no se ha colocado la aguja en el punto exacto. Lo esperado en caso de realizarse correctamente el bloqueo es que la temperatura aumente. Esto se debe a que, al realizar el bloqueo simpático lumbar, los miembros inferiores que padecen el SDRC sufren una vasodilatación que se traduce en un aumento de la temperatura superficial de la planta del pie. Puesto que no se observan cambios en la distribución de temperatura, no se asume que haya funcionado el bloqueo simpático.

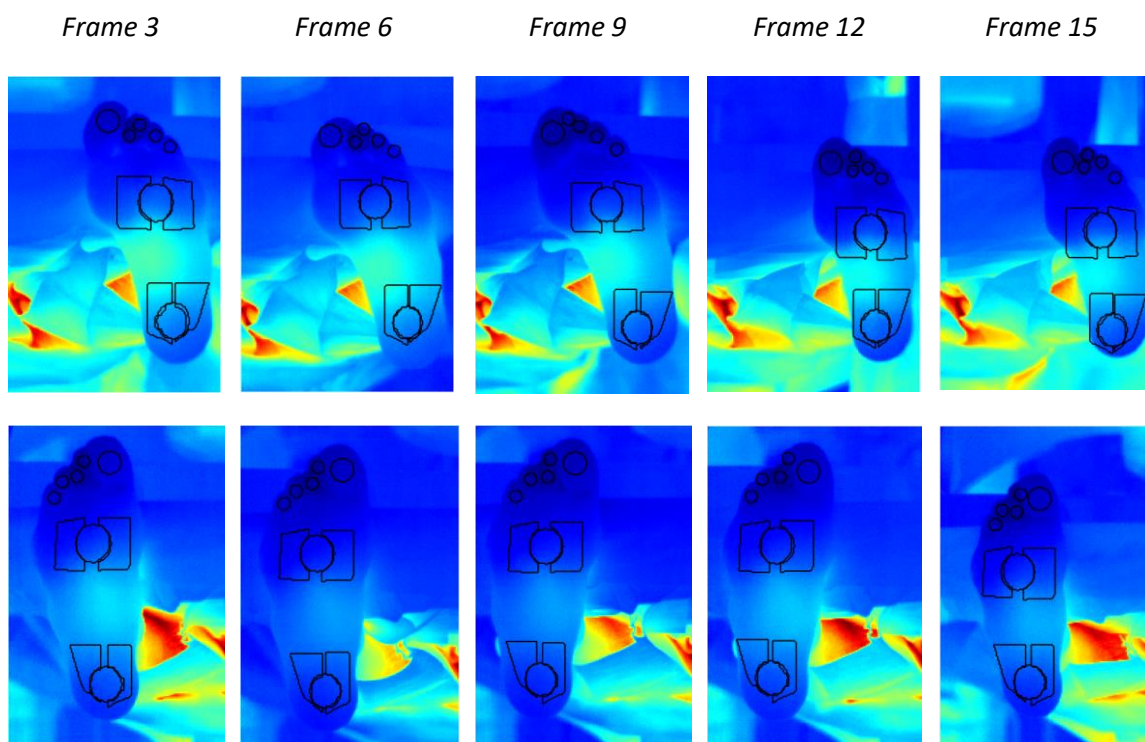


Figura 69. Secuencia del sujeto cuyo bloqueo ha sido fallido

Pero, para estar totalmente seguros de que efectivamente el BSL no se ha realizado correctamente se recurre a los datos extraídos del análisis por regiones. La Figura 70, la Figura 71 y la Figura 72 muestran las temperaturas medias de las 11 regiones extraídas de ambos pies proyectadas a lo largo de tiempo. Como se puede apreciar en las tres, las temperaturas oscilan siempre en torno a los mismos valores (20-21°C para los dedos de los pies, 21-23°C para la planta media y 22-24°C para la zona del talón). A pesar de las oscilaciones que evitan que las gráficas se correspondan con funciones lineales, las temperaturas no aumentan transcurridos 16 minutos desde la realización del BSL. Se asume que, tras ese tiempo el cual es suficiente para observar los efectos del bloqueo con lidocaína, el bloqueo no se ha realizado correctamente. A continuación, los pasos a seguir serían realizar un nuevo bloqueo recolocando la aguja de la punción lumbar en el caso de que sea la primera o segunda vez que se realiza, o se finalizaría la intervención en el caso de haber realizado más de dos bloqueos pues se puede poner en riesgo la salud y seguridad del paciente.

