

**ANÁLISIS DE DINÁMICA TÉRMICA EN LAS PALMAS DE LAS MANOS  
USANDO TERMOGRAFÍA PASIVA Y ACTIVA – ESTUDIO PILOTO**

*Laura Loaiza Palacio*

*Jhoiner Javier Sáenz Ramírez*

*Proyecto de grado presentado para optar al título de Ingenieros Físicos*

*Director*

*Ing. Jenniffer Bustamante Mejía – M. Sc.*

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA**

**PEREIRA**

**2018**

*Dedicatorias Laura*

*Dedico este trabajo de grado a la vida por brindarme la grata oportunidad de realizar mis estudios universitarios sin mayores tropiezos, por darme las herramientas necesarias para llevar a cabo esta parte de mis metas académicas.*

*A mis padres, quienes me han brindado su apoyo incondicional en mi formación académica y personal, con su entrega y amor.*

*Quiero hacer un agradecimiento y dedicatoria especial a mi padre Humberto Loaiza, quien fue la persona que me inculcó el interés por la física y la ciencia desde muy temprana edad, él es mi mayor fuente de admiración, inspiración y orgullo. Por entregarme su mayor energía cuando me aporta sus preciados conocimientos.*

*A mi madre Olga Helena Palacio, por brindarme su ayuda y apoyo incondicional en cada paso que he dado en mi formación académica y personal, por su deseo de verme salir adelante en cada momento, por sus sacrificios y por los valores que me inculcó para la vida.*

*A mis hermanos Alejandro Loaiza y Lina Loaiza por ser mi refugio incondicional y mi impulso para salir adelante, por regalarme siempre momentos valiosos.*

*Dedicatorias Javier*

*Dedicado primeramente a mis padres Marina y Dimas, por su increíble esfuerzo, apoyo y dedicación por verme crecer personal y profesionalmente, además de ser la mayor de las fuentes de motivación y amor.*

*A mis hermanos por estar siempre conmigo y celebrar cada uno de mis triunfos como propios.*

*A cada uno de los amigos que han estado durante todo mi proceso de formación dentro y fuera de la universidad, que además de alegrar cada uno de los momentos difíciles, se han convertido en mi familia lejos de casa.*

## *Agradecimientos.*

*A nuestros profesores por todos las lecciones y conocimientos que nos aportaron durante nuestra formación universitaria, por cambiar nuestra perspectiva sobre el entorno y sobre la vida misma, por su intención de formar más que profesionales, personas valiosas, también agradecemos porque han sido una gran fuente de inspiración y admiración.*

*A nuestra directora de trabajo de grado Jenniffer Bustamante por dedicarnos su valioso tiempo, por apoyarnos incondicionalmente en la realización de este trabajo, por todos los aportes constructivos que nos ha brindado y por estar siempre dispuesta a dar lo mejor de sí misma.*

*A nuestros compañeros por las grandes lecciones que sembraron, por la compañía que brindaron durante esta etapa, por todo el intercambio de conocimientos y por los gratos momentos que quedan guardados en nuestra memoria. Agradecemos también a todos las personas que contribuyeron en la toma de datos.*

*Al grupo de Electrofisiología UTP por aportarnos el apoyo, las herramientas, el espacio y la formación en investigación necesaria para la realización de este proyecto.*

*Al Grupo de Investigación Propiedades magnéticas y magento-ópticas de nuevos materiales. (GIMM) por poner a nuestra disposición las herramientas necesarias para la adquisición de datos.*

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. OBJETIVOS .....	7
2.1. Objetivo General .....	7
2.2. Objetivos específicos:.....	7
3. ESTADO DEL ARTE .....	8
4. MARCO TEÓRICO .....	11
4.1. Espectro Electromagnético .....	11
4.2. Radiación de cuerpo negro .....	11
4.3. Función de distribución de emisión de Planck.....	13
4.4. Emisividad.....	13
4.5. Ley de Stefan-Boltzmann .....	13
4.6. Emisión de banda: .....	14
4.7. Clasificación de objetos de acuerdo a su emisividad: .....	15
4.8. Parámetros que afectan el valor de emisividad .....	15
4.8.1. El material .....	16
4.8.2. La superficie .....	16
4.8.3. Ángulo de visión.....	16
4.8.4. Longitud de onda:.....	16
4.8.5. Geometría .....	16
4.8.6. La temperatura del medio .....	17
4.9. Propiedades térmicas de los materiales.....	17
4.9.1. Conducción.....	17
4.9.2. Convección.....	18
4.9.3. Radiación.....	19
4.10. Imágenes térmicas .....	19
4.11. Funcionamiento de una cámara termográfica .....	20
4.12. Termografía activa.....	20
4.13. Termografía pasiva .....	20
4.14. Anatomía de la mano .....	20
4.14.1. La muñeca .....	21
4.14.2. Musculatura de la mano .....	22
4.14.3. Músculos interóseos dorsales: .....	23
4.14.4. Interóseos Palmares .....	23
4.14.5. Músculos lumbricales .....	24

4.14.6. Arquitectura de la mano.....	24
5. MÉTODOS: .....	25
5.1. Elección del estímulo externo.....	25
5.2. Adquisición de imágenes.....	26
5.3. Procesamiento de imágenes.....	26
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES: .....	28
6.1. Implementación del protocolo experimental.....	28
6.2. Procesamiento de imágenes.....	30
6.3. Estimación de la Incertidumbre expandida de la temperatura promedio para cada región. 31	
6.4. Curvas de enfriamiento.....	37
6.5. Análisis estadístico.....	41
6.5.1. Análisis de pendientes .....	42
6.5.2. Valor de pendientes de termorregulación para género femenino .....	45
6.5.3. Valores de pendientes de termorregulación para género masculino.....	46
6.5.4. Análisis de exponenciales.....	47
6.6. Observaciones.....	49
7. CONCLUSIONES.....	51
8. REFERENCIAS.....	52
9. ANEXOS.....	55

## **1. INTRODUCCIÓN**

La termografía infrarroja está siendo cada vez más usada en la ingeniería biomédica, ya que ha permitido mejorar las técnicas de visualización de los patrones de distintas distribuciones de temperaturas provenientes de la piel, de esta manera ha permitido diagnosticar problemas vasculares o nerviosos y particularmente trastornos en la termorregulación como el fenómeno de Raynaud, el cual consiste en episodios de cambios de color en los dedos de las manos y los pies durante la exposición al frío o en respuesta al estrés emocional. La palma de la mano es una región del cuerpo que ofrece información valiosa para el estudio de patologías por medio de la termografía infrarroja, sin embargo, una desventaja del estudio termográfico radica en que factores externos simples como la temperatura ambiental o humedad relativa, entre otros, afectan las medidas obtenidas y el indebido uso o mal diseño de un protocolo experimental lleva muchos estudios a conclusiones erradas, por lo tanto, en este trabajo de grado se llevó a cabo el diseño e implementación de un protocolo experimental para un posterior análisis de una serie de imágenes termográficas de la palma de las manos, esto se hizo con el fin de identificar el proceso de termorregulación de temperatura en dicha zona frente a un estímulo externo caliente. El resultado expuso una termorregulación más rápida en el centro de la palma de la mano y una lenta termorregulación en las falanges distales de la misma. Este proyecto es de gran importancia debido a la necesidad de implementar un protocolo experimental que permita la válida adquisición de imágenes termográficas, ya que estas no se deben ver influenciadas por factores externos de tipo ambientales o metodológicos. Por otra parte, dicho estudio es pertinente ya que servirá como una base para estudios posteriores en personas que posean diversas patologías. Para realizar lo mencionado anteriormente se usó una cámara termográfica industrial Fluke TI-300, la cual capturará las imágenes provenientes del uso de termografía infrarroja pasiva y activa.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo General***

- Diseñar e implementar un protocolo experimental que permita determinar mediante un estudio piloto la dinámica térmica de las palmas de las manos, bajo un estímulo externo utilizando termografía infrarroja.

### ***2.2. Objetivos específicos:***

- Determinar el mejor estímulo externo y tiempo de autorregulación de la palma de la mano.
- Plantear un protocolo experimental para la adquisición de imágenes termográficas.
- Caracterizar imágenes termográficas en sujetos de estudio sanos con termografía activa y pasiva, analizando la distribución de temperatura en el proceso de restablecimiento de temperatura corporal en la superficie de la palma de las manos.
- Identificar zonas que se autorregulan de manera más rápida.
- Realizar un informe final para optar al título de Ingenieros Físicos.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

**CHLEBICKA, Iwona, et al. Freezing fingers syndrome, primary and secondary Raynaud's phenomenon: characteristic features with hand thermography. *Acta dermato-venereologica*, 2013, vol. 93, no 4, p. 428-432.**

En este estudio los investigadores decidieron crear varios equipos, los cuales se dividían en tres grupos de diferentes patologías presentes en las manos y un solo conjunto de personas “sanas”, esto lo hicieron con el fin de no afectar las muestras de las imágenes termográficas, las patologías estudiadas se dividieron en los siguientes grupos: (G1): Sujetos con síntomas de congelación de manos Raynaud Primario; (G2): Sujetos con Raynaud Primario; (G3): sujetos con esclerodermia sistémica de tipo acral y (G4): de sujetos sanos. Dicho estudio lo hicieron en personas que iban desde los 18 hasta los 72 años de edad. Los resultados encontrados mostraron que las temperaturas en las personas sanas presentaron medidas isométricas en ambas manos, también se dieron cuenta que las personas mayores a 60 años presentan una rápida disminución en la temperatura de sus manos, y los estudios realizados en los conjuntos de personas que presentan diferentes patologías (G2),(G3) estos arrojaban las divergencias en las medidas de temperatura de las manos y también lograron observar que en una población “sana” el congelamiento de las manos afecta en mayor porcentaje a las mujeres.

**SALAZAR, Elvira. *Aplicación de la termografía a la psicología básica*. 2012. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.**

Esta tesis doctoral aplica la termografía en la psicología básica del ser humano, lo que se pudo extraer de ella para el trabajo a realizar con las palmas de las manos fue la información que la misma brindó para el diseño de un protocolo experimental, ya que para la toma de imágenes termográficas los investigadores diseñaron los debidos parámetros necesarios para la obtención de unas optimas imágenes, en este trabajo de investigación tuvieron en cuenta varios factores como una adecuada sala de investigación, la cual debía tener el espacio necesario para acomodar la cámara termográfica y los sujetos de estudio, también una temperatura ambiente pertinente que no produzca temblor o sudoración en las personas, la más recomendada es una temperatura que se encuentre entre los 18°C y 25°C, en la captación de las imágenes ellos recomiendan que el laboratorio o la sala de investigación disponga de elementos que generen una imagen lo más estática posible, y que también posea elementos que faciliten el movimiento de la cámara para la toma de imágenes desde diferentes ángulos, también recalcan la importancia de preparar a los sujetos de estudio, debido a que muchos factores pueden afectar la temperatura del cuerpo y por consiguiente las imágenes termográficas, por lo tanto debe hacerse un registro de las condiciones que puedan generar divergencias en los resultados, por ejemplo el consumo de alcohol, tratamientos farmacológicos, el consumo de tabaco, etc, todos estos factores deben ser registrados dado que pueden afectar los resultados de las imágenes.



**CORREA, Adriana, et al. Base de datos de imágenes de termografía infrarroja para el análisis de la termorregulación de la mano.**

En esta investigación se hizo un estudio en TIR de la termorregulación de la mano frente a un estímulo externo tal como agua enfriada a 15°C, para la adquisición de las imágenes también realizaron la implementación de un protocolo experimental, en el cual tuvieron en cuenta factores como: la temperatura ambiente, la humedad relativa, emisividad, distancia de captura y ángulo de incidencia y montaje para la adquisición de imágenes. Los investigadores hicieron el estudio en 21 personas sanas, tanto hombres como mujeres pertenecientes a un rango de edad de 18 a 52 años, obtuvieron 850 imágenes y encontraron que la temperatura mínima encontrada fue de 20°C y la máxima fue de 38°C. La implementación del protocolo logró generar una mejor obtención de imágenes, sin embargo, las conclusiones de este análisis sugieren una mejora en el montaje para la adquisición de las imágenes, la sugerencia fue la utilización de una superficie para el contenedor para disminuir aún más la posibilidad de movimiento de la mano de los sujetos de estudio, debido a que dichos movimientos provocan imágenes termográficas erróneas y por ende dificultan el análisis de dichas imágenes.

**BIOMD, Kelly T. Jiménez-Díaz Ing; BIOMD, Andrés C. Correa-Castañeda Ing; BIOMD, Julián A. Giraldo-Restrepo Ing. Protocolo de adquisición de imágenes diagnósticas por termografía infrarroja. *Medicina & Laboratorio*, 2015, vol. 21, p. 161-178.**

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue el diseño y validación de un protocolo de adquisición de imágenes por termografía infrarroja para analizar la termorregulación de la mano, para dicha investigación se utilizó un estímulo frío en la mano. Se estudiaron 17 individuos, el análisis se dividió en 18 pruebas intrasujeto a un único sujeto sano y pruebas intersujeto en 16 personas sanas, se observó que después de transcurridos 10 minutos del estímulo aplicado, el porcentaje de recuperación de la temperatura fue cercana al 100%, ya que la mayoría de las personas de estudio lograron alcanzar una temperatura de 33°C a 35°C, la excepción fue un individuo que pese a no poseer o presentar alguna enfermedad o patología la punta de sus dedos solo alcanzó 28°C, dicho individuo mencionó que jugaba baloncesto frecuentemente, por lo tanto esta práctica pudo contribuir al decaimiento de su termorregulación. Lo interesante de este estudio fue que también se hizo un tratamiento estadístico a las mediciones realizadas, los investigadores analizaron los valores obtenidos con la prueba de Kolmogorov-Smirnov y según el comportamiento que observaban proveniente de esta prueba realizaban distintos análisis estadísticos.

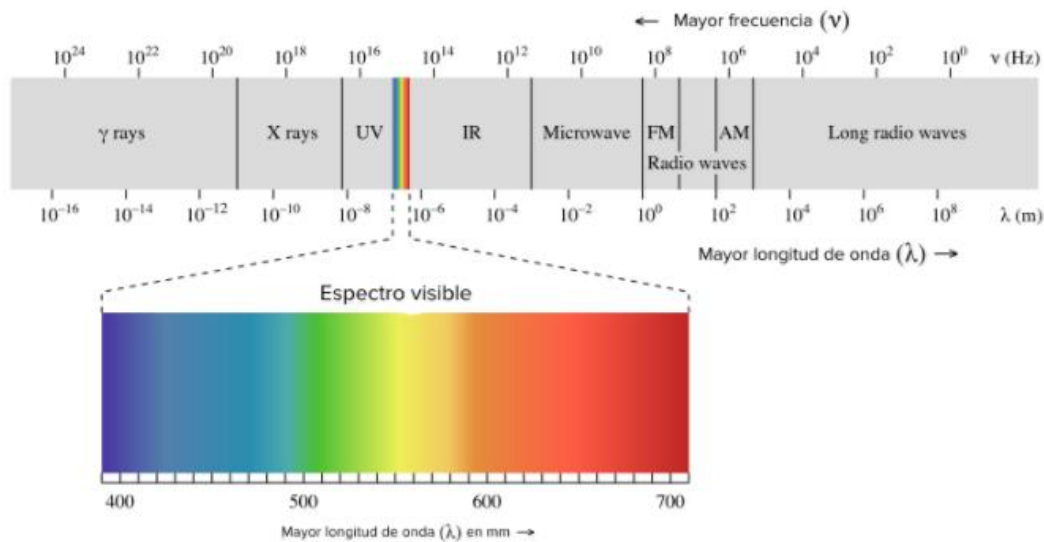
**NG, EY-K. A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48, no 5, p. 849-859.**

En esta investigación se llevó a cabo el estudio de tumores cancerígenos en la mama mediante termografía infrarroja, lo primordial en este trabajo fue la implementación de un óptimo protocolo experimental, debido a que un termograma anormal es reportado como un marcador de riesgo biológico significativo para el desarrollo de cáncer de mama, por lo tanto las imágenes obtenidas no deben poseer ningún error debido a la gravedad que podrían revelar sus resultados, de esta manera, en este artículo describen detalladamente las pautas a seguir diseñadas en el protocolo experimental. Por otra parte, este estudio también proporcionó gran información sobre los conceptos de termografía infrarroja que permitieron fortalecer los conocimientos para desarrollar nuestro trabajo de investigación.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Espectro Electromagnético

Las ondas electromagnéticas son una de las maneras en las que la energía viaja a través del espacio, y la luz es un tipo de radiación electromagnética que exhibe características de las ondas. Las ondas electromagnéticas pueden ser clasificadas de acuerdo a sus frecuencias y longitudes de onda, y es a esta clasificación a lo que denominamos “**Espectro Electromagnético**” este normalmente es representado por medio de un esquema como el siguiente:



*Ilustración1. Radiación Electromagnética. En Wikipedia. (2018). De [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico)*

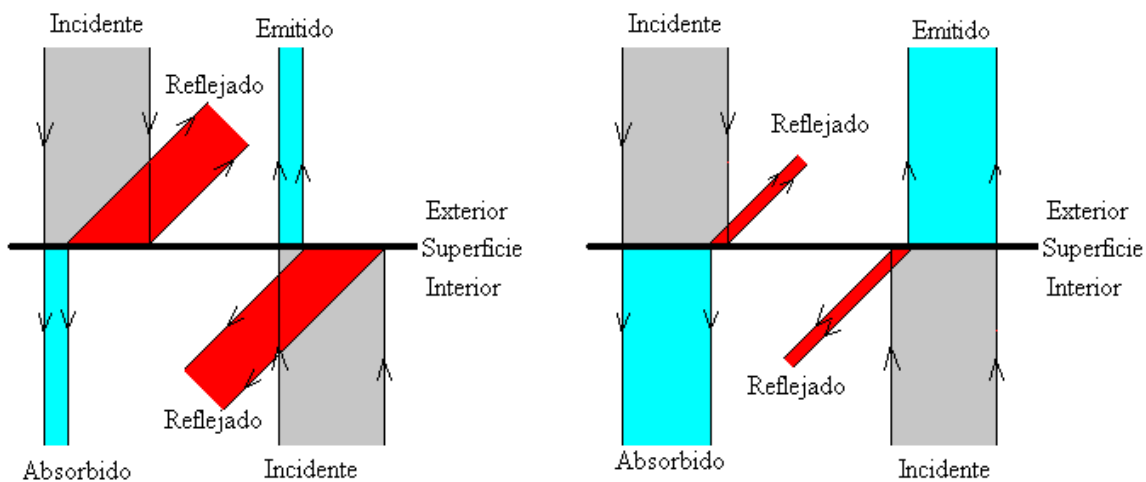
Como puede observarse, el espectro de luz visible ocupa un espacio ínfimo dentro de todo el espectro electromagnético, y a su vez el espectro infrarrojo ocupa una pequeña parte del espectro de luz visible. Anteriormente mencionamos que la luz visible cumple con las características generales de una onda, por ende, se rigen por las leyes y representaciones físicas que se mencionarán posteriormente [1].

### 4.2. Radiación de cuerpo negro

El sistema de absorción y emisión de energía que modela nuestra realidad resultaba bastante atractivo para los científicos de finales del siglo XIX, pues aunque estaba claro que la luz visible, infrarroja y ultravioleta no son más que una parte del espectro electromagnético, o que todo cuerpo absorbe cierta cantidad de radiación y refleja otra cierta cantidad, se quería entender como emitía radiación un cuerpo, y es de esta necesidad de donde surge el planteamiento del denominado “**cuerpo negro**”, término introducido por primera vez por Gustav Kirchhoff en 1862. El cuerpo negro es un cuerpo teórico capaz de absorber todas las radiaciones, es completamente aislado por lo que las paredes de su interior absorben todas las radiaciones sin dejar escapar nada, sin embargo dicho sistema tiene un problema, y radica

en que al ser aislado no es posible saber lo que pasa adentro y la única forma de saberlo es abriendo un pequeño agujero; si se abre un agujero en el cuerpo negro sin importar su tamaño este permitiría la entrada de radiación del exterior que añadiría energía a su interior y haría que el cuerpo se caliente, así pues se dice que el cuerpo negro es un absorbente perfecto. Ahora bien, no puede existir un cuerpo capaz de acumular energía hasta el infinito, pues este acabaría tomando toda la energía del universo, por ello se infiere que al abrir un agujero en el cuerpo negro también se abre una puerta de escape para la radiación, esto quiere decir que un cuerpo negro es un absorbente y emisor perfecto [2].

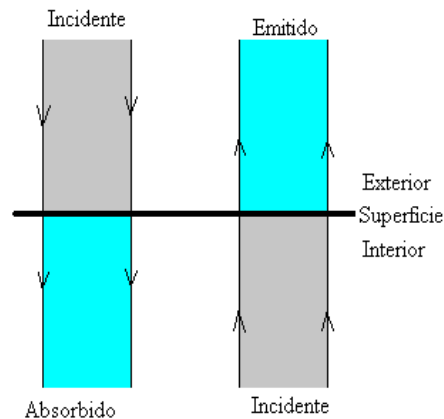
En el siguiente esquema grafico se muestra como es absorbida, reflejada y emitida la radiación por un cuerpo y posteriormente se muestra como realiza los mismos procesos un cuerpo negro:



*Ilustración 2. Esquema de absorción y reflexión de un cuerpo [3]*

Si se considera una energía radiante transmitida desde el exterior sobre la superficie de un cuerpo pulido (altamente reflectante) la mayor parte de la energía es reflejada y la porción restante atraviesa el cuerpo como se muestra en la ilustración 1 parte izquierda, si a la cantidad de radiación incidente se le llamara X y a la absorbida Y se debe cumplir que  $X+Y=1$  y cuando la energía radiante incide desde el interior del cuerpo (en este caso un cuerpo con un índice de reflexión bajo) una parte se refleja hacia adentro y la otra se emite por la superficie como se muestra en la parte derecha de la ilustración 1. De las figuras anteriores se puede deducir que un buen reflector es un mal emisor y un mal reflector es un buen emisor [3].

La superficie de un cuerpo negro es el caso límite, en el que toda la energía incidente desde el exterior es absorbida, y toda la energía incidente desde el interior es emitida:



*Ilustración 3. Esquema de absorción y reflexión de un cuerpo negro [3]*

#### **4.3. Función de distribución de emisión de Planck**

A finales del año 1900 el físico alemán Max Planck presentó su trabajo sobre la ley de radiación de cuerpo negro ante la sociedad alemana de física en Berlín, dicho trabajo representó un gran avance para la ciencia pues es considerado el nacimiento de la física cuántica. Planck planteó en su trabajo una deducción de la expresión teórica de la intensidad de radiación en función de la longitud de onda y de la temperatura, en la que introduce la revolucionaria idea de que un oscilador natural solo puede emitir o ceder energía en magnitudes múltiplo de  $E = h\nu$ , en donde  $h$  es la constante de Planck llamada así en honor suyo y  $\nu$  es la frecuencia de la radiación. El cuerpo negro fue de vital importancia dentro del desarrollo del trabajo de Planck debido a que constituye un modelo físico ideal para el estudio de la emisión de radiación electromagnética [4].

La intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro con una temperatura  $T$  está dada por:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

En donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $k$  es la constante de Boltzmann.

#### **4.4. Emisividad**

La emisividad de un cuerpo es la relación de la cantidad de radiación realmente emitida desde la superficie del mismo en comparación a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura

#### **4.5. Ley de Stefan-Boltzmann**

Esta ley se deduce a partir de la función de distribución de Planck dado que es la integral de la misma a lo largo de los valores de longitud de onda relacionados a las frecuencias de radiación. Establece que un cuerpo negro emite radiación de forma esférica y directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura del mismo, siendo esta radiación emitida por el cuerpo negro el valor límite superior establecido para los cuerpos

reales, dado que el valor de la misma se ve limitado por la emisividad del cuerpo real que en los cuerpos negros es igual a uno [5]:

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

Siendo épsilon el valor de la emisividad de cada cuerpo y sigma la constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$$

#### 4.6. Emisión de banda:

Es la fracción de la emisión total de un cuerpo negro que se encuentra en una determinada banda o intervalo de longitud de onda. Es decir, para una temperatura prescrita T, un intervalo de integración de 0 a lambda es la relación entre la potencia de emisión total de un cuerpo negro en el intervalo definido con la potencia de emisión total en todo el espectro, y se denota de la siguiente forma:

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \frac{\int_0^\lambda M_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda}$$

En donde la potencia de emisión en el intervalo de cero a lambda solo depende del parámetro  $\lambda \cdot T$  y las integrales pueden ser evaluadas numéricamente para estos parámetros. Una gráfica que ayuda a ver con más claridad el concepto es la ilustración 4 [6].

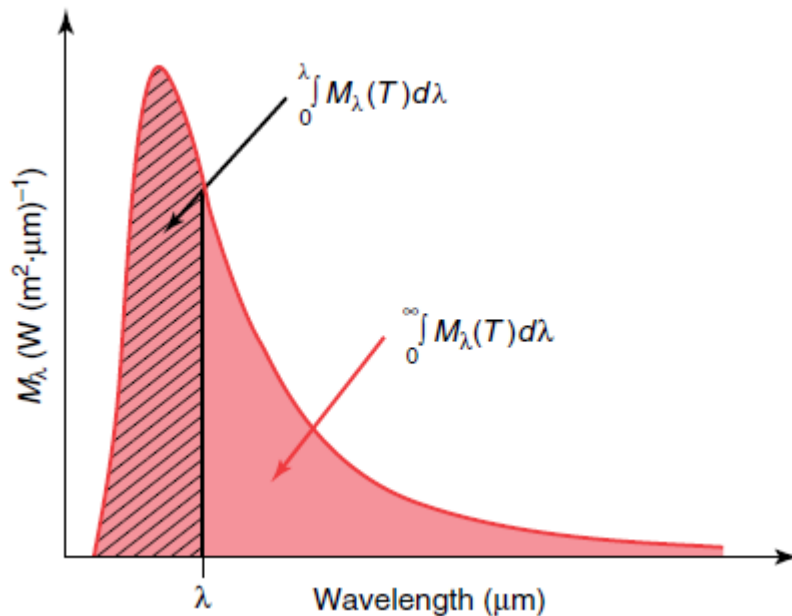


Ilustración 4. Definición de la función de cuerpo negro: Fracción de la radiancia emitida en la banda espectral [6]

#### 4.7. Clasificación de objetos de acuerdo a su emisividad:

La comprensión de la emisividad de un objeto es un componente esencial de la medición infrarroja, esta es la cantidad de radiación emitida por la superficie de un material cuando esta es observada directamente, ahora bien, dado que este parámetro varía dependiendo de factores como la longitud de onda, el campo de visión, la forma geométrica del material en estudio y la temperatura de este, se hace bastante útil el uso de tablas que muestran la emisividad a temperaturas correspondientes de diversos materiales, si es de utilidad para el lector una de ellas se puede encontrar en la referencia [7]. Por otro lado es importante aclarar que existen algunos cuerpos llamados cuerpos grises en los cuales la emisividad es independiente de la longitud de onda y otros denominados emisores selectivos cuya característica principal es que su emisividad depende directamente de la longitud de onda (Ver ilustración 5).

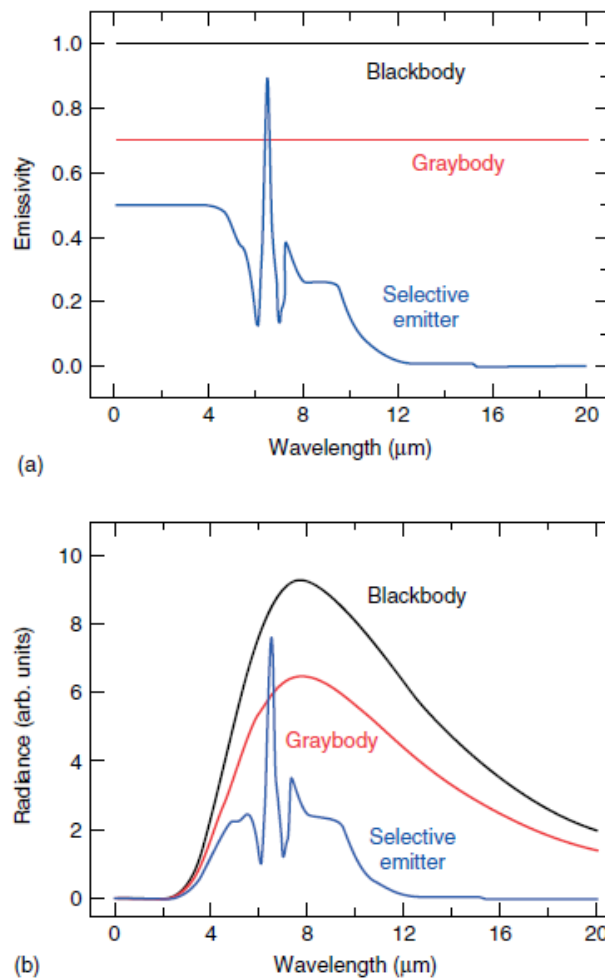


Ilustración 5. Emisividad espectral hemisférica (a) y radiación térmica correspondiente (b) [6]

#### 4.8. Parámetros que afectan el valor de emisividad

Como ya se mencionó anteriormente existen diversos factores que afectan el valor de la emisividad, aquí algunos de los principales causantes de variaciones en dicha magnitud:

#### **4.8.1. El material**

Independiente de la técnica de medición el principal parámetro es el tipo de material, a modo de simplificación uno puede dividir los tipos de materiales en metales y no metales, dado que los materiales usados frecuentemente en termografía tales como papel, agua, plástico, la piel humana, pinturas, cristales, que de hecho son considerados cuerpos grises tienen emisividades con valores muy cercanos a 0.8, por otro lado los metales tienen emisividades muy bajas (aproximadamente 0.2) y como generalmente se oxidan, su emisividad tiende a variar con el tiempo.

#### **4.8.2. La superficie**

Este parámetro puede afectar considerablemente los valores de las medidas obtenidas, y que para un mismo material pueden haber diferentes valores de emisividad dependiendo del estado o tratamiento de la superficie, por ejemplo, la emisividad de un metal puede variar desde un valor de 0.002 si está pulido, hasta 0.8 si el material presenta alta rugosidad, una herramienta experimental que puede ilustrar claramente este fenómeno es el cubo de Leslie, que tiene cada una de sus superficies de cobre con un tratamiento diferente [6,8].

#### **4.8.3. Ángulo de visión**

Dado que la emisividad está determinada por la radiación radialmente emitida por los objetos en comparación con la de un cuerpo negro a la misma temperatura, y que la radiación de un cuerpo negro es independiente de la dirección en la que es emitida, se puede inferir que para cuerpos reales esta varía con respecto a la misma, es decir, dependiendo del ángulo de emisión, la radiación de un cuerpo real puede variar. De acuerdo a la literatura. Esto quiere decir a su vez que la emisividad depende del ángulo de observación con respecto a la superficie normal, y se conoce que para una dirección normal, el cuerpo emitirá más radiación que cuando es observado desde ángulos oblicuos [6]. Por este motivo se considera ideal la observación con la cámara termográfica desde la perpendicular exacta, sin embargo, y afortunadamente, de acuerdo a resultados experimentales no se da una variación significativa de los valores de la emisividad para ángulos de 40 a 45 grados con respecto a la normal.

#### **4.8.4. Longitud de onda:**

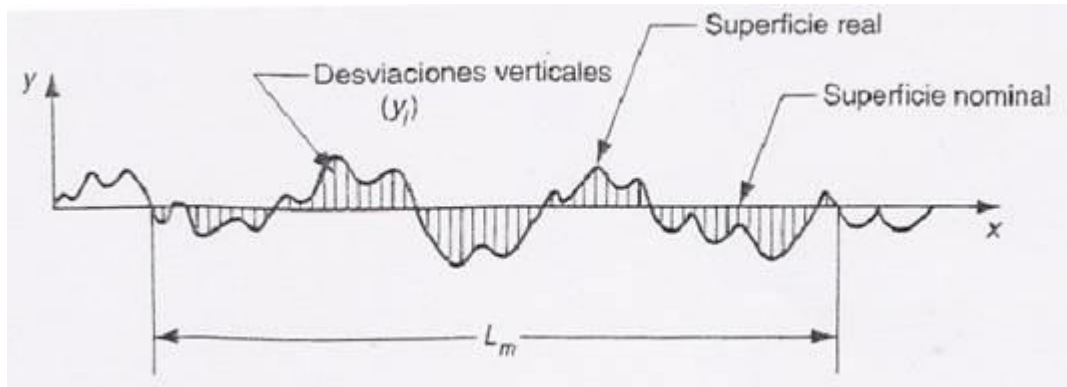
Normalmente las propiedades ópticas de un material dependen de la longitud de onda, y para seguir con la clasificación hecha a grandes rasgos de materiales metales y no metales dentro del estudio de la termografía infrarroja, se puede añadir que para los objetos no metálicos los valores de emisividad tienden a disminuir cuando los valores de longitud de onda disminuyen, opuesto a sus reflectancias, y el efecto inverso se da en los materiales no metálicos, sin olvidar la existencia de materiales selectivos para los cuales sus valores de emisividad están directamente relacionados con la variación de la longitud de onda [6,9].

#### **4.8.5. Geometría**

Como ya lo habíamos mencionado anteriormente, los valores de la emisividad dependen del ángulo de emisión de la radiación en la superficie, o en su defecto del ángulo desde el cual es observada la radiación de un cuerpo (posición idealmente perpendicular a la superficie de estudio), por ello, la geometría de un material influye directamente en el valor de emisividad del mismo. Si las características de un material son rugosas esto



quiere decir que a nivel microscópico la superficie del material tiene irregularidades muy marcadas (ver ilustración 6), y debido a estas irregularidades se presentan distribuciones angulares no uniformes de la emisividad porque en cada punto la radiación es emitida desde un ángulo diferente.



*Ilustración 6. Vista microscópica de una superficie real*

#### **4.8.6. La temperatura del medio**

Grandes variaciones en la temperatura pueden afectar los valores de la emisividad, se conoce que normalmente esta decrece cuando la temperatura también decrece para materiales metálicos y decrece cuando la temperatura crece en materiales no metálicos. Por esta razón se recomienda realizar una caracterización de la emisividad del material para determinada temperatura en el material de estudio [7].

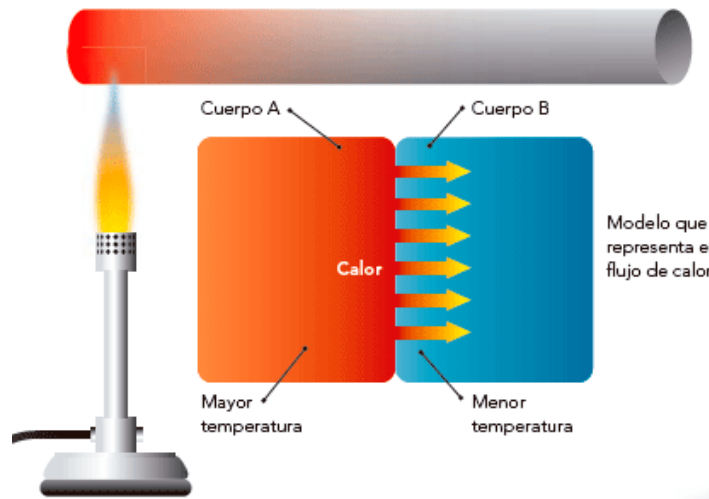
#### **4.9. Propiedades térmicas de los materiales**

Como ya se ha mencionado en numerosas ocasiones, son muchas las variables que influyen al momento de hacer tomas con la cámara termográfica, debido a esto se hace necesario conocer algunas de las propiedades térmicas básicas de los materiales y las diferentes formas en las que el calor es transmitido. Por ello a continuación se muestran los modos básicos de transmisión de calor, en cualquier caso, es la diferencia de temperatura la que genera flujos de energía desde un sistema hacia otro que lo rodea, ahora bien, este intercambio de energía se da de tres formas básicas, conducción, convección y radiación.