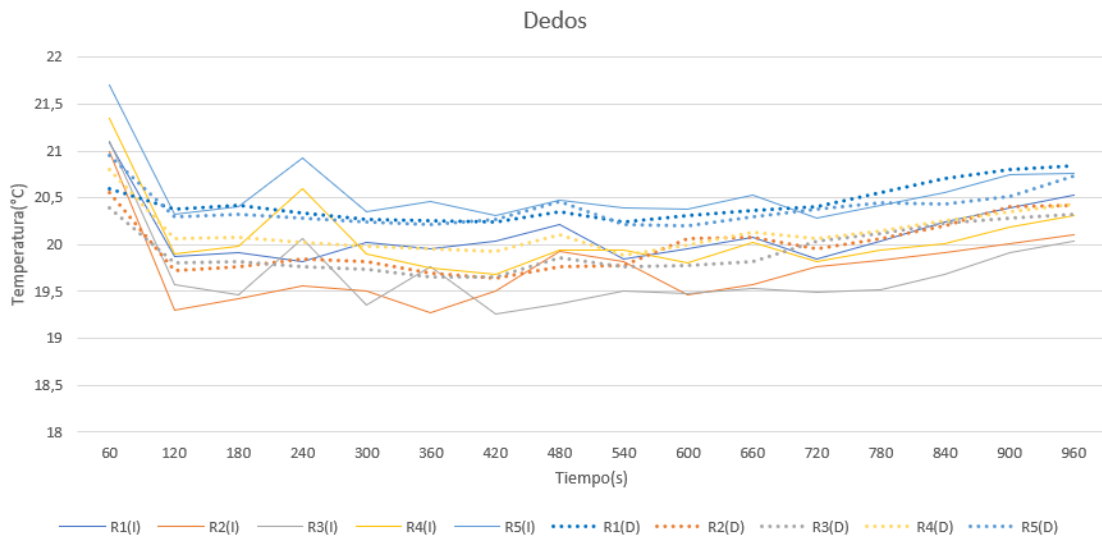


Figura 70. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de ambos pies

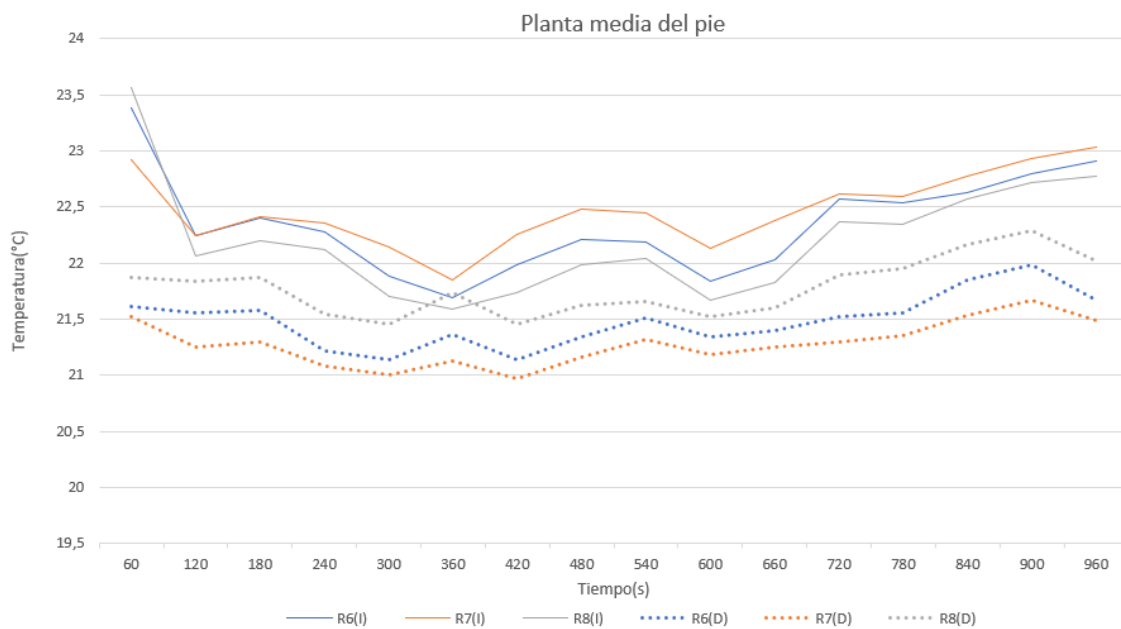


Figura 71. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona media plantar de ambos pies

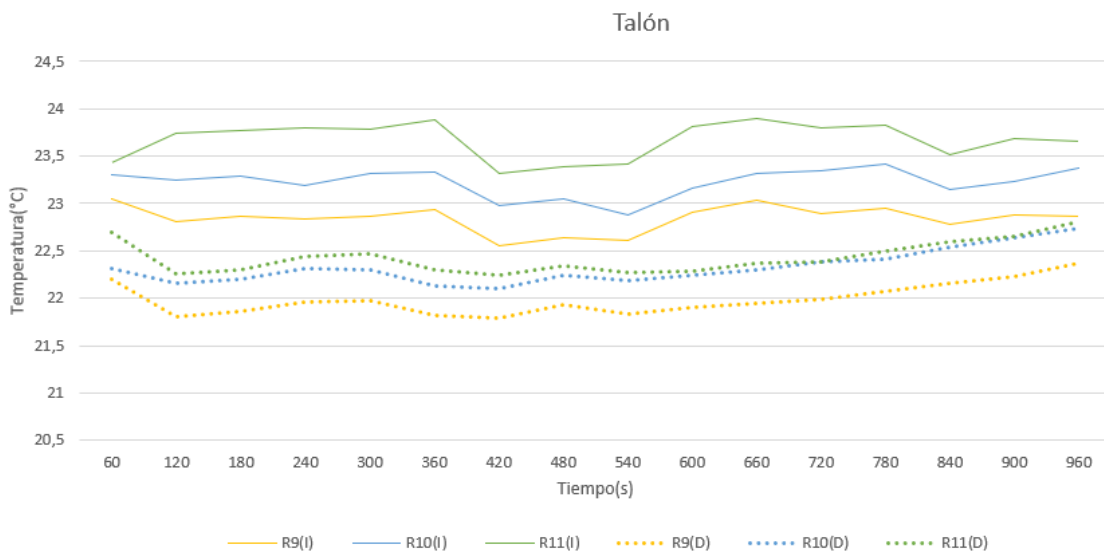


Figura 72. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona del talón de ambos pies

5.2.2. Aumento de temperatura del contralateral

En el bloqueo 2 del sujeto 7 se observa un fenómeno común dentro de los BSL, aumento de la temperatura del miembro sano aparte del afectado por el síndrome. Por lo que se ha observado y se conoce, esto puede deberse a que no sea el primer bloqueo que se realiza en el día, debido a que en el primero no pareciera que la temperatura aumentaba y haya mayor concentración de lidocaína, o bien un fenómeno fisiológico del que aún no se tiene constancia. Esto es bastante interesante, ya que con un número suficiente de sujetos que sufran este efecto de expansión del bloqueo al miembro, aparentemente sano, podrían observarse correlaciones con otros datos clínicos como intensidad del dolor, distrofia

, fase de la enfermedad o una posible expansión del SDRC al otro miembro.

En la Figura 73 se ve como la distribución de temperatura superficial del pie derecho aumenta y varía (miembro afectado) y como tras transcurrir unos minutos, comienza a variar la distribución de temperatura del miembro contralateral.