##### **4.9.1. Conducción**

Es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia, en donde los choques de partículas con mucha energía entregan a las partículas menos energéticas produciendo siempre un gradiente de temperatura que va desde la temperatura más alta a la más baja. Este fenómeno solo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. El proceso microscópico responsable por la conducción de calor es por facilidad usualmente explicado usando el concepto de que en un gas hay una gran cantidad de moléculas moviéndose en diferentes direcciones y con diferentes velocidades. La temperatura de dicho gas determina la velocidad y energía cinética promedio de las moléculas, ahora bien, en el gas hay un gran número de colisiones entre moléculas que intercambian energía cinética y momento, y aunque cada partícula individual está intercambiando energía cinética y momento, los valores promedios del gas

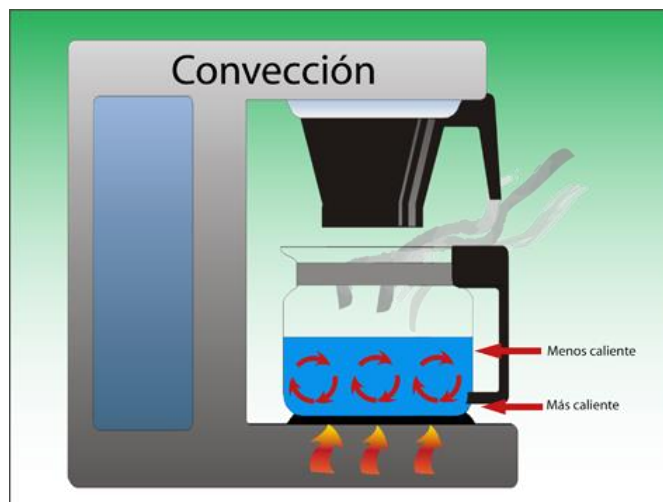
se mantienen estables para un valor de temperatura constante. Sin embargo, si se considera que el gas está en contacto térmico con un objeto de mayor o menor temperatura, se presentarán múltiples colisiones entre el gas y las paredes del objeto en contacto que conducirán a un transporte de energías de energías cinéticas altas a energías cinéticas bajas. Del mismo modo se da para objetos líquidos y sólidos, con la diferencia de que en los objetos sólidos las moléculas no se moverán libremente, sino que vibrarán para generar el intercambio de energía entre ellas y en los objetos líquidos la distancia entre moléculas será más pequeña [6,10].



*Ilustración 7. Proceso de conducción [13]*

#### **4.9.2. Convección**

La convección hace referencia al intercambio de calor entre un sólido y un fluido que se encuentran en movimiento. El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de la naturaleza del movimiento, por ejemplo, la convección natural, es producida solo por las diferencias de densidades de la materia y la convección forzada cuando la materia es obligada a desplazarse de un lugar a otro, por ejemplo el agua movida por una bomba. Un dato interesante es que, en la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmosfera por conducción y radiación cerca de la superficie es transferida a otras capas de la misma por convección [10].



*Ilustración 8. Proceso de Convección [12]*

### 4.9.3. Radiación

Por radiación la energía se transporta en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, dada la naturaleza del documento la radiación que se tendrá en cuenta es la térmica. Como ya lo habíamos visto, la cantidad de energía radiante desprendida de un cuerpo depende de su temperatura absoluta y la naturaleza de la superficie, por ende dicho comportamiento está regido por la ley de Stefan-Boltzmann y la transferencia neta de energía radiante se evalúa entre la diferencia de temperatura superficial de dos cuerpos o más, entre los cuales tiene lugar la transferencia [11].

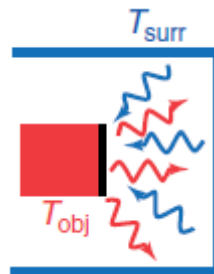


Ilustración 9. Proceso de radiación [6]

### 4.10. Imágenes térmicas

Una imagen térmica o también conocida como termograma, es la representación digital de la medición de radiación térmica (ver ilustración 10), y dichos termogramas son obtenidos a partir de cámaras termográficas. Las cámaras termográficas detectan radiación en forma de luz infrarroja por medio de sensores y convierten esta variable física en una señal eléctrica a través de transductores. Con el fin de explicar cómo las cámaras termográficas obtienen dichas imágenes se explicará posteriormente como funciona una cámara termográfica.

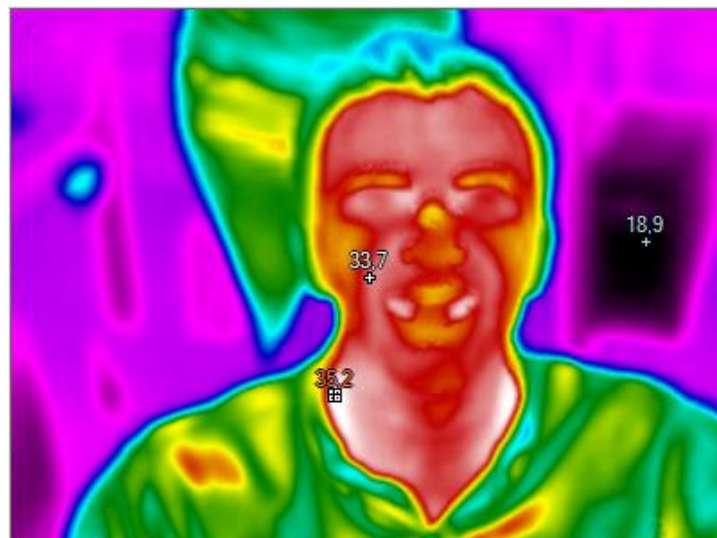
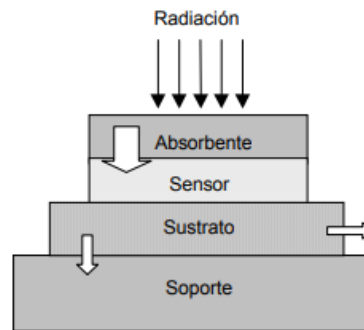


Ilustración 10. Termograma de un rostro humano

#### 4.11. *Funcionamiento de una cámara termográfica*

Para obtener una idea de la temperatura de un objeto es necesario detectar largas longitudes de onda de radiación infrarroja, y esto en el caso de la cámara termográfica se hace por medio de muchos sensores denominados bolómetros, que en un sentido simple son sensores que absorben la radiación térmica y como resultado varía su resistencia, luego esta variación en su resistencia es detectada eléctricamente, y mediante un transductor es asociada a un valor de temperatura, a continuación el esquema simplificado de un bolómetro [14] :



*Ilustración 11. Esquema genérico de un bolómetro*

El absorbente está construido con un material cuya emisividad en la región del espectro de radiación que se desea medir es, en el caso ideal, próxima a la unidad. El sensor es un material con alguna propiedad física cuya variación con la temperatura sea notable (normalmente la resistencia eléctrica). En el caso más usual, la radiación absorbida por el detector se mide registrando la variación de la resistencia mientras el bolómetro se encuentra expuesto a dicha radiación [15].

Posterior a la detección de la variación de la resistividad del absorbente se procesa la imagen para hacerla compatible con el monitor del equipo, por supuesto este proceso implica complejos algoritmos de procesamiento señales eléctricas posterior a la amplificación y filtrado de las mismas.

#### 4.12. *Termografía activa*

La termografía activa requiere de un estímulo externo o fuente de radiación externa que incida sobre los objetos de prueba para generar perturbaciones en el flujo de calor, es muy usualmente usada para ensayos no destructivos, pues los defectos internos pueden afectar estos flujos de calor provocando una distribución anómala de la temperatura [16].

#### 4.13. *Termografía pasiva*

La termografía pasiva no necesita de una estimulación externa para inspeccionar un objeto, pues la mera interacción del objeto con su entorno produce patrones de temperatura que se pueden medir [16].

#### 4.14. *Anatomía de la mano*

A continuación, se muestra de forma breve la anatomía de la mano y sus principales características, con el objetivo de diferenciar cada una de las zonas de estudio de manera formal y entender si la temperatura superficial se distribuye o varía en cada una de las áreas de interés dada la naturaleza de cada una de las partes que conforman la mano, es

decir, saber si la temperatura superficial de determinada zona varía si hay mayor presencia de material óseo o muscular.

Las manos forman parte de las extremidades del cuerpo humano y están comprendidas desde la muñeca hasta la yema de los dedos en los seres humanos, una de sus principales características y utilidades es que son de carácter prensil. Las manos son el principal órgano para la manipulación física y la punta de los dedos contiene algunas de las zonas con más terminaciones nerviosas del cuerpo humano; son la mayor fuente de información táctil sobre el entorno, por eso el sentido del tacto se asocia inmediatamente con esta extremidad. La mano se divide en tres partes:

- Muñeca
- Palma (Metacarpo)
- Dedos

#### 4.14.1. La muñeca

La muñeca es una articulación compleja que permite el movimiento en extensión (hacia arriba), flexión (hacia abajo), desviación radial (hacia el pulgar), desviación cubital (hacia el meñique) y mínimos grados de rotación. La función principal de la muñeca es posicionar la mano en el espacio. Esto permite un posicionamiento preciso de la mano para realizar una amplia gama de actividades que van desde la hábil manipulación de objetos finos hasta objetos pesados.

La estructura ósea de la mano se divide de la siguiente manera:

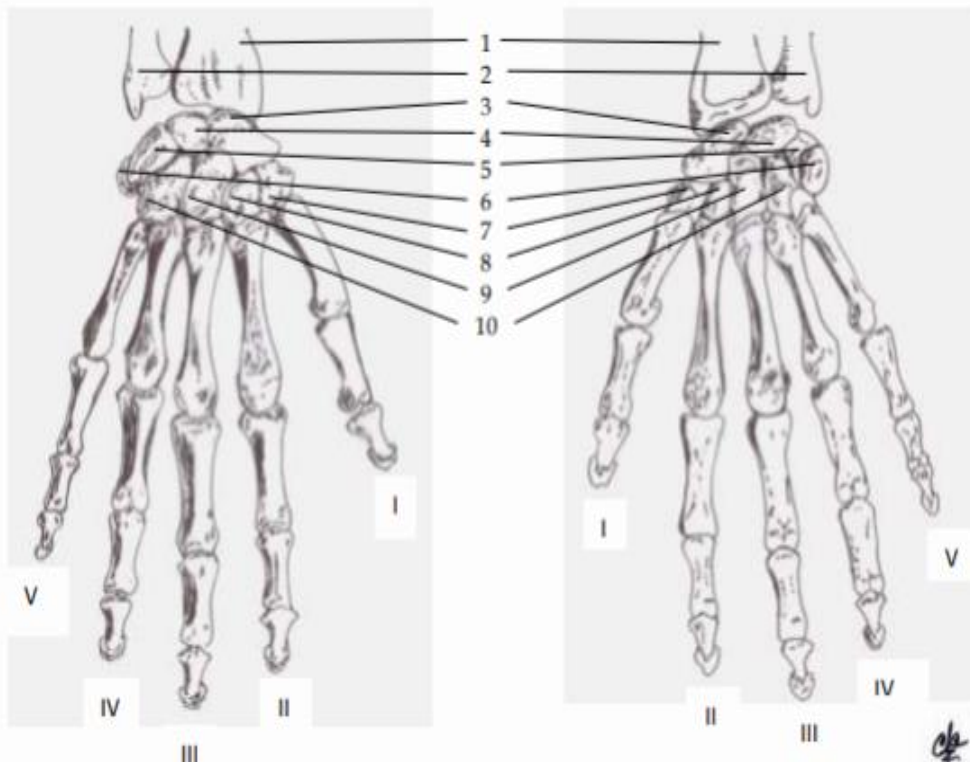


Ilustración 12. Huesos de la mano. 1. Radio; 2, Cúbito (Ulna); 3. Escafoides; 4. Semilunar (Lunate); 5. Piramidal (Triquetrum); 6. Pisiforme; 7. Trapecio; 8.

Trapezoide; 9. Grande (Capitate); 10. Ganchoso (Hamate). I. Pulgar; II. Índice; III. Dedo medio; IV. Anular; V. Meñique.

La estructura ósea de la mano tiene tres grupos de huesos; carpos, metacarpianos y falanges. La muñeca está constituida por ocho carpos. El metacarpo está constituido por cinco huesos ordenados del primero al quinto (ver ilustración 12). El pulgar tiene solo dos falanges proximal y distal, mientras que el resto de los dedos tiene proximal, medial y distal (ver ilustración 13).

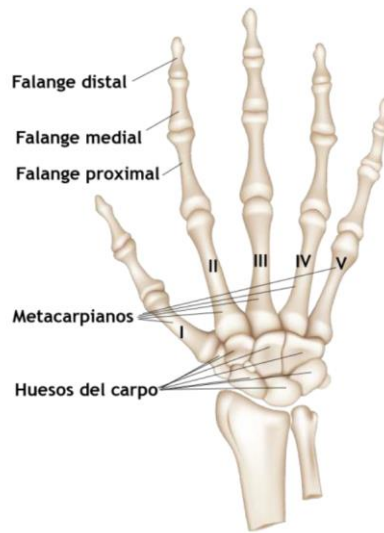


Ilustración 13. Estructura ósea de la mano

#### 4.14.2. Musculatura de la mano

Los músculos de la mano se pueden agrupar en extrínsecos e intrínsecos, dependiendo de su origen e inserción. Para el estudio realizado son de interés los músculos intrínsecos de la mano.

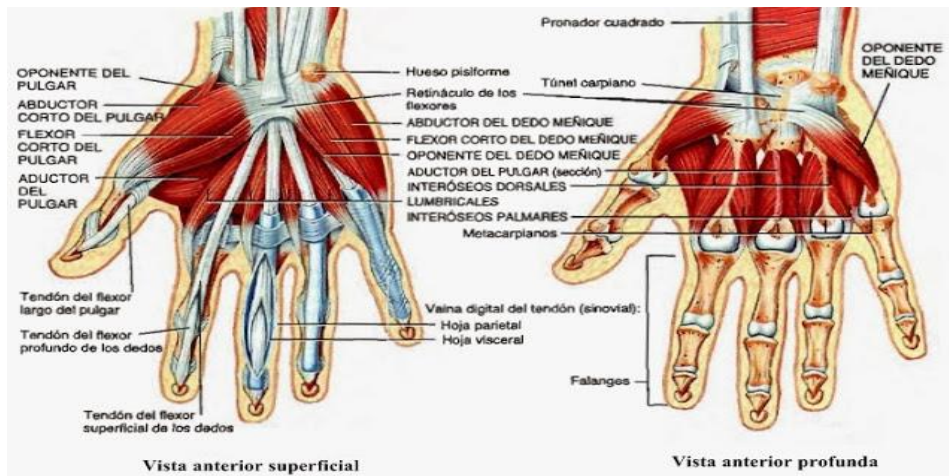


Ilustración 14. Musculatura intrínseca de la mano



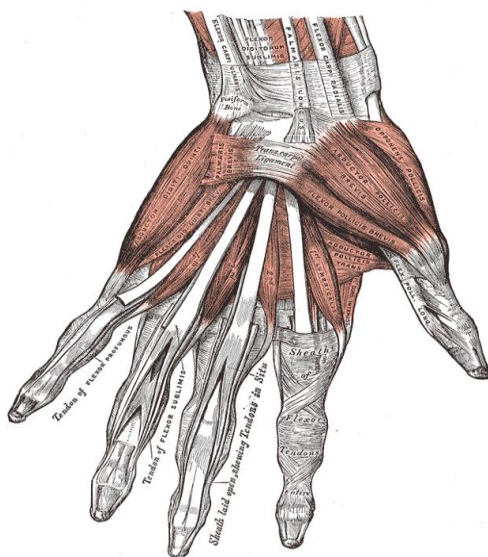
Están repartidos en tres grupos uno lateral perteneciente al pulgar, uno lateral que actúa sobre el quinto dedo y un grupo medio que actúa sobre todos los dedos. Los músculos del grupo lateral son el abductor breve, el flexor breve, el oponente y el aductor del pulgar, el conjunto de estos músculos forma una saliente llamada zona tenar. Los músculos del quinto dedo son el abductor, el flexor breve y el oponente del dedo mínimo, estos conforman una región saliente denominada hipotenar. Por último, tenemos los músculos del grupo medio en donde además del aductor del pulgar se encuentran los lumbricales, los interóseos palmares y dorsales [17] [18].

#### **4.14.3. Músculos interóseos dorsales:**

Son músculos situados entre los metacarpianos:

Son cuatro que se van a originar en las superficies de la diáfisis del I-V metacarpianos insertándose sobre las correderas laterales del capuchón extensor del II-IV metacarpiano, su acción es abducir, el II metacarpiano hacia el radio, el IV metacarpiano hacia el cubito y el III metacarpiano hacia el radio, y hacia el cubito. Los tendones de estos músculos descansan en posición palmar con relación al eje de movimiento metacarpofalángico y dorsal con relación al ligamento transversal del carpo metacarpo [17].

- 4 interóseos dorsales (N. Cubital)
- 4 interóseos palmares (N. Cubital) Acción
- Al tirar lateralmente de la 1ª falange, abre y cierra los dedos.
- Flexión de la metacarpofalángica y extensión de las interfalángicas.