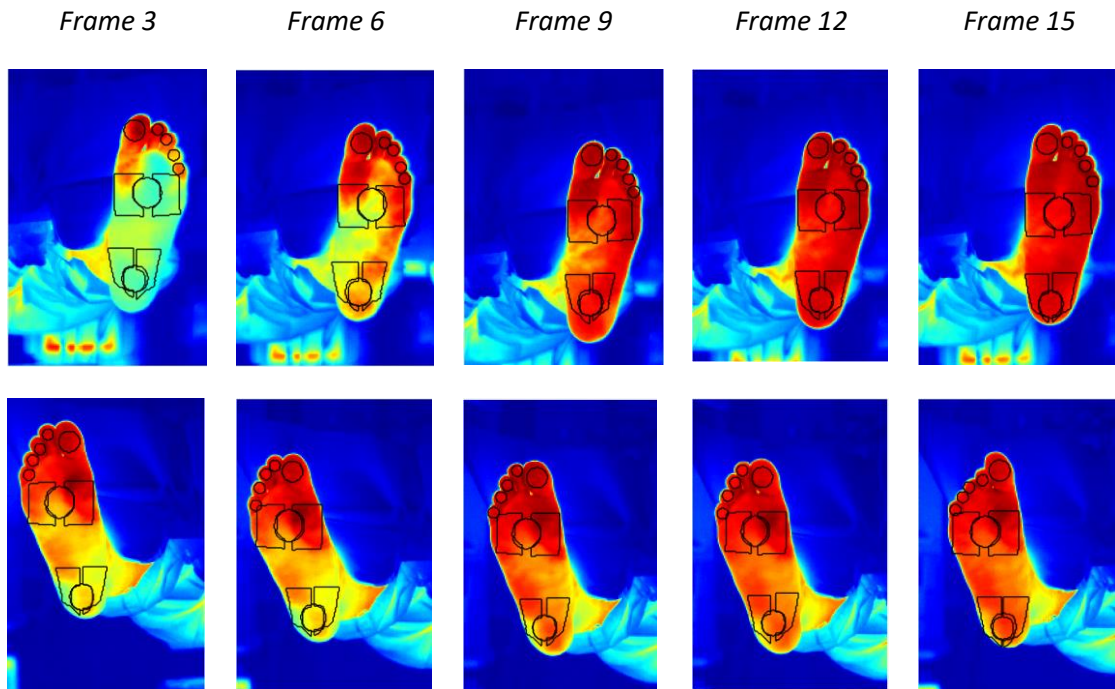


Figura 73. Secuencia del sujeto cuyo bloqueo a afectado a la temperatura de ambos miembros (miembro enfermo y contralateral)

Si se observan la Figura 74, la Figura 75 y la Figura 76 las temperaturas aumentan casi 10 grados en todas las regiones y que apenas hay diferencias a partir del minuto 5 entre ambos miembros. Las temperaturas han variado en ambas plantas d ellos pies. Como se puede ver la diferencia de temperatura entre ambos pies es menor en las regiones de los dedos de los pies y es mayor en el talón. Esto nos muestra, además de las imágenes, que el patrón de distribución y aumento de temperatura va desde los dedos de los pies hasta el talón, empezando a aumentar primero en el miembro afectado.

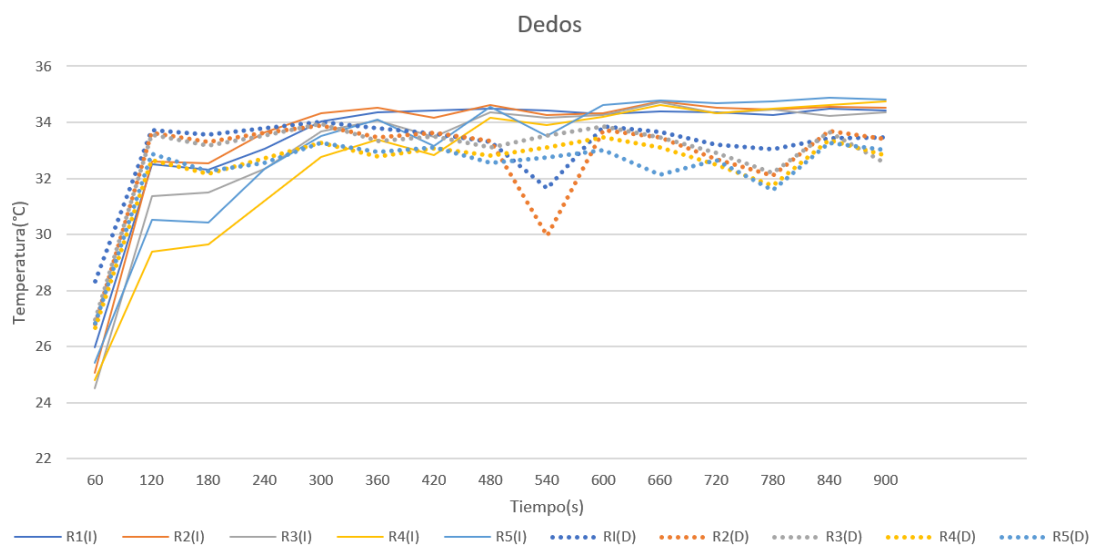


Figura 74. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de los dedos de ambos pies

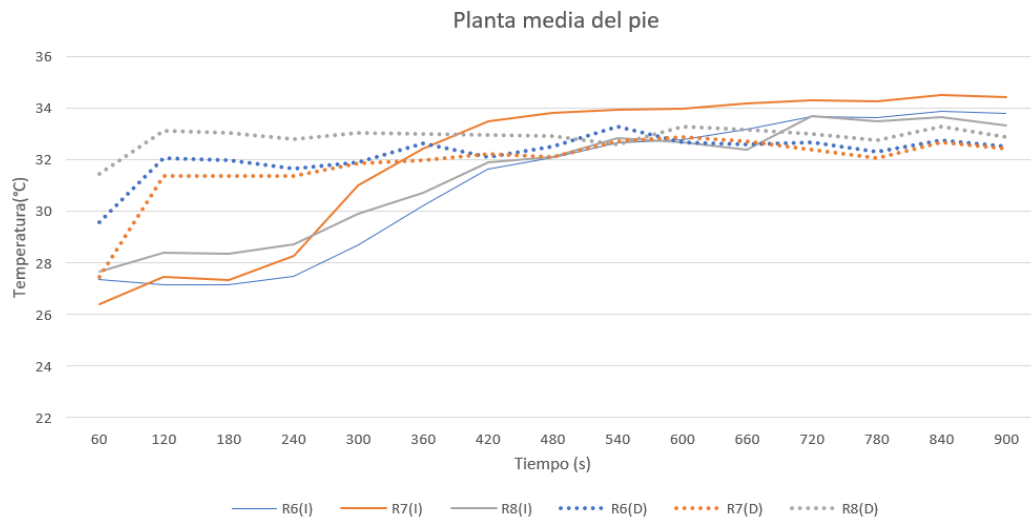


Figura 75. Gráficas correspondientes a las temperaturas medias de la zona media plantar de ambos pies

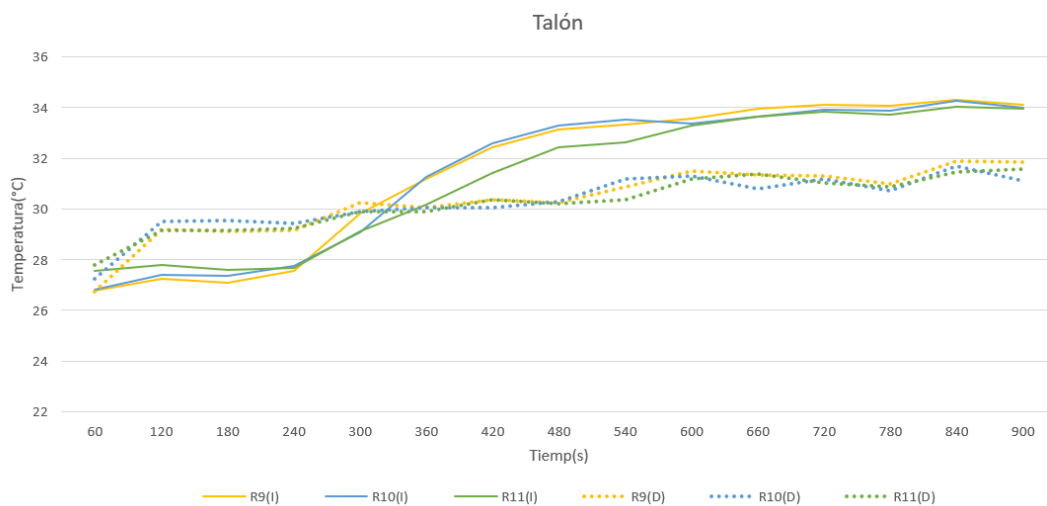


Figura 76. Gráficas correspondientes a las temperaturas medias de la zona del talón de ambos pies

5.2.3. BSL correcto sin aumento del miembro contralateral

En este tercer caso se ha analizado el bloqueo 2 del sujeto 10. Como se puede ver en la **Figura 77** se produce un aumento de la temperatura de la planta del pie izquierdo. No se trata de un aumento de temperatura demasiado grande ni se extiende por toda la planta, pero es suficiente para apreciar un aumento que permita suponer que el bloqueo simpático se ha realizado correctamente.

Si ahora se atiende a las gráficas de la Figura 78, la Figura 79 y la Figura 80, se pueden apreciar dos cosas. En primer lugar, la temperatura del pie derecho al comienzo es mayor y se mantiene durante toda la adquisición, mientras que el pie izquierdo (pie con SDRC) tiene una temperatura menor y a lo largo del tiempo aumenta localmente su temperatura en la zona del talón. En los dedos del pie derecho la temperatura es mayor durante todo el bloqueo, pero la diferencia con respecto al pie afectado es de apenas 1°C (criterios de Budapest). Esto

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

demuestra que el pie con la enfermedad, debido a los dolores que obligan a que el paciente no pueda mover el pie con suma libertad, la vascularización ha disminuido en comparación con el pie sano y, por tanto, la temperatura es menor.

La temperatura del pie derecho se mantiene durante la adquisición, enfriándose un poco a la mitad, pero retomando sus valores iniciales. Los valores rondan entre los 24-26 °C. Mientras que el pie izquierdo parte de los 23°C y se mantiene en 24°C.

Por último, es en la zona del talón en la que se aprecia la variación de temperatura. Aparentemente, si se hubiera seguido adquiriendo pasados los 15 minutos, es probable que se hubiera podido observar cómo ese aumento de temperatura sigue extendiéndose hacia las puntas de los dedos. Es en la cara interna del pie izquierdo donde el aumento de temperatura es considerablemente mayor, llegando a alcanzar los casi 27°C en las regiones 11 y 9.