*Ilustración 15. Músculos interóseos de la mano.*

#### **4.14.4. Interóseos Palmares**

Son tres y se originan del II-IV-V metacarpiano, insertándose en la corredera lateral de sus respectivos mecanismos extensores en el capuchón extensor. Su acción es la de producir aducción, moviendo el IV -V metacarpiano hacia el radio y el II hacia el cubito. Los tendones de estos músculos descansan en posición palmar con relación al eje del movimiento metacarpo falángico, pero dorsal con relación al ligamento transversal metacarpiano [17,19].

#### 4.14.5. Músculos lumbricales

Son 4 músculos situados entre los metacarpos. (N. Mediano II y III; N Cubital IV y V)  
Se originan en el tendón del Flexor común de los dedos y terminan en el tendón del Extensor común de los dedos, su acción es:

- Flexión de las metacarpo-falángicas
- Extensión de las interfalángicas [20].

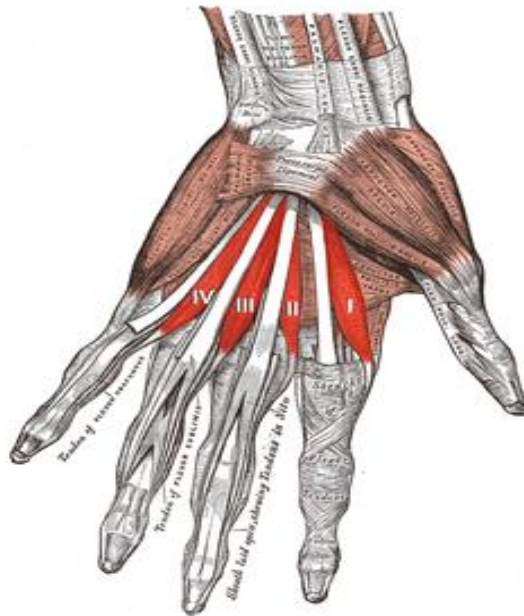


Ilustración 16. Músculos lumbricales de la mano.

#### 4.14.6. Arquitectura de la mano

El esqueleto óseo de la mano consiste en 8 huesos carpianos divididos en dos filas: la fila proximal articulada con las porciones distales del radio y el cúbito, a excepción del pisiforme que se encuentra en disposición palmar y se articula con el triquetrum; los cuatro huesos carpales distales están articulados con los cinco metacarpianos. Los 8 huesos carpales interpuestos entre el antebrazo y los huesos metacarpianos forman la compleja articulación de la muñeca.

Las unidades arquitectónicas de la mano se dividen funcionalmente en unidades fijas y unidades móviles. La unidad fija de la mano está constituida por el segundo y el tercer metacarpianos y la fila distal del carpo, su movimiento es muy limitado en las articulaciones intermetacarpianas y en la segunda y tercera articulaciones carpometacarpianas. Los huesos de la fila distal del carpo (trapezium, trapezoide, hamate y capitate) forman un arco transversal estable fijado en virtud de fuertes ligamentos intercarpianos, y el capitate como piedra angular de la configuración del arco de los huesos carpianos [21,22].

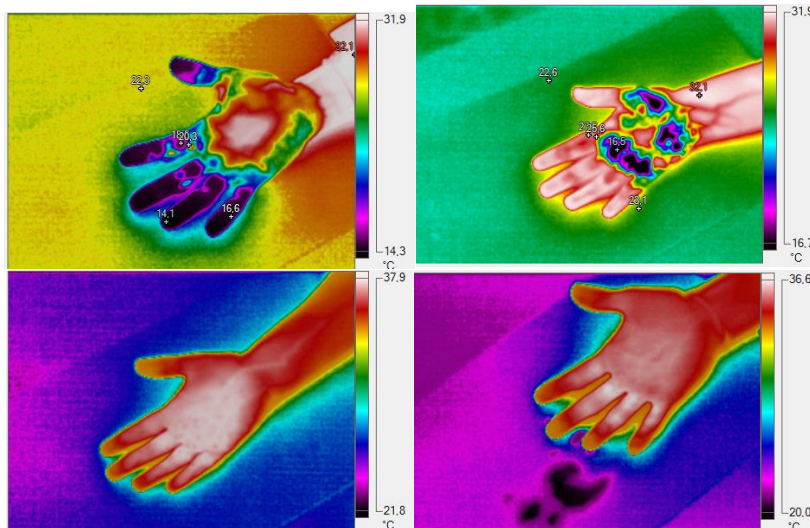
El ligamento volar carpal fija el hamate a las crestas palmares del trapecio para impedir el colapso del arco palmar transversal. Articulando con la fila distal del carpo se proyectan distalmente los cinco metacarpianos. El segundo y el tercer metacarpianos son fijados íntimamente a la fila distal del carpo y juntos forman la unidad fija del esqueleto de la mano. La unidad fija central es la base de soporte de las unidades móviles de la mano y se proyecta distalmente, bajo la influencia de los principales extensores de muñeca (extensor carpi radialis longus y el extensor carpi radialis brevis) y el primer flexor de muñeca, el flexor carpi radialis. Alrededor de esta unidad central se posicionan los elementos adaptativo.



## 5. MÉTODOS:

### 5.1. Elección del estímulo externo.

El primer paso realizado para la implementación del protocolo experimental fue la selección del estímulo. Inicialmente se propusieron cuatro estímulos: Agua fría, hielo, aire caliente (proveniente de un secador) y luz proveniente de una lámpara. El criterio usado para la selección del estímulo fue la uniformidad con la que se podía modificar la temperatura de toda el área de estudio, a continuación, una imagen con cada uno de los estímulos utilizados:



*Ilustración 17. Termogramas obtenidos para cada estímulo*

La primera imagen (esquina superior izquierda) muestra los resultados obtenidos al aplicar un estímulo con agua fría sobre la palma de la mano, y como se puede observar el enfriamiento de la mano se dio de forma no uniforme, debido a que, algunas regiones de la palma lograron un enfriamiento notorio, pero otras por el contrario, como el centro de la palma no tuvo la misma recepción sobre el estímulo, otro punto negativo de este estímulo, es que el agua posee una emisividad diferente a la piel humana, por ende puede alterar los resultados al hacer las mediciones del IR de la superficie, además emplear este estímulo implica un proceso tedioso de transporte para la manipulación y mantenimiento de la temperatura del agua.

En la imagen superior derecha es mostrado el resultado usando hielo como estímulo, este estímulo posee algunos problemas, el primero es que el hielo no alcanzaba a cubrir uniformemente la mano, había lugares que no lograban tener el suficiente contacto con el mismo para recibir el estímulo, es por esto que en la imagen se notan áreas pequeñas pero significativas de la mano que no alcanzan a enfriarse, otro problema es que al poner el hielo sobre la superficie, este se empieza a derretir, mientras se derrite la temperatura cambia, y empieza a dejar manchas de agua o gotas sobre la mano y se hace más evidente la no uniformidad, por tanto, al igual que con el agua fría la falta de uniformidad en temperatura sobre la superficie estudiada es un factor determinante que lleva a descartar su uso como estímulo elegido.

El siguiente estímulo (imagen inferior derecha) muestra la superficie luego de utilizar una lámpara de 500 W a 60 centímetros del área estudiada para calentarla, y de inmediato se nota la diferencia si se compara con los estímulos fríos ya descritos, la primera diferencia es la buena uniformidad que se consigue al realizar el proceso de calentamiento, y la practicidad que representa el no transporte del instrumento usado para generar el estímulo.

Finalmente se muestra la imagen resultado de aplicar aire caliente proveniente de un secador sobre la muestra, el inconveniente de este estímulo es que el área que alcanza a cubrir el secador es muy pequeña, por lo tanto, mientras se calienta una de las regiones de la mano las demás ya se están enfriando, por lo tanto, este estímulo no alcanzaría a aportar la uniformidad deseada y el proceso de calentamiento con el secador se da de una manera más lenta, es por ello que se escoge como estímulo la lámpara debido a su fácil manejo y el hecho de que permite calentar de manera más rápida la superficie de la palma de la mano.

### ***5.2. Adquisición de imágenes.***

Para este estudio, se implementó un protocolo experimental para la adquisición de imágenes, el protocolo se describe más detallada y específicamente en el **Anexo 1**.

Inicialmente se tomó una imagen en condiciones ambientales normales de la mano derecha, luego la mano debía ser sometida al estímulo externo seleccionado durante 25 segundos, a una distancia de 1m, este fue el tiempo prudencial de exposición al calor emanado por la lámpara, luego se recolectaron 60 imágenes del proceso de termorregulación durante 15 minutos en intervalos de 15 segundos. Para tener sustento y certeza sobre los resultados de las mediciones, cada persona debía llenar una encuesta donde se reportaban los factores que posiblemente podrían intervenir en el proceso de termorregulación, el formato de la encuesta también se encuentra en el **Anexo 1**. Las imágenes fueron capturadas con una cámara termográfica Fluke Ti-300, la cual fue adaptada al inicio de cada estudio, donde se configuraron las diferentes funciones de la misma según lo deseado. El estudio se realizó en un laboratorio que contaba con aire acondicionado, por lo tanto, la temperatura ambiente siempre estuvo controlada, igualmente la humedad relativa y las radiaciones de otros dispositivos.

### ***5.3. Procesamiento de imágenes.***

Es importante aclarar que normalmente las imágenes obtenidas de la cámara termográfica Fluke Ti-300 son procesadas por medio del uso del software proporcionado por los fabricantes del equipo (Smart View), sin embargo, la realización de este estudio demandaba un procesamiento manual de imágenes extenuante. La muestra de la población seleccionada es de 20 personas, 10 hombres y 10 mujeres, por cada sujeto de prueba se analizan 60 imágenes (una imagen cada 15 segundos durante 15 minutos) y cada imagen fue segmentada en 6 zonas de interés lo que quiere decir que se deberían seleccionar manualmente 7200 zonas de estudio. El Smart View posee algunos tipos de segmentaciones (marcadores), pero las figuras geométricas del mismo no alcanzaban a cubrir el área deseada, es decir, las segmentaciones del software no se adaptan al área de estudio, debido a que los marcadores no tienen la misma forma de un dedo, el marcador que más se asemejaba a la forma del área del dedo es un ovalo, sin embargo era casi imposible hacer que el área de estudio coincidiera exactamente con el área del marcador, y este paso había que repetirlo para cada una de las regiones de estudio, por lo tanto era

un proceso totalmente tedioso, por lo mencionado anteriormente, se diseñó un algoritmo capaz de leer automáticamente las imágenes de cada sujeto de prueba y segmentarlas para arrojar los datos de temperatura requeridos por zona.

El primer paso para el procesamiento de las imágenes es cambiarlas de formato, del formato entregado por la cámara a formato Excel, una vez obtenida una matriz de datos de temperatura entregada por Excel el siguiente paso es procesar la imagen por medio de MatLab, el funcionamiento general del algoritmo es el siguiente:

Al tomar la matriz de datos de temperatura de Excel es posible mostrarla como una imagen en Matlab [24]. Lo primero que se hace con dicha matriz es un proceso de binarizado que consiste en expresar la imagen en función de dos bits, solo unos o ceros:



*Ilustración 18. Imagen inicialmente leída y posteriormente binarizada.*

El proceso de binarización de la imagen se realiza con la finalidad de crear una “máscara” que permite delimitar las zonas de interés, al contrario del Smart View, donde los marcadores no se ajustaban a la región de estudio, esta máscara se dibujaba exactamente sobre la región de interés deseada, y se ajustaba al modelo de la misma.



*Ilustración 19. "Máscara" Diseñada para delimitar zonas de interés*

Una vez diseñada la máscara, se procede a solapar la imagen de esta con la inicialmente leída con el fin de dejar las zonas de interés dentro de las partes blancas de la imagen y mediante un proceso de segmentación se seleccionan solo las zonas blancas de la máscara, obteniendo de este modo una matriz de datos de temperatura para cada una de las zonas blancas de la “Máscara” [25]. Finalmente, se trazaron las curvas de termorregulación de cada matriz obtenida de temperatura promedio de cada región.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES:

La mano se puede definir como un órgano prensil, resultado de un conjunto estructural muy complejo, con dinámica propia, que constituye un todo funcional, formada por una serie de elementos que han evolucionado en forma casi perfecta, convirtiéndose en una herramienta indispensable en los diferentes aspectos de la vida diaria.

### 6.1. Implementación del protocolo experimental

Los resultados obtenidos de la implementación del protocolo experimental para la adquisición de las imágenes termográficas se exponen en la **tabla 1**. La temperatura máxima alcanzada fue de 39°C, se tomaron 61 imágenes por persona en condiciones ambientales controladas, una primera imagen como referencia y las siguientes 60 luego de aplicar el estímulo, las imágenes se tomaron cada 15 segundos durante 15 minutos, en 20 sujetos sanos (10 hombres – 10 mujeres), para un total de 1220 imágenes, la temperatura ambiente se mantuvo en un promedio de 23°C de acuerdo a lo mencionado en [26], la emisividad para la adquisición de imágenes se ajustó manualmente en la cámara termográfica a un valor de 0,98 [27], la humedad relativa fue monitoreada con un termohigrómetro para garantizar estuviera en un rango que oscila entre 50% – 70%, además el estudio se realizó siempre en horas de la mañana[29][30].

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura ambiente	23°C
Humedad Relativa	50% - 70%
Emisividad	0,98
Paleta	Alto Contraste
Distancia de captura	1m
Termoaislante	Poliestireno expandido (Icopor)
Total de imágenes adquiridas	1220 610 Hombre - 610 Mujer
Tiempo de exposición al estímulo	25 s
Tiempo de captura entre cada imagen	15 s
Tiempo total de captura de imágenes por persona	15 minutos
<b>Especificaciones de la cámara</b>	
Modelo	Fluke Ti-300
Resolución del detector	240 x 180 píxel
Resolución espacial IFOV	1.75mrad

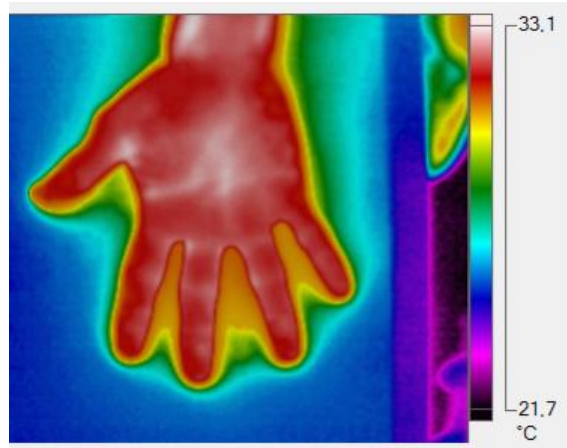
*Tabla 1. Especificaciones para adquisición de imágenes*

El estudio realizado fue discriminado por género, masculino y femenino para determinar si este es un factor dominante en la termorregulación, las imágenes de la parte palmar de la mano fueron tomadas en la mano derecha, donde la primera imagen de cada sujeto sirvió como referencia para determinar la temperatura palmar de cada uno en condiciones ambientales normales y las siguiente 60 imágenes fueron producto de una variación térmica de la superficie de estudio, donde en principio se evidencia una temperatura

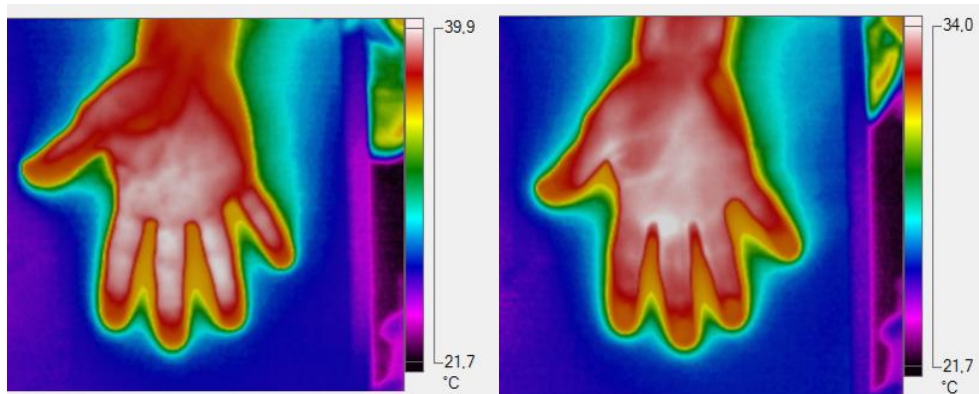
elevada debido al estímulo externo aplicado y al transcurrir el tiempo se observa el restablecimiento de temperatura.

Los resultados en mediciones con termografía infrarroja pueden arrojar datos erróneos o desviaciones en los resultados, debido a que la temperatura se puede ver afectada por un gran número de factores externos, para ello se hizo una revisión de los factores que interfieren en la temperatura corporal y se diseñó una encuesta que busca relacionar características de los sujetos de prueba con las diferencias en las curvas de termorregulación, dentro de la encuesta se tuvieron en cuenta factores como: el peso, la estatura, el consumo de licor o tabaco, antecedentes genéticos clínicos, consumo de fármacos, enfermedades y actividades que involucren el uso de las manos con frecuencia[27],[28].

El estudio fue discriminado por género, masculino y femenino, para determinar si este es un factor de diferencia significativa en el proceso de termorregulación corporal. Las imágenes de la parte palmar de la mano fueron tomadas en la mano derecha de los sujetos de prueba, la primera imagen de cada sujeto fue usada para determinar los valores de referencia de cada una de las zonas de estudio antes de aplicar el estímulo y las siguientes 60 imágenes fueron la respuesta a una variación térmica de la superficie estudiada. En un principio se evidencia una temperatura elevada debido al estímulo externo aplicado, y al transcurrir el tiempo se observa el restablecimiento de temperatura.