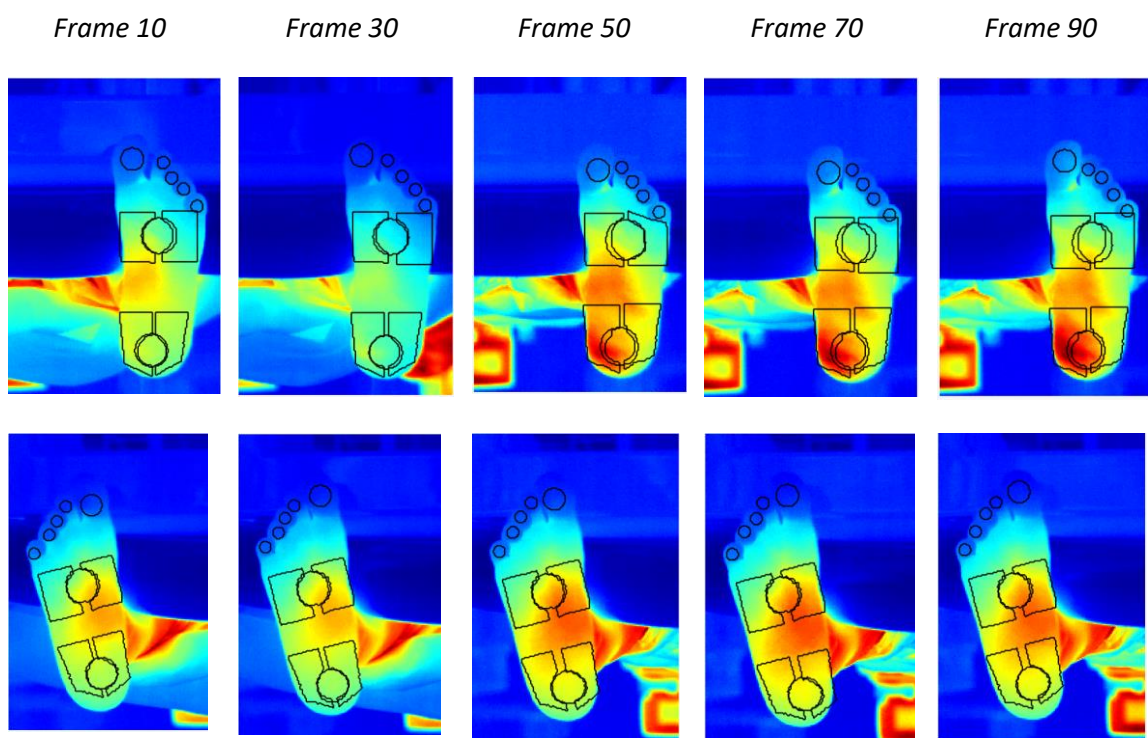


Figura 77. Secuencia del BSL con aumento normal de temperatura

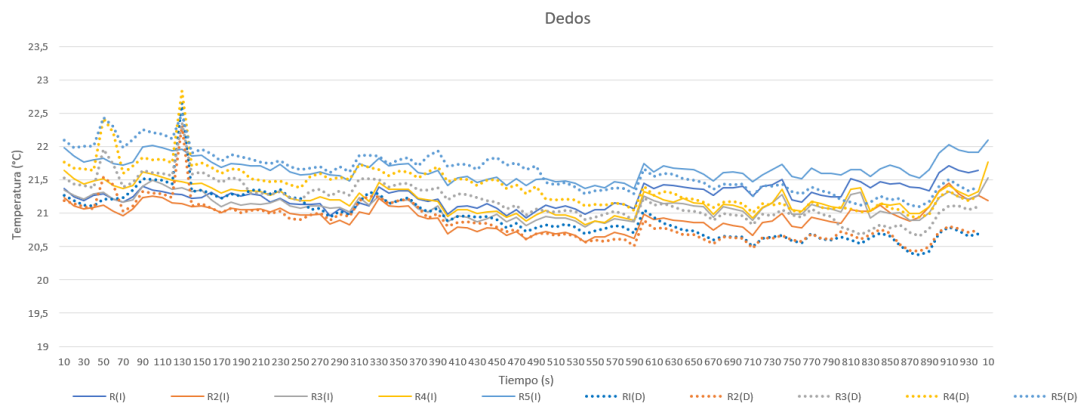


Figura 78. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de los dedos

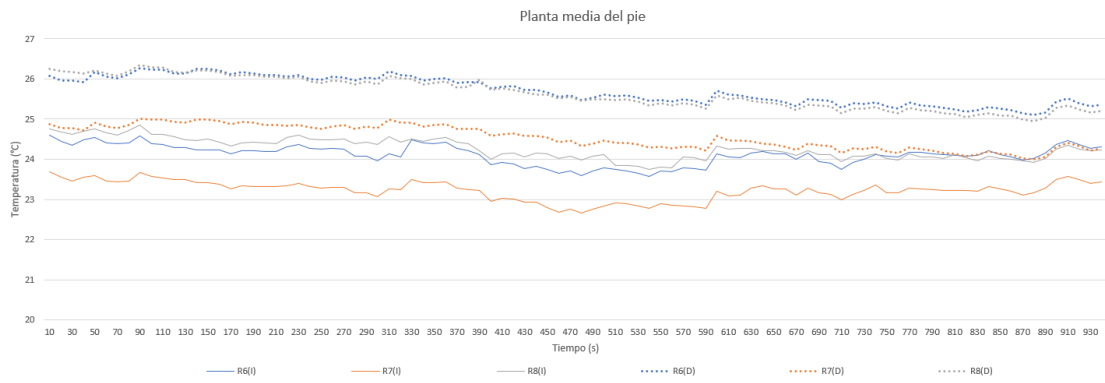


Figura 79. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias de la zona media de la planta del pie

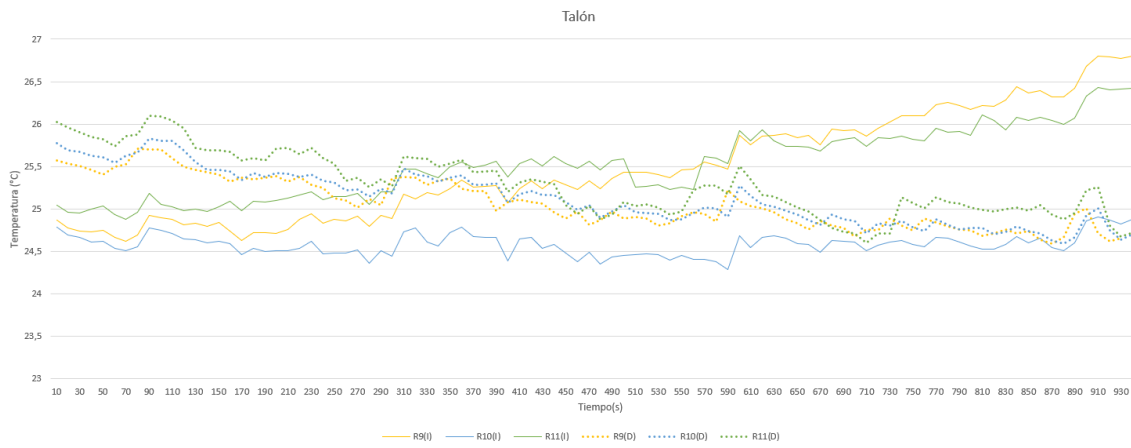


Figura 80. Gráfica correspondiente a las temperaturas medias del talón

El análisis de secuencias formadas por más de 50 frames suponen un coste computacional lo suficientemente alto como para invertir bastante más tiempo en el procesamiento de las imágenes IR. Ha ese tiempo de procesamiento, además, hay que añadirle el procesamiento manual (colocación de ROIs y visualización) de un mayor número de imágenes.

6. DISCUSIÓN

La termografía tiene una clara aplicación en el seguimiento de los bloqueos simpáticos lumbares, muy comunes en el tratamiento del SDRC. Los tratamientos de enfermedades de dolor neuropático, como el SDRC para este trabajo, necesitan de herramientas que aseguren la eficacia de éstos ya que los resultados no se aprecian inmediatamente, sino que tardan en observarse. Estas enfermedades, así como el SDRC, están sujetas a una gran subjetividad por parte del paciente, ya que como se ha comentado previamente en este documento, el diagnóstico y seguimiento de la enfermedad se basa en parámetros clínicos basados en la percepción del paciente.

Con el presente trabajo se ha permitido incorporar una dimensión cuantificable de los BSL, dando objetividad al seguimiento del tratamiento. La herramienta *software* desarrollada en este trabajo, cumple con los objetivos establecidos puesto que se permite, mediante la extracción de regiones en las plantas de los pies, el seguimiento de la distribución de temperatura superficial a lo largo del tiempo, tras el bloqueo simpático lumbar realizado.

La herramienta, además, permite realizar el análisis de numerosos pacientes, confiriendo repetitividad al proceso de adquisición y procesado de imagen IR. Esto es algo muy importante, ya que el poder aplicar la herramienta a multitud de sujetos permitirá en el futuro que, con una muestra lo suficientemente grande, se puedan establecer patrones de distribución térmica superficial y, a su vez, estos puedan relacionarse con características clínicas de los pacientes, como, por ejemplo: la duración de los síntomas, la intensidad del dolor o la fase del síndrome en la que se encuentre el paciente.

Además de la cumplimentación de los objetivos, el trabajo desarrollado presenta una serie de limitaciones que podrían ser trabajadas como líneas futuras. En primer lugar, no se han seguido protocolos de adecuación de la temperatura del paciente, o eliminación del fondo de la imagen, a la hora de adquirir las secuencias radiométricas. Esto supone una limitación a nivel de segmentación y extracción de regiones que dificulta el seguimiento de las temperaturas y aumenta la interacción del usuario con la herramienta. Al no existir una homogeneidad entre las adquisiciones, el algoritmo de extracción debe adecuarse para extrapolar las regiones a lo largo de la secuencia, habilitando las opciones de modificación para asegurar la posición de la región que se quiere analizar. A su vez, esto supondría que dentro de la misma secuencia las regiones no se localicen exactamente en las mismas posiciones, sufriendo variaciones correspondientes a un error humano al desplazarlas o modificarlas. Una solución sería el establecer un protocolo de adquisición en los que se incluyan la adecuación de la sala (temperatura y humedad) y la incorporación de un panel en color negro en los cuales puedan introducirse los pies, facilitando la diferenciación entre el objeto de interés (planta del pie) y el fondo. Otra posible solución puede ser la adquisición de imágenes anatómicas que aporten información estructural a la imagen funcional.

Por otro lado, la utilización de una serie de métodos de Matlab que permitían la creación de máscaras binarias, en las que se basa la extracción de regiones, modifican levemente la geometría de las regiones. Esto no influye notoriamente en los resultados, pero para aquellos sujetos en los cuales sea necesario realizar numerosas modificaciones si puede suponer un problema importante. El problema viene de que al principio y al final la geometría será tan diferente que puede producirse el solapamiento con otras regiones o expandirse a zonas que

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

no forman parte del análisis. Por esta razón, es tan importante la elaboración de un protocolo de adquisición que facilite la detección de la planta del pie y la extracción de regiones. La modificación de las normas a la hora adquirir las imágenes supondría una reducción de las modificaciones de las regiones y una casi total automatización. Además, la elaboración de un protocolo que permita la automatización de los procesos de extracción y recolocación de ROI reduciría considerablemente los tiempos de procesado, eliminaría la necesidad de realizar modificaciones extras para evitar errores debidos a píxeles de fondo. Se podría analizar secuencias mucho más largas de manera más eficiente y sencilla.

7. CONCLUSIONES

En conclusión, el presente trabajo de fin de máster ha servido para el desarrollo de una herramienta de cuantificación de secuencias radiométricas de pacientes con SDRC. La aplicación directa de la herramienta ha sido claramente demostrada, pues se ha aportado una nueva dimensión cuantitativa y objetiva a unas secuencias imágenes funcionales y a una serie de percepciones subjetivas aportadas por los pacientes.

La herramienta cumple con los requisitos y con objetivos propuestos al inicio del trabajo. Se ha elaborado un protocolo de adquisición de secuencias TIR para el tratamiento del SDRC. Se ha desarrollado una herramienta *software* que permite cuantificar dichas secuencias TIR adquiridas, haciendo objetivo y reproducible el tratamiento del SDRC, que como se ha mencionado varias veces permite comprobar que es efectivo sin necesidad de esperar demasiado tiempo antes de saber si ha servido o no. Esta herramienta se ha aplicado a los 3 bloqueos simpáticos lumbares de 10 sujetos y se ha podido observar su capacidad de extracción de regiones y de análisis de temperatura para determinar la eficacia del tratamiento. Además, se ha podido comprobar su usabilidad y robustez, validándolo con la persona encargada de la adquisición de las imágenes TIR y que utilizará la herramienta en un futuro.