*Ilustración 20. Termograma de las manos antes de aplicar el estímulo externo*



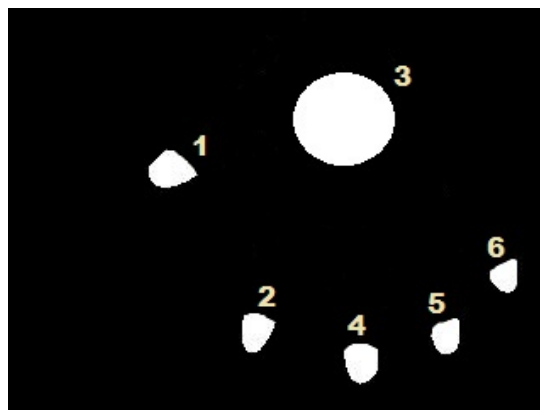
*Ilustración 21. Termogramas de la mano después de aplicar el estímulo externo y luego de restablecida la temperatura superficial*

En las figuras anteriores se puede notar el cambio de temperatura en cada una de las zonas de interés por medio de la paleta de colores dispuesta a la derecha de cada figura, para el desarrollo del estudio se seleccionó una paleta de colores que toma las zonas de menor temperatura de color negro y las de mayor temperatura de color blanco.

Al realizar una comparación entre las figuras 1 y 2 se puede notar la diferencia en los tonos de color antes y después de aplicar el estímulo caliente, especialmente en la región palmar central, y se puede notar también que la temperatura de la mano disminuye desde las zonas exteriores hacia las interiores, es decir primero tienden a disminuir la temperatura las eminencias hipotenar y tenar en compañía con las regiones de las falanges distales y es la región palmar central la que tarda más en disminuir sus valores de temperatura (ver ilustración 21 imagen de la derecha).

## **6.2. Procesamiento de imágenes**

Para este estudio han sido seleccionadas seis regiones de interés como se mencionó anteriormente. Dicha selección se realizó por medio de un proceso de binarización y segmentación usando MatLab. El proceso consiste en binarizar la imagen inicialmente obtenida con el fin de definir los bordes de la palma de la mano y luego delimitar las zonas de interés con un procesador de imágenes (en nuestro caso Paint), para posteriormente solapar la imagen de la máscara creada con la imagen inicial y dar la orden al algoritmo de identificar las zonas blancas de la máscara, ahora bien, dado que cada pixel de la imagen contiene un valor de temperatura se obtiene una matriz de datos de temperatura para cada zona[31][32].



*Ilustración 22. Máscara usada para delimitar las zonas de interés*

Para el reconocimiento de las zonas delimitadas el algoritmo realiza un barrido de izquierda a derecha detectando las regiones en el orden mostrado en la ilustración 22. Las zonas seleccionadas etiquetadas por números son las siguientes:

1. Pulgar
2. Índice
3. Región Palmar Central
4. Corazón
5. Anular
6. Meñique

**6.3. Estimación de la Incertidumbre expandida de la temperatura promedio para cada región.**

<b>INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA REGIÓN 1</b>								
<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 1</b>	<b>UE Región 1</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 1</b>	<b>UE Región 1</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 1</b>	<b>UE Región 1</b>
0	31,77	0,67	300	25,39	0,58	600	25,42	0,58
15	30,31	0,65	315	25,31	0,58	615	25,45	0,58
30	30,23	0,64	330	25,33	0,58	630	25,25	0,57
45	29,12	0,63	345	25,27	0,58	645	25,11	0,57
60	28,71	0,62	360	25,28	0,58	660	25,26	0,57
75	28,44	0,62	375	25,25	0,58	675	24,74	0,57
90	27,69	0,61	390	25,21	0,58	690	24,71	0,57
105	27,07	0,61	405	25,18	0,58	705	24,67	0,56
120	26,52	0,60	420	25,09	0,58	720	24,71	0,56
135	26,28	0,60	435	25,30	0,58	735	24,69	0,56
150	25,99	0,59	450	25,21	0,58	750	24,70	0,56
165	25,99	0,59	465	25,07	0,58	765	24,79	0,56
180	25,98	0,59	480	25,15	0,58	780	24,73	0,56
195	25,95	0,59	495	25,10	0,58	795	24,73	0,56
210	25,81	0,59	510	25,03	0,58	810	24,73	0,56
225	25,81	0,59	525	24,99	0,58	825	24,54	0,56
240	25,73	0,59	540	25,34	0,58	840	24,70	0,56
255	25,69	0,59	555	25,21	0,58	855	24,68	0,56
270	25,43	0,58	570	25,41	0,58	870	24,59	0,56
285	25,44	0,58	585	25,43	0,58	885	24,67	0,56

*Tabla 2. Estimación de la incertidumbre expandida de la temperatura promedio para la región 1.*



<b>INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA REGIÓN 2</b>								
<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 2</b>	<b>UE Región 2</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 2</b>	<b>UE Región 2</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 2</b>	<b>UE Región 2</b>
0	31,81	0,66	300	28,39	0,60	600	27,02	0,58
15	31,12	0,64	315	28,24	0,60	615	27,01	0,58
30	30,90	0,64	330	28,28	0,60	630	26,87	0,57
45	30,29	0,63	345	28,28	0,60	645	26,78	0,57
60	30,16	0,63	360	28,39	0,60	660	26,76	0,57
75	30,01	0,62	375	28,28	0,60	675	26,75	0,57
90	29,92	0,62	390	28,13	0,59	690	26,69	0,57
105	29,67	0,62	405	27,82	0,59	705	26,75	0,57
120	29,49	0,62	420	27,73	0,59	720	26,74	0,57
135	29,39	0,61	435	27,72	0,59	735	26,74	0,57
150	29,30	0,61	450	27,65	0,59	750	26,66	0,57
165	29,26	0,61	465	27,52	0,59	765	26,56	0,57
180	29,21	0,61	480	27,48	0,59	780	26,54	0,57
195	29,11	0,61	495	27,45	0,59	795	26,44	0,57
210	28,92	0,61	510	27,46	0,59	810	26,38	0,57
225	28,98	0,61	525	27,39	0,58	825	26,26	0,57
240	28,59	0,60	540	27,30	0,58	840	26,24	0,57
255	28,40	0,60	555	27,28	0,58	855	26,30	0,57
270	28,30	0,60	570	27,30	0,58	870	26,27	0,57
285	28,32	0,60	585	27,14	0,58	885	26,23	0,57

*Tabla 3. Estimación de la incertidumbre expandida de la temperatura promedio para la región 2.*



### INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA REGIÓN 3

Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 3	UE Región 3	Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 3	UE Región 3	Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 3	UE Región 3
0	35,36	0,69	300	32,30	0,64	600	31,78	0,62
15	34,68	0,68	315	32,20	0,64	615	31,80	0,62
30	34,39	0,67	330	32,28	0,64	630	31,69	0,62
45	33,92	0,67	345	32,22	0,63	645	31,64	0,62
60	33,66	0,66	360	32,16	0,63	660	31,65	0,62
75	33,51	0,66	375	32,15	0,63	675	31,61	0,62
90	33,28	0,66	390	32,12	0,63	690	31,55	0,62
105	33,12	0,65	405	32,09	0,63	705	31,71	0,62
120	32,88	0,65	420	32,04	0,63	720	31,58	0,62
135	32,79	0,65	435	32,15	0,63	735	31,57	0,62
150	32,70	0,65	450	32,12	0,63	750	31,47	0,62
165	32,63	0,65	465	32,01	0,63	765	31,59	0,62
180	32,58	0,65	480	32,03	0,63	780	31,80	0,62
195	32,51	0,64	495	32,12	0,63	795	31,62	0,62
210	32,43	0,64	510	32,04	0,63	810	31,53	0,62
225	32,38	0,64	525	31,97	0,63	825	31,43	0,61
240	32,40	0,64	540	31,93	0,63	840	31,42	0,61
255	32,30	0,64	555	31,86	0,63	855	31,33	0,61
270	32,28	0,64	570	31,83	0,63	870	31,29	0,61
285	32,29	0,64	585	31,79	0,62	885	31,29	0,61

*Tabla 4. Estimación de la incertidumbre expandida de la temperatura promedio para la región 3.*

**INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA REGIÓN 4**

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 4</b>	<b>UE Región 4</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 4</b>	<b>UE Región 4</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 4</b>	<b>UE Región 4</b>
0	32,30	0,69	300	29,67	0,64	600	28,55	0,62
15	31,63	0,68	315	29,70	0,64	615	28,42	0,62
30	31,41	0,67	330	29,77	0,64	630	28,33	0,62
45	30,94	0,67	345	29,72	0,63	645	28,38	0,62
60	30,84	0,66	360	29,95	0,63	660	28,11	0,62
75	30,77	0,66	375	29,78	0,63	675	28,07	0,62
90	30,75	0,66	390	29,62	0,63	690	27,93	0,62
105	30,63	0,65	405	29,41	0,63	705	27,98	0,62
120	30,61	0,65	420	29,26	0,63	720	27,99	0,62
135	30,61	0,65	435	29,26	0,63	735	28,04	0,62
150	30,52	0,65	450	29,27	0,63	750	28,07	0,62
165	30,46	0,65	465	29,14	0,63	765	27,97	0,62
180	30,43	0,65	480	29,15	0,63	780	27,85	0,62
195	30,36	0,64	495	29,15	0,63	795	27,78	0,62
210	30,26	0,64	510	29,01	0,63	810	27,70	0,62
225	30,16	0,64	525	28,92	0,63	825	27,68	0,61
240	29,86	0,64	540	28,88	0,63	840	27,66	0,61
255	29,74	0,64	555	28,72	0,63	855	27,67	0,61
270	29,79	0,64	570	28,66	0,63	870	27,70	0,61
285	29,67	0,64	585	28,57	0,62	885	27,60	0,61

*Tabla 5. Estimación de la incertidumbre expandida para la temperatura promedio de la región 4.*

### INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA REGIÓN 5

Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 5	UE Región 5	Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 5	UE Región 5	Tiempo (s)	Temperatura Promedio (°C) Región 5	UE Región 5
0	31,67	0,61	300	30,20	0,58	600	29,18	0,57
15	31,04	0,61	315	30,26	0,58	615	28,99	0,56
30	31,00	0,60	330	30,39	0,58	630	28,99	0,56
45	30,79	0,60	345	30,40	0,58	645	29,06	0,56
60	30,75	0,60	360	30,55	0,58	660	28,87	0,56
75	30,79	0,60	375	30,41	0,58	675	29,03	0,56
90	30,73	0,60	390	30,34	0,58	690	28,91	0,56
105	30,71	0,60	405	30,26	0,58	705	28,89	0,56
120	30,62	0,59	420	30,06	0,58	720	28,89	0,56
135	30,65	0,59	435	30,05	0,58	735	28,96	0,56
150	30,55	0,59	450	30,09	0,58	750	28,79	0,56
165	30,56	0,59	465	30,08	0,58	765	28,86	0,56
180	30,56	0,59	480	29,93	0,58	780	28,61	0,56
195	30,62	0,59	495	29,94	0,58	795	28,55	0,56
210	30,50	0,59	510	29,87	0,58	810	28,49	0,56
225	30,41	0,59	525	29,78	0,57	825	28,55	0,56
240	30,24	0,59	540	29,71	0,57	840	28,51	0,55
255	30,23	0,59	555	29,65	0,57	855	28,39	0,55
270	30,15	0,58	570	29,57	0,57	870	28,32	0,55
285	30,26	0,58	585	29,49	0,57	885	28,36	0,55

*Tabla 6. Estimación de la incertidumbre expandida de la temperatura promedio para la región 5.*

**INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE TEMPERATURA PROMEDIO PARA LA  
REGIÓN 6**

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 6</b>	<b>UE Región n 6</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 6</b>	<b>UE Región n 6</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C) Región 6</b>	<b>UE Región n 6</b>
0	31,34	0,57	300	30,74	0,58	600	29,29	0,56
15	30,75	0,58	315	30,85	0,58	615	29,39	0,56
30	30,78	0,59	330	30,59	0,58	630	29,36	0,56
45	30,59	0,60	345	30,66	0,58	645	29,29	0,56
60	30,54	0,61	360	30,64	0,58	660	29,16	0,56
75	30,54	0,59	375	30,76	0,58	675	29,21	0,56
90	30,61	0,59	390	30,56	0,57	690	29,23	0,56
105	30,53	0,59	405	30,56	0,57	705	29,06	0,56
120	30,59	0,59	420	30,33	0,57	720	29,05	0,56
135	30,70	0,58	435	30,33	0,57	735	29,14	0,56
150	30,62	0,58	450	30,28	0,57	750	29,12	0,56
165	30,66	0,58	465	30,29	0,57	765	29,02	0,56
180	30,72	0,58	480	30,31	0,57	780	28,95	0,55
195	30,67	0,58	495	30,22	0,57	795	28,82	0,55
210	30,75	0,58	510	30,04	0,57	810	28,66	0,55
225	30,61	0,58	525	30,12	0,57	825	28,69	0,55
240	30,58	0,58	540	29,85	0,57	840	28,64	0,55
255	30,65	0,58	555	30,09	0,57	855	28,65	0,55
270	30,84	0,58	570	29,80	0,57	870	28,60	0,55
285	30,74	0,58	585	29,68	0,56	885	28,57	0,55

*Tabla 7. Estimación de la incertidumbre expandida de la temperatura promedio de la región 6.*

#### 6.4. Curvas de enfriamiento

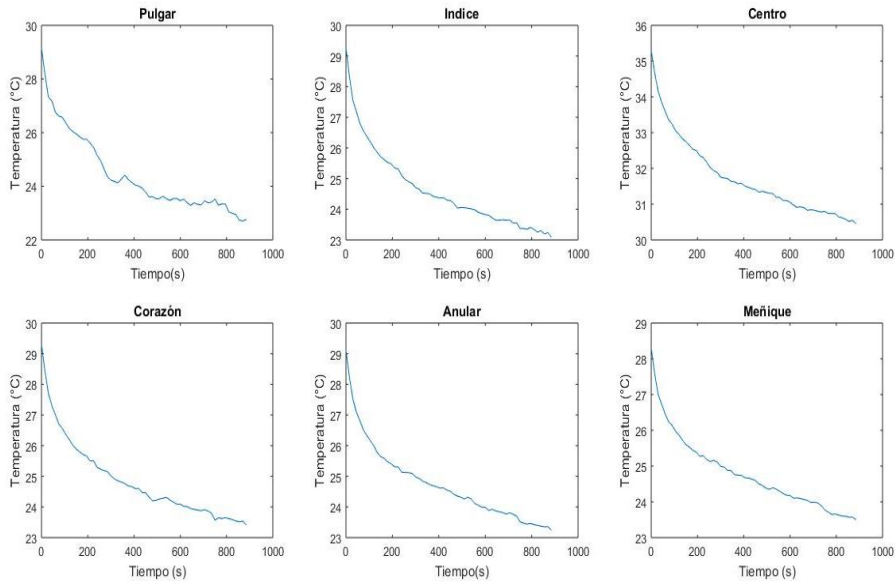


Ilustración 23. Curvas de enfriamiento de un sujeto particular de género femenino

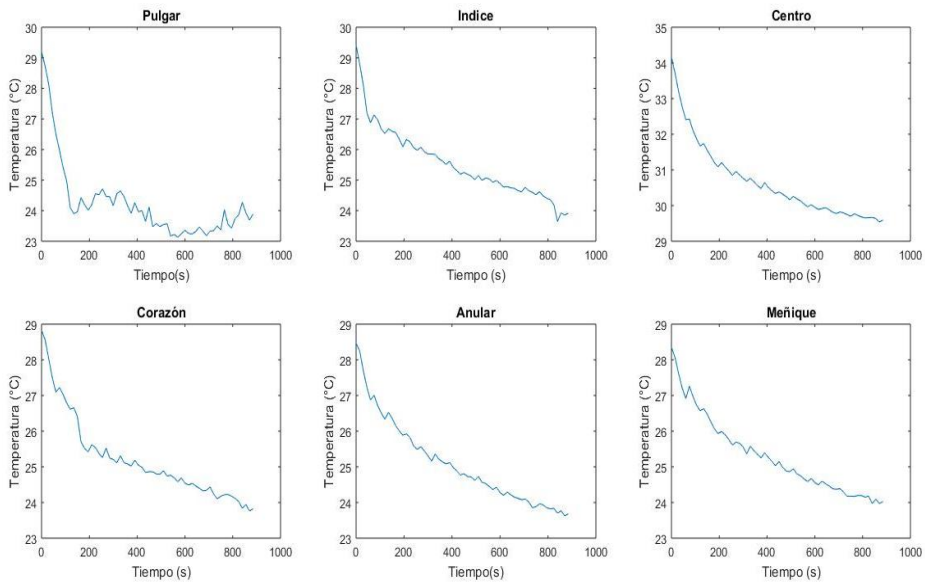
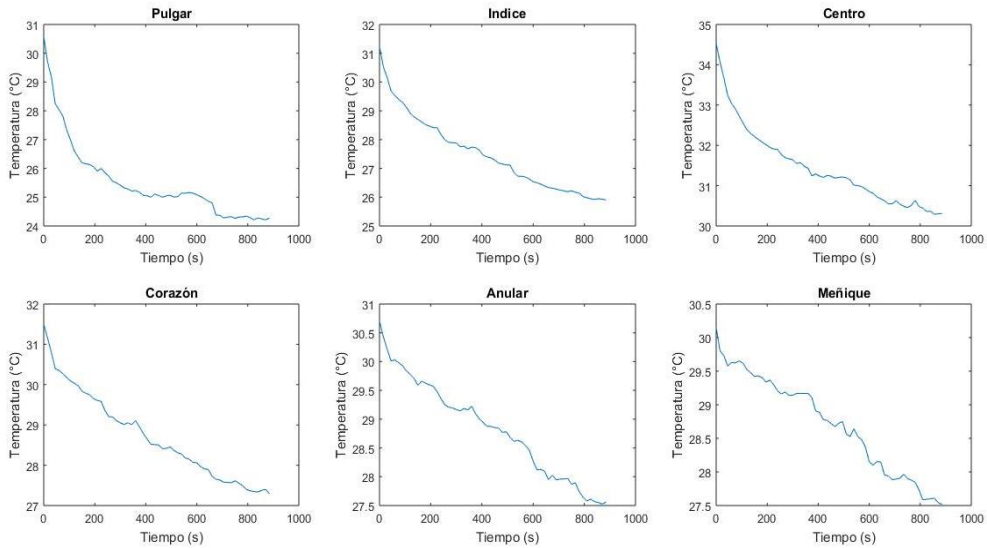


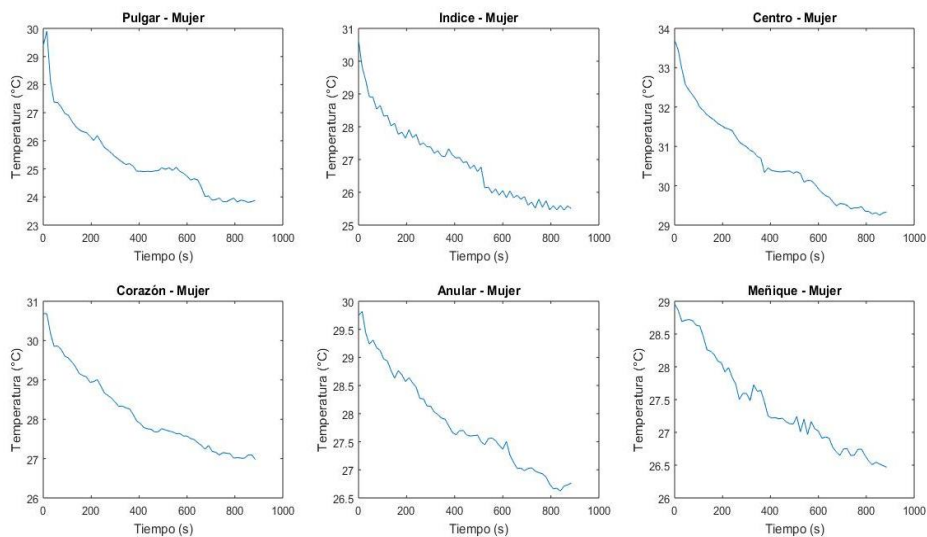
Ilustración 24. Curvas de enfriamiento de un sujeto de prueba de género masculino

En las gráficas anteriores, se dan a conocer las curvas de autorregulación de temperatura en un hombre y en una mujer, pero para comprender más claramente el comportamiento de la termorregulación en la palma de la mano de una población sana se hace el trazo de la gráfica que recolecta todas las temperaturas promedio de los veinte participantes, para vislumbrar cuál es el comportamiento o la tendencia de dicha población, el resultado encontrado es el mostrado en la ilustración 25.