8. LÍNEAS FUTURAS

Puesto que el trabajo de fin de máster realizado es el desarrollo inicial de una herramienta *software* de cuantificación de secuenciar TIR en el tratamiento del SDRC y que se ha probado su funcionalidad con diferentes sujetos, tras analizar los resultados se propone a continuación una serie de futuras mejoras:

- Adquisición de las secuencias sin fondo o con una adecuación térmica previa de la sala de adquisición. Esto facilitaría la extracción de regiones sin necesidad de realizar modificaciones a lo largo de la secuencia porque se extraerían *frame a frame*, adaptándose automáticamente a cada una de las imágenes que conforman la secuencia.
- Creación de una muestra de sujetos y bloqueos más amplia. La ampliación del número de sujetos permitiría analizar patrones de distribución de temperatura, asociándolos con datos clínicos concretos, tales como la intensidad de dolor o la duración de los síntomas. Este tipo de estudios serviría para sentar precedentes, conocer más a fondo la relación existente entre el sistema nervioso simpático y el miembro afectado por el síndrome.
- Ampliación en el seguimiento del tratamiento. El seguimiento más exhaustivo de los pacientes, realizando mayor número de bloqueos, comparando las distribuciones de temperatura conforma se avanza con el tratamiento podría servir para relacionar la efectividad del tratamiento con la temperatura. Es decir: si los bloqueos implican un aumento de temperatura en el miembro afectado, que supone que a una persona que lleva varios meses de bloqueos siga aumentando su temperatura o deje de aumentar como el primer día. Se trata de realizar una comparativa en el tiempo entre bloqueos para corroborar dichos efectos del BSL.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. N. Harden *et al.*, “Complex regional pain syndrome: Practical diagnostic and treatment guidelines, 4th edition,” *Pain Med. (United States)*, vol. 14, no. 2, pp. 180–229, 2013, doi: 10.1111/pme.12033.
- [2] L. Pérez-Garrido, L. Gómez-Lechón, G. Manzano-Canabal, O. M. González, A. T. Nieves, and J. del Pino-Montes, “Complex regional pain syndrome,” *Med.*, vol. 12, no. 60, pp. 3524–3532, 2018, doi: 10.1016/j.med.2018.06.021.
- [3] E. Márquez Martínez *et al.*, “Síndrome de dolor regional complejo,” *Semin. la Fund. Esp. Reumatol.*, vol. 13, no. 1, pp. 31–36, 2012, doi: 10.1016/j.semreu.2011.10.005.
- [4] B. C. Hernández-Porras, R. Plancarte-Sánchez, S. Alarcón-Barrios, and M. Sámano-García, “Síndrome doloroso regional complejo: revisión,” *Cir. y Cir. (English Ed.)*, vol. 85, no. 4, pp. 366–374, 2017, doi: 10.1016/j.circir.2016.11.004.
- [5] F. Neira and J. L. Ortega, “El síndrome doloroso regional complejo y medicina basada en la evidencia,” *Rev. la Soc. Esp. del Dolor*, vol. 14, no. 2, pp. 133–146, 2007.
- [6] R. F. Rodríguez and A. M. Á. Isaza, “Complex regional pain syndrome,” *Rev. Colomb. Anestesiol.*, vol. 39, no. 1, pp. 71–83, 2011, doi: 10.5554/rca.v39i1.54.
- [7] J. M. G. Mesa *et al.*, “Bloqueo simpático lumbar,” vol. 20, no. 6, pp. 324–331, 2013.
- [8] K. I. Paraskevas, A. A. Michaloglou, D. D. Briana, and M. Samara, “Treatment of complex regional pain syndrome type I of the hand with a series of intravenous regional sympathetic blocks with guanethidine and lidocaine,” *Clin. Rheumatol.*, vol. 25, no. 5, pp. 687–693, 2006, doi: 10.1007/s10067-005-0122-0.
- [9] S. Flores Larsen and M. Hongn, “Impreso en la Argentina,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 16, pp. 25–32, 2012, [Online]. Available: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/14563/CONICET_Digital_Nro.17944.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [10] E. Hidalgo Salvador, F. Álvarez González, and A. Salvador Luna, “Aplicación de la termografía infrarroja en medicina legal . ¿ Prueba válida para la objetivación de los síndromes dolorosos ? Disfunción temporomandibular Application of Infrared thermography in legal medicine . Is it a valid test for an objective assessm,” *Cuad Med Forense*, vol. 20, pp. 77–84, 2014.
- [11] F. I. de Prada Pérez de Azpeitia, “La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química,” *Rev. Eureka sobre enseñanza y Divulg. las ciencias.*, vol. 1, no. 3, pp. 617–627, 2016, doi: 10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i3.08.
- [12] T. M. Library, F. Reuven, and E. Pride, *T He R Ed.* 1830.
- [13] M. Etehadtavakol and E. Y. K. Ng, *Application of Infrared to Biomedical Sciences.* 2017.
- [14] E. F. J. Ring and K. Ammer, “Infrared thermal imaging in medicine,” *Physiol. Meas.*, vol. 33, no. 3, 2012, doi: 10.1088/0967-3334/33/3/R33.
- [15] M. Etehadtavakol, Z. Emrani, and E. Y. K. Ng, “Rapid extraction of the hottest or coldest regions of medical thermographic images,” *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 57, no. 2, pp. 379–388, 2019, doi: 10.1007/s11517-018-1876-2.
- [16] FLIR Systems, “ResearchIR 4 User Guide,” 2018.
- [17] C. W. Cho *et al.*, “Multicenter study on the asymmetry of skin temperature in complex regional pain syndrome: An examination of temperature distribution and symptom

- duration,” *Med. (United States)*, vol. 95, no. 52, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1097/MD.0000000000005548.
- [18] FLIR Systems Inc., “Technical Data FLIR E60,” vol. 60, no. of 4, 2014, [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1371/0900766b8137184a.pdf>.
- [19] “FLIR Tools | FLIR Systems.” <https://www.flir.es/products/flir-tools/> (accessed Nov. 25, 2020).
- [20] “ThermaCAM Researcher Pro Descargar la versión gratuita (Research.exe).” <https://thermacam-researcher-pro.software.informer.com/> (accessed Nov. 25, 2020).
- [21] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink.” <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Nov. 25, 2020).
- [22] P. I. D. Tema, “Tema 5 : Morfología Primera parte Morfología.”
- [23] J. Gauci *et al.*, “Automated Region Extraction from Thermal Images for Peripheral Vascular Disease Monitoring,” *J. Healthc. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5092064.
- [24] “pencilROI - Intercambio de archivos - MATLAB Central.” <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50567-pencilroi> (accessed Nov. 25, 2020).

PRESUPUESTO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

1. OBJETIVOS DEL PRESUPUESTO

El objetivo del presupuesto del presente Trabajo de Fin de Máster es la estimación del coste que ha supuesto su desarrollo. Para ello se han tenido en cuenta los costes humanos y de personal, junto con los relativos a los recursos materiales empleados para llevarlo a cabo.

En primer lugar, se muestra el presupuesto estimado para poder llevar a cabo el proyecto. Este presupuesto fue estimado al principio del trabajo una vez los objetivos y recursos disponibles fueron definidos. Después, se muestra el presupuesto final teniendo en cuenta el número de horas finalmente empleado y los recursos que en primera instancia no se tuvieron en cuenta y fueron necesarios según demandaba el desarrollo del proyecto.

Un aspecto muy importante y a tener en cuenta es la inversión personal realizada por parte del alumno y los tutores, los cuales han invertido su tiempo y conocimientos en la realización de este proyecto, convirtiéndose en el recurso principal.

2. PRESUPUESTO ESTIMADO

Al inicio del proyecto se hizo una estimación de las horas necesarias que deberían emplearse para sacar el proyecto adelante y de los recursos necesarios para desarrollarlo. Se llegó a la conclusión de que teniendo en cuenta las labores de redacción, investigación, desarrollo de la interfaz y adquisición de las imágenes, iba a ser necesaria una colaboración entre varias personas. En primer lugar, un médico que realice los BSL para adquirir las imágenes necesarias para el análisis. En segundo lugar, la colaboración de los tutores que aportan su experiencia y conocimientos al alumno para orientarle en lo necesario en todo el proceso de elaboración. Y, por último, el alumno que se encargue de las tareas de desarrollo y redacción en las que se reflejen los procesos llevados a cabo y los resultados obtenidos (Tabla 7).

Tabla 7. Presupuesto estimado del personal (Elaboración propia)

Personal	Coste (€/h)	Tiempo(h)	Coste total(€)
Médico	40	3	120,00
Ingeniero de telecomunicaciones	40	30	1.200,00
Ingeniero industrial	40	30	1.200,00
Ingeniero biomédico	40	500	20.000 ,00

A parte de los costes de personal, existen una serie de costes relativos a la infraestructura y los materiales necesarios para elaboración del trabajo. En primera instancia, era necesario el uso de una cámara termográfica. Para este trabajo se utilizó la cámara E60. Además, para el posterior análisis y desarrollo de la aplicación de cuantificación se tuvo en cuenta la necesidad de un ordenador. Con respecto a los materiales no físicos, es decir, los *softwares*, se estimó la utilización de Matlab 2019b (versión en el momento del establecimiento de los objetivos), y una serie de *softwares* relacionados con la visualización de imágenes termográficas (ThermaCAM Researcher y FLIR Tools) (Tabla 8 y Tabla 9).

Tabla 8. Presupuesto estimado de los materiales físicos (Elaboración propia)

Descripción	Coste computable (sin IVA)	Periodo de amortización (años)	Periodo de uso (meses)	Coste para el proyecto (€)	IVA (21%)	Coste final (€)
Ordenador portátil HP Pavilion	1.199	5	9	179,85	37,77	217,62
Cámara IR E60	3.679,2	5	9	551,88	115,89	667,77

Tabla 9. Presupuesto estimado de los materiales no físicos (Elaboración propia)

Descripción	Coste computable (sin IVA)	Periodo de amortización (años)	Periodo de uso (meses)	Coste para el proyecto (€)	IVA (21%)	Coste total (€)
Matlab 2019b	2000	2	9	750,00	157,50	907,50
ThermaCAM Researcher	Gratis	-	-	-	-	-
FLIR Tools	Gratis	-	-	-	-	-
Paquete Office	149	2	9	55,87	11,73	67,60

Finalmente, el coste total estimado para la realización del proyecto fue (Tabla 10):

Tabla 10. Presupuesto estimado total (Elaboración propia)

Recurso	Precio (€)
Personal	22.500,00
Materiales físicos	885,39
Materiales no físicos	975,10
Total	25.360,49

3. PRESUPUESTO FINAL

Tras el desarrollo del proyecto, la contabilización de las horas empleadas junto a los recursos empleados para desarrollarlo, se revisan las tablas de presupuesto estimado, llegando a las siguientes conclusiones. El tiempo empleado para el desarrollo empleado al final fue mayor del que se tenía pensado, lo que supone un aumento en los costes de personal (Tabla 11). El material físico y no físico fue el mismo y se empleó durante el tiempo que se tenía pensado, por lo que esos valores se mantienen (Tabla 12 y Tabla 13).

Tabla 11. Presupuesto final del personal (Elaboración propia)

Personal	Coste (€/h)	Tiempo(h)	Coste total(€)
Médico	40	3	120,00
Ingeniero de telecomunicaciones	40	40	1.600,00
Ingeniero industrial	40	40	1.600,00
Ingeniero biomédico	40	600	24.000,00

Tabla 12. Presupuesto final de los materiales físicos (Elaboración propia)

Descripción	Coste computable (sin IVA)	Periodo de amortización (años)	Periodo de uso (meses)	Coste para el proyecto (€)	IVA (21%)	Coste final (€)
Ordenador portátil HP Pavilion	1.199	5	9	179,85	37,77	217,62
Cámara IR E60	3.679,2	5	9	551,88	115,89	667,77

Tabla 13. Presupuesto final de los materiales no físicos

Descripción	Coste computable (sin IVA)	Periodo de amortización (años)	Periodo de uso (meses)	Coste para el proyecto (€)	IVA (21%)	Coste total (€)
Matlab 2019b	2000	2	9	750,00	157,50	907,50
ThermaCAM Researcher	Gratis	-	-	-	-	-

Desarrollo de una herramienta software para la cuantificación de secuencias de vídeo e imágenes de termografía infrarroja en el diagnóstico y seguimiento del SDRC

FLIR Tools	Gratis	-	-	-	-	-
Paquete Office	149	2	9	55,87	11,73	67,6

El coste final para la elaboración del proyecto fue (Tabla 14):

Tabla 14. Presupuesto final del proyecto (Elaboración propia)

Recurso	Precio (€)
Personal	27.320,00
Materiales físicos	885,39
Materiales no físicos	975,10
Total	29.180,49