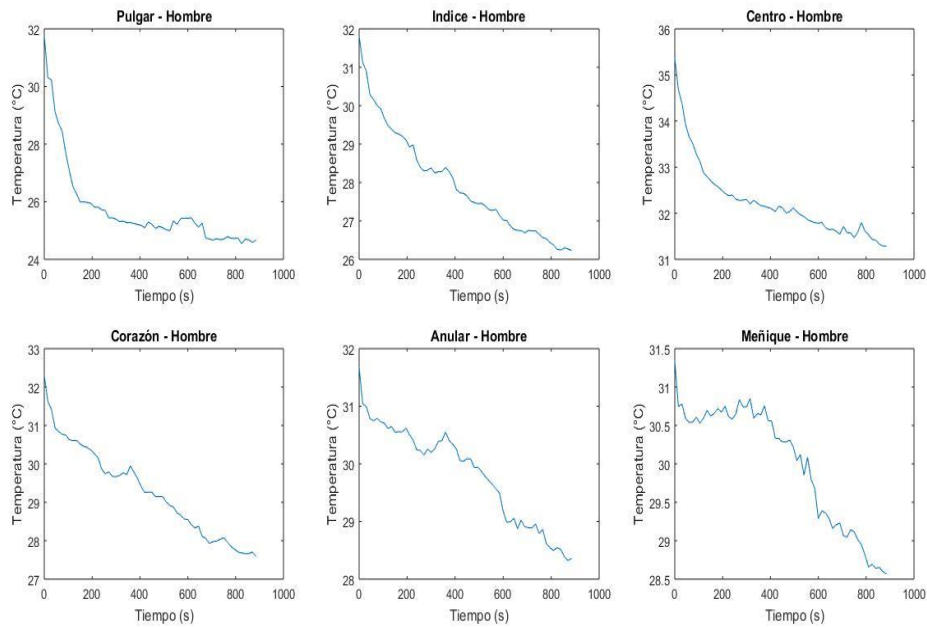


*Ilustración 25. Curvas de enfriamiento promedio de la muestra completa*

En las ilustraciones 23 y 24 se puede apreciar que la curva descendente de la mujer es mucho más suave que la del hombre, dado que, en las gráficas del hombre se perciben oscilaciones, y un trazado más ruidoso, la mayoría de las gráficas obtenidas se sujetaron a la tendencia exponencial descendente de su género, sin embargo, en la ilustración 25 se observa en la última región de estudio una línea que no dibuja una clara tendencia exponencial, es por esto, que para comprender mejor el comportamiento de la termorregulación en hombres y mujeres, se trazó una gráfica final que recolecta las temperaturas promedio de todas las personas para cada región, con el fin de visualizar el comportamiento real de las curvas de enfriamiento discriminadas por género y este fue el resultado:

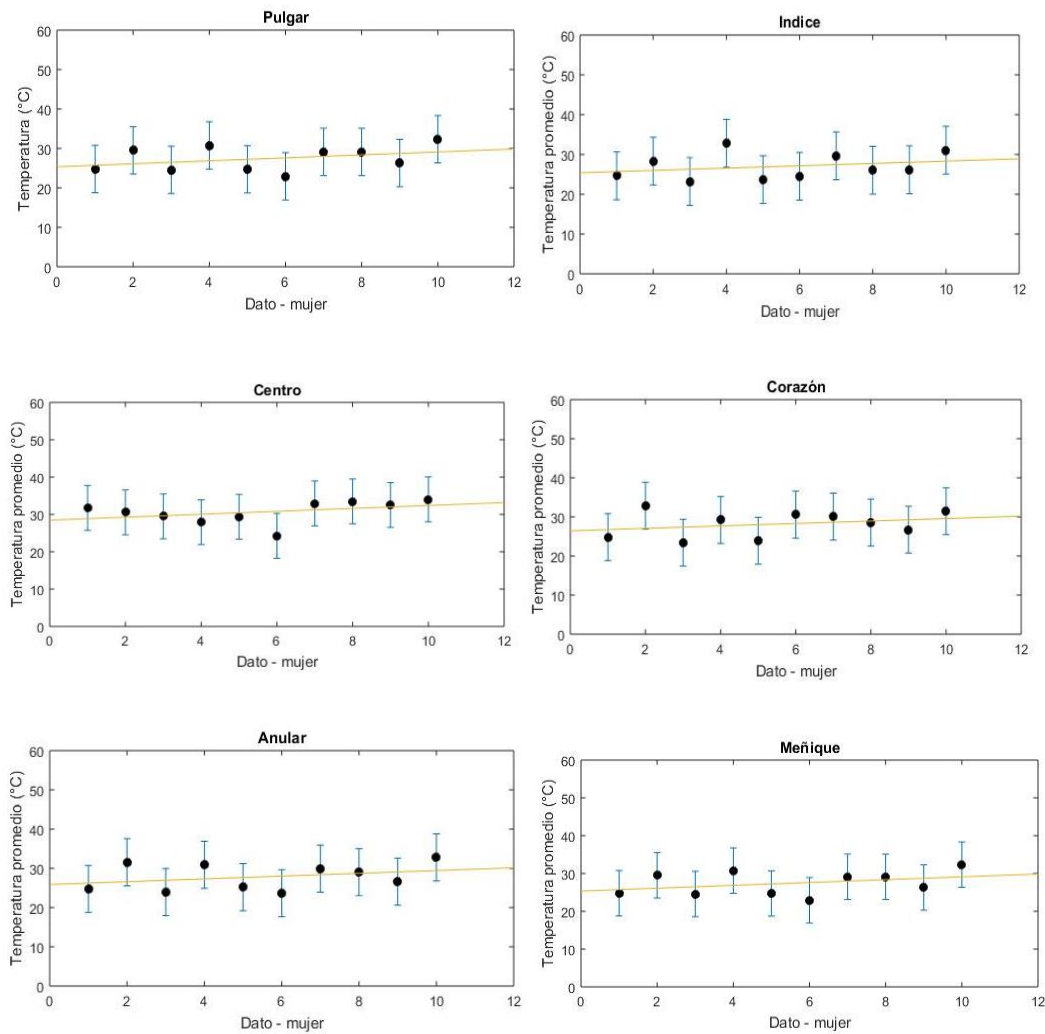


*Ilustración 26. Curvas de enfriamiento promedio para los sujetos de prueba de género femenino*



*Ilustración 27. Curvas de enfriamiento promedio de los sujetos de prueba de género masculino*

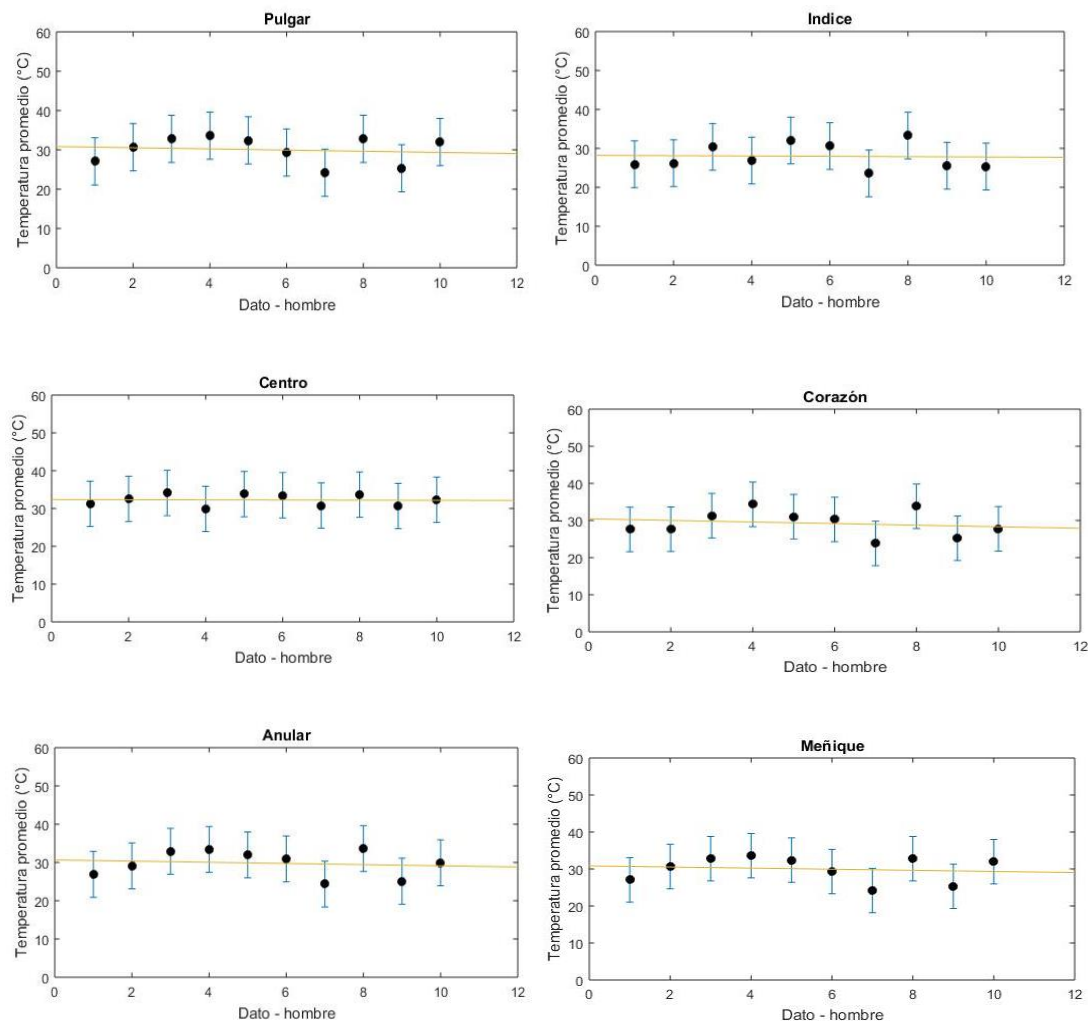
La mayoría de hombres presentan fluctuaciones de temperatura en las dos últimas zonas analizadas (dedo anular y dedo meñique) ya que no tienen un decaimiento uniforme de temperatura, por el contrario, en algunos instantes esta se incrementa, no obstante, la temperatura siempre tiende a bajar durante el tiempo de análisis, es por ello, que sí hay distinciones entre la termorregulación en mujeres y hombres, debido a que el proceso de las mujeres no presenta tantas fluctuaciones de temperatura y por otra parte, al analizar las temperaturas promedio para cada región se encontró que los hombres siempre alcanzaron un valor promedio de temperatura mayor en todas las zonas en comparación con las mujeres [29].



*Ilustración 28. Comportamiento de la temperatura promedio en sujetos de prueba de género femenino*

Al separar la investigación por género, se tiene una visión más clara de las tendencias, al analizar las gráficas del género femenino se observa una tendencia más lineal, las mujeres reportaron curvas de enfriamiento más congruentes, debido a que no muestran tantas fluctuaciones de temperatura en las zonas estudiadas. No obstante, en el análisis anterior se alcanza a percibir que algunos puntos alcanzaron temperaturas promedio considerablemente altas y bajas, de manera que se salen de la desviación estándar obtenida para su región. La zona que más presenta linealidad en las mujeres es el centro de la palma de la mano, sólo una mujer presentó una desviación notoria en esta zona, donde su temperatura es considerablemente baja, esta persona presenta una temperatura baja en la mayoría de las regiones estudiadas, esto puede deberse a que ella interpreta el piano y es posible que pueda llegar a sufrir del túnel carpiano, dado que, el nervio mediano el cual atraviesa todas las partes estudiadas exceptuando el meñique se puede ver afectado por la presión constante ejercida sobre él al interpretar el piano. La tendencia de las mujeres en el resto de zonas es uniforme, aunque se presentan temperaturas más elevadas y otras más bajas, la tendencia que sigue cada zona frente a otra es homogénea. A continuación, se mostrarán las gráficas obtenidas en los hombres.





*Ilustración 29. Comportamiento de la temperatura promedio de los sujetos de prueba de género masculino*

El género masculino reporta más fluctuaciones en sus temperaturas, mayormente en las últimas dos zonas de estudio (dedo anular, dedo meñique), esto parece ser algo inherente al género, dado que, en las mujeres no se reporta este comportamiento. La región que más traza una linealidad en los hombres es también el centro de la palma, ya que esta retiene por más tiempo la temperatura debido al gran número de vasos sanguíneos que la atraviesan, es por ello que no presentan oscilaciones significativas en los resultados.

### **6.5. Análisis estadístico.**

En principio, se estimó un comportamiento lineal en los datos, ya que, al realizar una regresión lineal en las primeras graficas obtenidas, en todos los casos se encontró un factor de correlación  $R^2$  mayor a 0,70, por ello, se generalizó el comportamiento decreciente de los datos y se realizó para todos los casos una regresión lineal, sin embargo, cuando se obtuvieron y se analizaron todas las gráficas, se halló que algunas arrojaban un  $R^2$  menor,

por lo tanto no había un comportamiento lineal en todas, por esta razón se hizo un análisis estadístico de pendientes y de exponenciales, para observar cómo fue el comportamiento de los datos.

### 6.5.1. Análisis de pendientes

El valor de la pendiente de una gráfica indica la rapidez con la que varían los datos de la variable dependiente con respecto a la independiente, en este caso particular nos permite analizar cuál es la rapidez en el cambio de temperatura con respecto al tiempo (que tan rápido se enfrían las superficies de estudio). Luego de realizar la regresión lineal para cada una de las curvas de enfriamiento y hallar su respectiva pendiente se graficaron de forma agrupada, los valores encontrados de pendientes están expuestos en la tabla 8.

Valores de pendientes del total de Sujetos de Estudio						
Dato	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5	Región 6
1	-0,0031	-0,0044	-0,0041	-0,004	-0,0041	-0,0045
2	-0,0035	-0,0096	-0,0022	-0,0077	-0,0053	-0,0026
3	-0,0062	-0,0053	-0,0017	-0,0051	-0,0013	-0,0005
4	-0,0048	-0,0066	-0,0033	-0,0018	-0,0003	-0,0005
5	-0,005	-0,0015	-0,002	-0,003	-0,0015	-0,0005
6	-0,0048	-0,0067	-0,0034	-0,0069	-0,0058	-0,0091
7	-0,0027	-0,0036	-0,0034	-0,0042	-0,0043	-0,0047
8	-0,0021	-0,0027	-0,0009	-0,001	-0,00002	-0,0012
9	-0,0036	-0,0041	-0,0038	-0,0041	-0,0044	-0,0041
10	-0,0035	-0,0064	-0,0026	-0,0065	-0,0048	-0,0018
11	-0,0051	-0,0046	-0,0038	-0,0044	-0,0044	-0,0037
12	-0,0053	-0,0046	-0,0021	-0,0018	-0,0034	-0,0016
13	-0,0014	-0,0026	-0,0061	-0,0024	-0,0013	-0,0008
14	-0,009	-0,0032	-0,0011	-0,006	-0,0033	-0,003
15	-0,004	-0,0039	-0,0046	-0,0044	-0,0035	-0,0043
16	-0,0023	-0,0038	-0,0037	-0,0033	-0,004	-0,003
17	-0,0018	-0,0048	-0,0022	-0,0051	-0,0044	-0,0032
18	-0,0035	-0,0035	-0,0035	-0,0035	-0,0035	-0,0035
19	-0,0052	-0,0064	-0,0046	-0,006	-0,0059	-0,0056
20	-0,0104	-0,005	-0,0002	-0,0031	-0,0009	-0,004

Tabla 8. Valores resultantes de las pendientes de termorregulación

Para tener certeza sobre el comportamiento de la muestra se hizo una prueba de normalidad con los datos de pendientes, con el fin de determinar si la muestra tiene un comportamiento normal, para este estudio se hizo la prueba de normalización de “Shapiro-Wilk”, la cual será detallada en el **Anexo 3** [34], [35]. Se encontró que las muestras realizadas tienen un comportamiento normal, de acuerdo al “Shapiro-Wilk Test”, el resultado de esta prueba es satisfactorio, ya que lo esperado era encontrar que una población sana termorregula de manera uniforme.

Los datos de pendientes fueron analizados con pruebas paramétricas debido a que según el “Shapiro-Wilk Test” siguen una distribución normal, para esto se utilizó la prueba “t Student” [36] para muestras únicas y para muestras emparejadas, lo segundo se hizo para

determinar si hay relación en la termorregulación entre regiones. Las pruebas se hicieron con el objetivo de conocer si existen diferencias estadísticamente significantes en las muestras, esto con el fin de determinar si los resultados de estudio debían ser analizados de manera diferente en ausencia de normalidad, o si en las pruebas se presentaron desviaciones significantes que representarían un análisis más minucioso sobre los factores que pudieran afectar la termorregulación en una población presuntamente sana. Para llevar a cabo los análisis siguientes se hizo uso del valor absoluto de las pendientes.

Los resultados se someten a una prueba de hipótesis, donde se someten al siguiente planteamiento:

$H_0$ : La mediana de la variación de la termorregulación es igual a la mediana teórica, es decir igual a 0.

$H_1$ : La mediana de la variación de la termorregulación es significativamente diferente a la mediana teórica, es decir, diferente de 0.

Para una prueba t Student, de muestra única.

$$\mu = \bar{x} \pm t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde,

$\bar{x}$ : media de los datos

$\sigma$ : desviación estándar

$n$ : tamaño de la muestra

$\mu$ : media calculada

$t$ : de t Student es un parámetro tabulado que depende de los grados de libertad de la muestra  $(n - 1)$  "gl" y del intervalo de confianza que se quiera, para este caso 95%

En este análisis ocurre lo siguiente con el planteamiento de las hipótesis:

$H_0$  Se acepta, cuando  $\bar{x} \leq \mu$

$H_1$  Se acepta, cuando  $\bar{x} > \mu$

Análisis estadístico: pendientes del total de la muestra			
Regiones	Valor de $\bar{x}$	Valore de $\mu$	Diferencia estadísticamente significativa
Región 1	0,0041	0,0051	No
Región 2	0,0047	0,0054	No
Región 3	0,0030	0,0035	No
Región 4	0,0042	0,0049	No
Región 5	0,0035	0,0042	No
Región 6	0,0031	0,0039	No

Tabla 9. Resultado de prueba t Student para muestras únicas.

Según las hipótesis planteadas para la determinación de diferencias estadísticamente significativas se tiene que, para todas las regiones,  $\bar{x} \leq \mu$ , es decir, en todos los casos se acepta  $H_0$  y se rechaza  $H_1$ , esto significa que las desviaciones no se deben a errores sistemáticos significativos, por lo tanto, es posible decir que las muestras termorregulan homogéneamente, es decir, tienen un comportamiento normal, este es un gran indicio, ya que, es el resultado esperado, puesto que, el estudio se realizó en una población sana, por consiguiente lo estimado era que el comportamiento de termorregulación en la misma se diera uniformemente, o de una manera coherente, sin errores o desviaciones significativas en los datos, de este modo, la prueba de normalización acepta este estudio como una muestra de comportamiento normal.

Se hizo una prueba “t Student” para muestras emparejadas, para determinar si se presentan termorregulaciones significativamente diferentes entre las regiones, o si se puede considerar que éstas termorregulan de igual manera, sin diferencias estadísticas significativas [37]. En este caso también se propende por establecer una hipótesis, donde:

$H_0$  Se rechaza, cuando  $p < 0,05$

$H_1$  Se rechaza, cuando  $p > 0,05$

Prueba t Student para muestras emparejadas: Pendientes		
Regiones	Valor de p	Diferencia estadísticamente significativa
Región 1 - 2	0,4190	No
Región 3 - 4	0,0203	Si
Región 5 - 6	0,2344	No

Tabla 10. Resultados prueba t Student para muestras emparejadas

Para la prueba “t Student” de muestras emparejadas, en relación con la termorregulación en las diferentes regiones de la mano, se obtuvo que en comparación, los dedos de la mano termorregulan con un comportamiento homogéneo, dado que para todos los análisis se obtuvo una  $p > 0,05$ , por lo tanto la hipótesis nula se acepta, y la hipótesis alterna se rechaza, esto quiere decir que se rechaza la existencia de diferencias significativas en la termorregulación entre las regiones de los dedos, es decir, según las pruebas no hay grandes cambios cuando se compara la termorregulación de un dedo de la mano con otro, todas tienden a tener el mismo comportamiento, sin embargo, se encontró que la región 3 (centro de la mano) termorregula de manera diferente en comparación con los dedos, cuando se hizo la prueba t Student para muestras emparejadas se hizo para comparar todas las regiones y se obtuvo que hay diferencias estadísticamente significativas al comparar la región 3 con las demás regiones. Las tablas donde están todos los datos que arroja la prueba t Student para dos muestras emparejadas se encuentran en el **Anexo 4**.

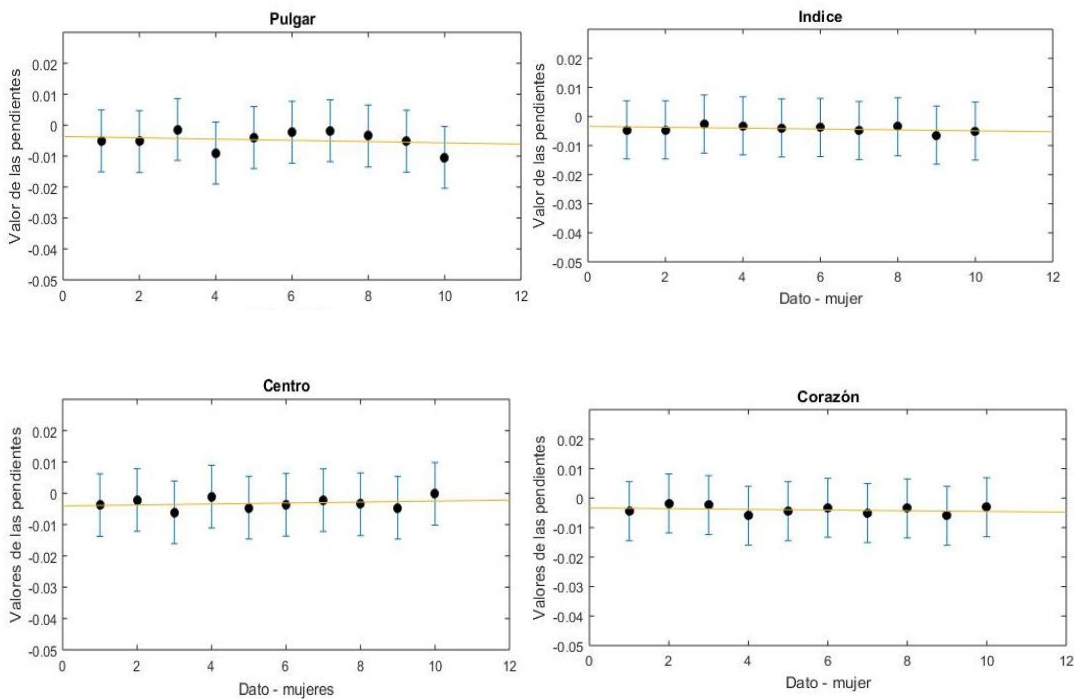
Cada gráfica mostrada a continuación muestra las pendientes de cada zona para cada persona en un mismo esquema.

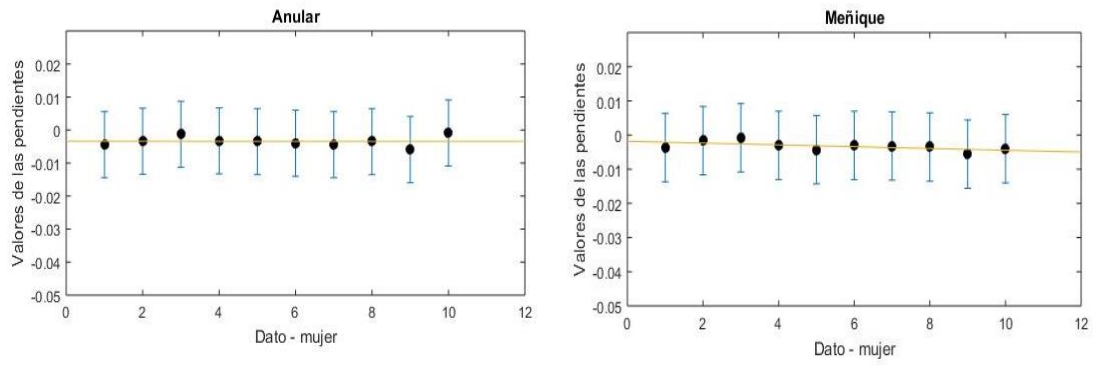
Es posible notar que la variación en las pendientes para toda la muestra seleccionada varía entre 0.01 y 0.1. Además, a partir de las gráficas se pueden hacer varias afirmaciones:

- En promedio para todas las zonas estudiadas la que se enfrió más rápidamente fue la zona dos (Dedo índice).
- La zona que más tardó en enfriarse fue la zona seis (Dedo meñique)

Las zonas que más presentan datos de pendientes más dispersos son los de la cinco y seis, dicho comportamiento se debe a que para estas gráficas se tuvieron en cuenta los datos de los hombre y las mujeres como un promedio general, sin embargo el análisis discriminado por género ha mostrado que en los hombres las variaciones de temperatura en estas zonas se da de forma irregular siguiendo un patrón definido que en este análisis por pendientes se traduce en variaciones rápidas o lentas repentinas.

### 6.5.2. Valor de pendientes de termorregulación para género femenino

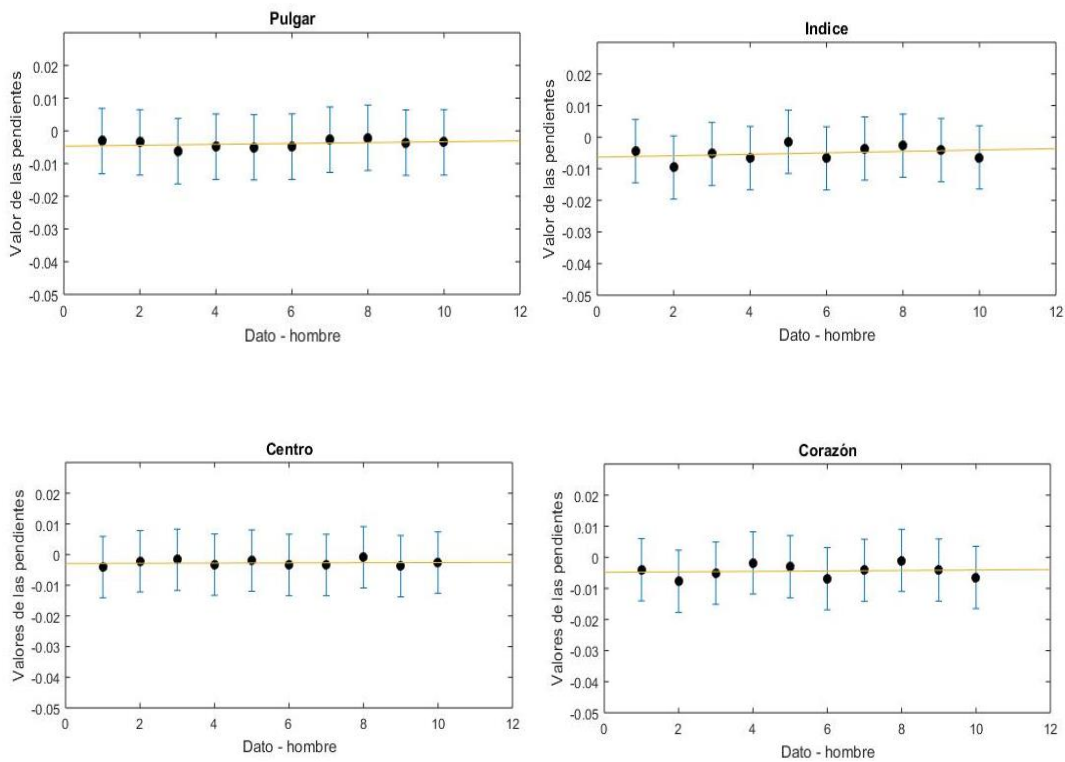


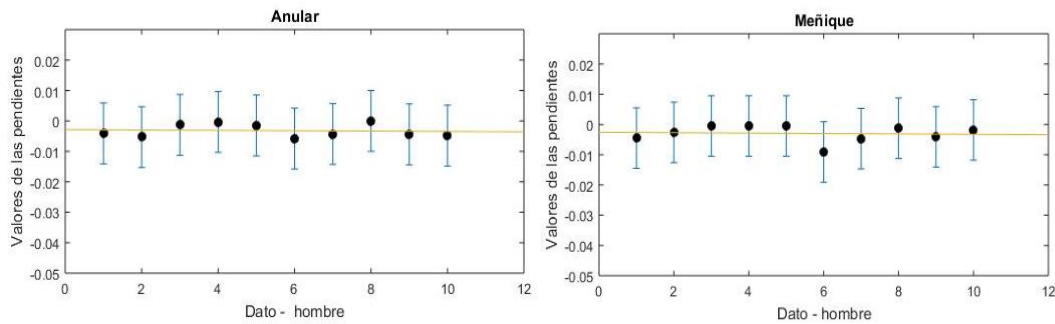


*Ilustración 30. Valores de pendientes de termorregulación para los sujetos de prueba de género femenino.*

A diferencia de los hombres en las mujeres la zona que regula su temperatura más rápidamente es la región uno (El pulgar) y las que más tarda en hacerlo es la región seis, además es importante agregar que los valores de pendientes de las gráficas para las mujeres no varían de forma tan irregular como en hombres, sino que se mantiene una tendencia muy bien definida.

### **6.5.3. Valores de pendientes de termorregulación para género masculino**





*Ilustración 31. Valores de pendientes de termorregulación para los sujetos de prueba de género masculino*

En los hombres la zona que presentó un enfriamiento más rápido fue la región dos y la que tardó más en disminuir la región seis al igual que en muestra total. Por otro lado, la mayoría de datos dispersos o al borde de los límites de tendencia de las pendientes se presentaron en las zonas de la región cinco y seis (anular y meñique).

#### **6.5.4. Análisis de exponenciales.**

Al trazar todas las curvas de enfriamiento, y al hacer el análisis de pendientes, se obtuvieron valores de  $R^2$  menores a 0,70, por lo tanto, había personas que no arrojaron en la totalidad de sus zonas curvas de termorregulación con tendencia lineal, por el contrario, presentaron curvas exponenciales, por tanto, se hizo un análisis estadístico de datos exponenciales, donde se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla de exponenciales del total de la muestra						
Dato	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5	Región 6
1	-0,0001	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002
2	-0,0001	-0,0004	-0,00005	-0,0003	-0,0002	-0,0004
3	-0,0002	-0,0002	-0,00005	-0,0001	-0,0002	-0,0001
4	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001
5	-0,0002	-0,0002	-0,0005	-0,0001	-0,00005	-0,0002
6	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0003
7	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002
8	-0,0004	-0,0003	-0,00003	-0,0001	-0,0002	-0,0004
9	-0,0002	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002
10	-0,0001	-0,0002	-0,00005	-0,0002	-0,0002	-0,0004
11	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0001
12	-0,0002	-0,0001	-0,00007	-0,0002	-0,0001	-0,0004
13	-0,0006	-0,0001	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0004
14	-0,0003	-0,0001	-0,00004	-0,0001	-0,0001	-0,0002
15	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0002
16	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001
17	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0001
18	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001
19	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002
20	-0,0004	-0,0003	-0,0003	-0,0002	-0,0002	-0,0002

*Tabla 11. Valores de exponenciales para toda la población.*

Se realizó el test de “Shapiro-Wilk” para ver si la muestra tenía un comportamiento normal, sin embargo, el resultado de este test fue que solo dos zonas de estudio tuvieron dicho comportamiento, por ello se hizo otro test de normalidad que utiliza otros parámetros diferentes que se basa en la regresión de mínimos cuadrados para determinar si con este análisis resulta un comportamiento normal, el test usado fue “D’agostin – Pearson” [38], el resultado para esta prueba fue normalidad en todas las zonas estudiadas, no obstante, para asegurar la normalidad de los datos, se hizo otro test que utiliza los mismos parámetros del anterior para verificar el comportamiento de los mismos, la prueba fue “Jarque -Bera”, la cual también arrojó normalidad en todas las regiones [38].

Para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas en los datos de las muestras también se usó la prueba t Student para muestras únicas, y para muestras emparejadas, en la cual se encontró que para muestras únicas,  $p > 0,05$ , por lo tanto no se rechaza  $H_0$ , es decir, no hay presencia de diferencias significativas en los datos muestrales, y para muestras emparejadas se determinó que al igual que en el análisis de pendientes, todas las zonas de los dedos termorregulan igualmente al comparar unas regiones con otras, pero cuando se compara la termorregulación de dedos con el centro de la palma se encuentra que si existen diferencias estadísticamente significativas, los resultados de la prueba son los siguientes:

<b>Prueba t Student para muestras únicas - Exponenciales</b>			
<b>Regiones</b>	<b>Valor de <math>\bar{x}</math></b>	<b>Valor de <math>\mu</math></b>	<b>Diferencias estadísticamente significativas</b>
Región 1	8,7304	8,9848	No
Región 2	8,9037	9,1390	No
Región 3	9,271	9,4942	No
Región 4	8,8520	9,0034	No
Región 5	8,8942	9,0552	No
Región 6	9,0170	9,4054	No

*Tabla 11. Resultados prueba t Student para muestras únicas*

<b>Prueba t Student para muestras emparejadas - Exponenciales</b>		
<b>Regiones</b>	<b>Valor de p</b>	<b>Diferencia estadísticamente significativa</b>
Región 1 - 2	0,3923	No
Región 3 - 4	0,0090	Si
Región 5 - 6	0,2343	No

*Tabla 12. Resultados prueba t Student para muestras emparejadas*

Para el análisis en exponenciales se obtuvo lo mismo que en el análisis en pendientes, la región 3 no termorregula igual cuando se compara con el resto de regiones, por tanto, existen diferencias estadísticamente significativas cuando se comparan los datos del centro de la mano con el resto de zonas de estudio, debido a que el centro de la palma tuvo curvas descendentes más uniformes, mientras que el resto de regiones poseen algunas fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, se halló el valor de  $R^2$  para las curvas de termorregulación del total de la muestra y se encontró que para todas las regiones dicho valor es muy próximo a uno, esto quiere decir, que el total de la



muestra se podría analizar con regresiones lineales, los valores de  $R^2$  obtenidos fueron los siguientes:

Regiones	Valor de $R^2$
Región 1	0,7155
Región 2	0,9273
Región 3	0,8643
Región 4	0,9566
Región 5	0,9827
Región 6	0,8669

Tabla 13. Valores de  $R^2$

### 6.6. Observaciones.

De acuerdo a las observaciones anteriores y a las gráficas de tendencia de termorregulación en hombres expuestas, se entiende que, existen varios factores que afectan la temperatura corporal o el proceso de termorregulación [22], evidencia de ello es que al realizar las pruebas a uno de los estudiantes quien presentaba mucho estrés debido a la proximidad de sustentación de su tesis de grado y se encontraba consumiendo analgésicos, presentó unas curvas de enfriamiento totalmente incoherentes con los comportamientos promedio encontrados.

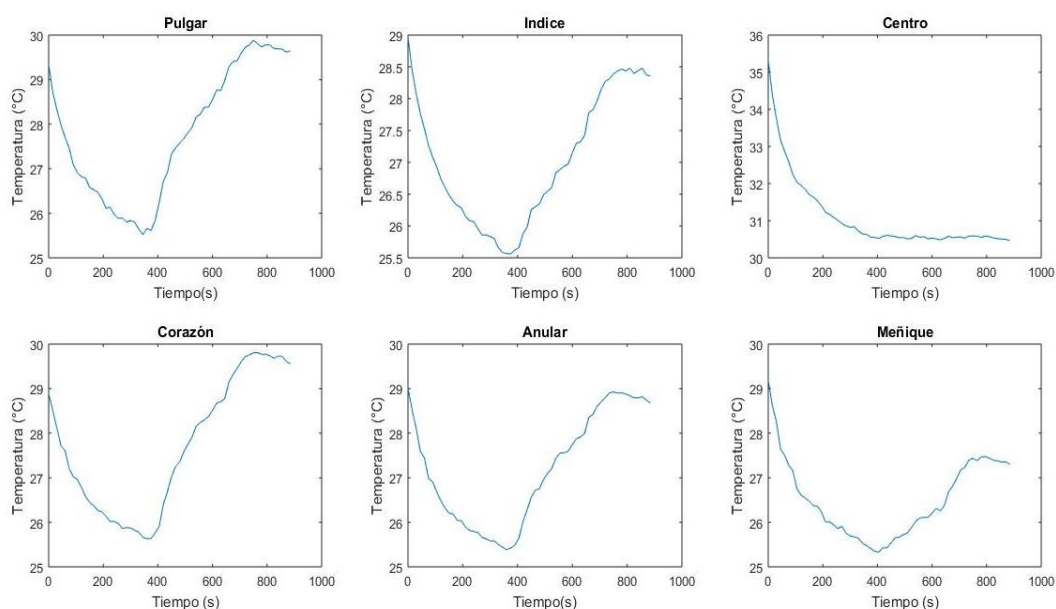
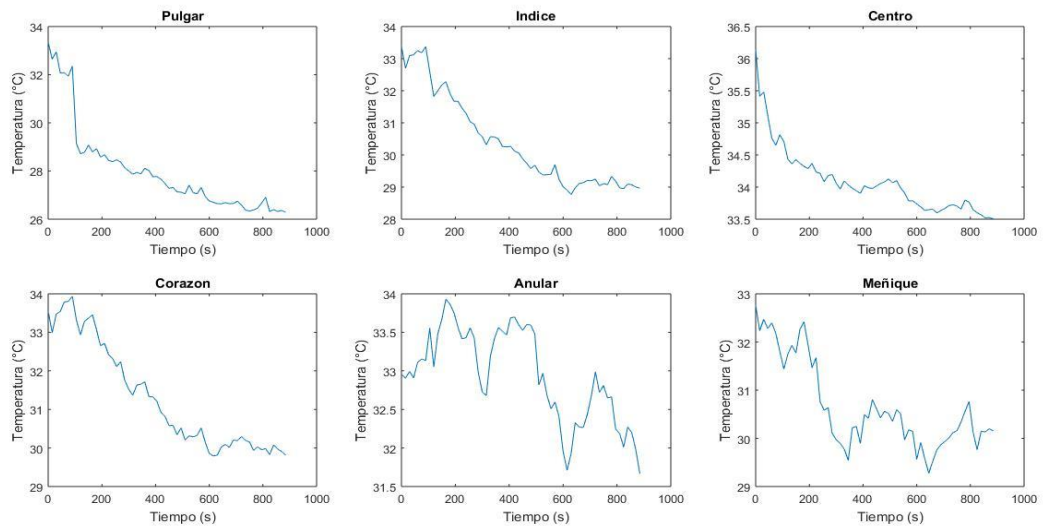


Ilustración 32. Curvas de enfriamiento bajo estrés emocional y consumo de analgésicos

En la gráfica anterior se evidencia un claro trastorno en el proceso de termorregulación de los dedos del sujeto de estudio, de hecho, no hay ninguna autorregulación térmica en dichas zonas, puesto que, la temperatura no tiende a recuperar su estadio inicial, más bien propende por aumentar de manera abrupta, quizás en este caso se debía esperar un tiempo mayor para que la mano lograra restablecer y estabilizar la temperatura. El resultado desviado de estas curvas pudo ser debido al consumo de analgésicos y/o al estrés

emocional que tenía el estudiante en ese momento, dado que el analgésico llamado “nimsulida” está indicado para tratar la fiebre, este puede ser un indicio del pronto descenso de su temperatura y un tardío aumento de la misma [23], [32]. Para tener mejor certeza sobre las condiciones y resultados, se realizó nuevamente el estudio en la misma persona, cuando ya había sustentado su tesis y sin consumo de fármacos y estos fueron los resultados:



*Ilustración 33. Curvas de enfriamiento en condiciones normales.*

En la segunda prueba se hizo el estudio bajo las mismas condiciones de la primera, sin embargo al trazar las gráficas se observó que el comportamiento de la termorregulación fue descendente, es decir, el esperado de acuerdo a los resultados promedio del resto de la muestra masculina, por lo tanto, es claro que uno de los dos factores adversos o la combinación de los dos representó un trastorno en su restablecimiento térmico, y que las gráficas de tendencia promedio obtenidas discriminadas por género sirven como base comparativa para detectar factores que afectan directamente el proceso de termorregulación de las palmas de las manos o comportamientos extraños en la temperatura superficial de las mismas.

## 7. CONCLUSIONES.

- Según las pruebas realizadas para la elección del estímulo, se encontró que es mejor trabajar con uno que no afecte la emisividad de la piel y que permita inducir la temperatura de manera uniforme sobre la superficie de estudio, en el caso de este trabajo el estímulo que cumplió con los parámetros deseados fue un estímulo caliente emanado por una lámpara.
- Se diseñó e implementó un protocolo experimental para la adquisición de imágenes termográficas para la visualización de la distribución de temperatura como respuesta a un estímulo externo caliente en la parte palmar de las manos en personas presuntamente sanas, donde se obtuvieron curvas de enfriamiento de cada región de estudio, las curvas resultantes tuvieron un comportamiento exponencial descendente, por lo tanto, se obtuvo lo esperado, sin embargo, como recomendación, al realizar un estudio en termografía infrarroja es necesario contemplar un mayor número de factores que puedan afectar la temperatura corporal evidenciada en las imágenes termográficas.
- El análisis estadístico para determinar si la muestra tiene una distribución normal se hizo con “Shapiro-Wilk Test”, “d’Agostino-Pearson”, “Jarque – Bera” las cuales evidenciaron un comportamiento normal en los datos obtenidos, donde se aceptó la hipótesis nula para cada una de las regiones de estudio, esto quiere decir que la población estudiada presuntamente sana sí sigue una distribución normal. Se encontró que, para pruebas paramétricas, como la “t Student para muestras únicas” se rechaza la hipótesis alterna la cual indica presencia de diferencias estadísticamente significativas en las regiones estudiadas, es decir, estadísticamente se acepta que la muestra posee una termorregulación homogénea y uniforme. Para el análisis “t Student para muestras emparejadas” se rechazó la existencia de diferencias significativas en la comparación de las regiones de los dedos, sin embargo, se encontró que al comparar la región palmar central con las zonas de las yemas de los dedos si se presentan diferencias estadísticamente significativas.
- Para este trabajo fue imprescindible el uso de un software que pudiera optimizar el procesamiento de las imágenes y de los datos que las mismas arrojaban, ya que el Smart View brinda un panorama inexacto a la hora de segmentar las regiones de estudio dado que, los marcadores no encajan totalmente con las zonas de interés, debido a esto, el uso de un software especializado para el tratamiento de imágenes por medio de un proceso automatizado en MatLab permitió una adquisición de datos en un tiempo mucho menor y con mayor precisión.
- En promedio las zonas que termorregulan de forma más rápida al aplicar un estímulo caliente son las del dedo índice y el dedo pulgar, por otro lado, las que más tardan en restablecer su temperatura son las zonas del dedo meñique y anular.
- Luego de realizar el análisis de pendientes se pudo notar que en promedio las mujeres presentan un restablecimiento de la temperatura superficial más rápido que el de los hombres, pese a que, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre hombres y mujeres.

## 8. REFERENCIAS.

- [1] ChemWiki. (2015). Electromagnetic Radiation. LibreTexts. Recuperado de: [https://chem.libretexts.org/Core/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry/Spectroscopy/Fundamentals\\_of\\_Spectroscopy/Electromagnetic\\_Radiation](https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation)
- [2] Angel Rodriguez Lozano. Planck y el enigma del cuerpo negro. Ciencias. Recuperado de: <http://ciencias.com/biografias/2009/03/03/max-planck-y-el-enigma-del-cuerpo-negro/>
- [3] Ángel Franco García.(2005).La radiación del cuerpo negro. Física con ordenador. Recuperado de: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>
- [4] Ecured.(2013).Ley de Planck. Recuperado de: [https://www.ecured.cu/Ley\\_de\\_Planck](https://www.ecured.cu/Ley_de_Planck)
- [5] E.L Muñoz (2012). Comprobación experimental de la ley de Stefan-Boltzmann en la cátedra de la física III de ingeniería de la UNLP. Universidad Nacional de la Plata.
- [6] M. Vollmer (2010). Infrared Thermal Imaging.University of applied science Brandenburg. Germany.
- [7] Especialistas en regulación y control de temperatura. Tablas emisividad para infrarrojos.Vitoria-Gasteiz. España. Recuperado de: [http://srsl.com/catalogoPDFs/AreaTecnica/TABLAS\\_EMITIVIDAD\\_SENSORES\\_INFRARROJOS.PDF](http://srsl.com/catalogoPDFs/AreaTecnica/TABLAS_EMITIVIDAD_SENSORES_INFRARROJOS.PDF)
- [8] Bob Berry (2017).Factors affecting emissivity. Thermal vision, world class thermal imaging. Recuperado de: <https://thermalvision.ie/factors-affecting-emissivity/>
- [9] Brioschi, M.L., Silva, F.M.R.M., Matias,J.E.F., Dias, F.G., and Vargas, J.V.C. (2008) Infrared imaging for emergency medical services (EMS): using an IR camera to identify life-threatening emergencies.
- [10] J Conesa (2013). Mecanismos de transferencia de calor. Recuperado de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf>
- [11] Universidad nacional experimental de Táchira (2005). Transferencia de calor. Recuperado de: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-165.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-165.htm)
- [12] LC & M INGENIERÍA S.A.S (2015). Convección. Recuperado de: <http://lcmingeneria.blogspot.com/2015/05/conveccion.html>
- [13] A. Mendieta (2015).Fisica de Fluidos. Conduccion. Recuperado de:

<https://alisondajanna7.wordpress.com/ley-de-los-gases-ideales/calor/conduccion-de-calor/>

[14] Comunidad de Madrid (2011). Guía de la termografía infrarroja, Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. Recuperado de:

<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.pdf>

[15] L Vergara (2000). Fabricación y Caracterización de Bolómetros de Si:Ge:O Utilizando Técnicas de Mircomecanizado del Silicio. Unidad Politécnica de Madrid. Recuperado de:

[http://oa.upm.es/473/1/Proyecto\\_Fin\\_de\\_Carrera\\_Lucia\\_Vergara\\_Herrero.pdf](http://oa.upm.es/473/1/Proyecto_Fin_de_Carrera_Lucia_Vergara_Herrero.pdf)

[16] L Neita Duarte (2011). Principios Básicos de la Termografía Infrarroja y su Utilización Como Técnica Para Mantenimiento Predictivo. Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de:

[http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_20999.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_20999.pdf)

[17] Quiñonez, P. G. (2005). Cirugía de la Mano. *Maracaray: Fondo documental Electrónico de FUNDACITE*, 6-15.

[18] Macias A. (2015). Músculos de la Mano. Blog en línea. Recuperado de:

<http://agostina-musculos.blogspot.com/2015/06/musculos-de-la-mano.html>

[19] Schwarz, R. J., & Taylor, C. L. (1955). The anatomy and mechanics of the human hand. *Artificial limbs*, 2(2), 22-35.

[20] Ies Conselleria – Departament D'educació Física Fonaments Biològics – 1r Grau Superior Musculatura Miembro superior 4 (Mano)

[21] López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfología*, 4(1).

[22] Roldan, K. E., Piedrahita, M. A. O., & Benitez, H. D. (2013, September). Design and implementation of a protocol for acquisition and processing of infrared images obtained from hands. In *Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA), 2013 XVIII Symposium of* (pp. 1-7). IEEE.

[23] Botte, M. J. (2003). *Surgical anatomy of the hand and upper extremity*. Lippincott Williams & Wilkins.

[24] Ozdemir, C. (2012). *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms* (Vol. 210). John Wiley & Sons.

[25] Diakides, M., Bronzino, J. D., & Peterson, D. R. (Eds.). (2012). *Medical infrared imaging: principles and practices*. CRC press.

[26] CORREA, Adriana, et al. Base de datos de imágenes de termografía infrarroja para el análisis de la termorregulación de la mano.

[27] BIOMD, Kelly T. Jiménez-Díaz Ing; BIOMD, Andrés C. Correa-Castañeda Ing; BIOMD, Julián A. Giraldo-Restrepo Ing. Protocolo de adquisición de imágenes

diagnósticas por termografía infrarroja. *Medicina & Laboratorio*, 2015, vol. 21, p. 161-178.

[28] SALAZAR, Elvira. Aplicación de la termografía a la psicología básica. 2012. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

[29] Azueto-Ríos, Á., Santiago-Godoy, R., Hernández-Gómez, L. E., & Hernández-Santiago, K. A. (2017). Implementación de un sistema de imagenología infrarroja para la detección vascular del antebrazo y mano. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 38(2), 479-491.

[30] Vargas López, J. I. (2017). Propuesta para la prevención del síndrome túnel del carpo mediante la aplicación de la tecnología de termografía infrarroja.

[31] Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab*. John Wiley & Sons.

[32] Gavidia, G., Soudah, E., Suit, J., Cerrolaza, M., & Oñate, E. (2009). Desarrollo de una herramienta de procesamiento de imágenes médicas en MATLAB y su integración en Medical Gid. *Informe técnico, CIMNE IT-595: Barcelona, España*.

[33] Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International journal of endocrinology and metabolism*, 10(2), 486. Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21-33.

[34] Mendes, M., & Pala, A. (2003). Type I error rate and power of three normality tests. *Pakistan Journal of Information and Technology*, 2(2), 135-139.

[35] Aguayo Canela, M. (2012). Cómo realizar “paso a paso” un contraste de hipótesis con SPSS® para Windows y alternativamente con EPIINFO y EPIDAT:(II) Asociación entre una variable cuantitativa y una categórica (comparación de medias entre dos o más grupos independientes)[on line].

[36] Gómez-Biedma, S., Vivó, M., & Soria, E. (2001). Pruebas de significación en bioestadística. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 50(4), 207-218.

[37] Abreu, J. (2012). Hipótesis, método & diseño de investigación (hypothesis, method & research design). *Daena: International Journal of Good Conscience*, 7(2), 187-197.

[38] Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., & García-Cueto, E. (2015). Goodness of Fit Tests for Symmetric Distributions, which Statistical Should I Use?. *Universitas Psychologica*, 14(1), 245-254.

## **9. ANEXOS**

### ***Anexo 1.***

PROTOCOLO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS Y REGISTRO DE MEDIDAS RELACIONADAS.

### ***Anexo 2.***

ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DE MEDICIÓN.

### ***Anexo 3.***

PRUEBAS DE NORMALIDAD.

### ***Anexo 4.***

DETERMINACIÓN DE DIFERENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS.

### ***Anexo 5.***

ALGORITMO MATLAB.