



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Licenciatura en Ingeniería Física

**ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE ALTERACIONES ANATÓMICAS EN LA  
ESPALDA EMPLEADO LUZ ESTRUCTURADA**

**T E S I S**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**INGENIERO FÍSICO**

Presenta:  
**Esteban Cervantes Zárate**

Dirigido por:  
**Dra. María Lucero Gómez Herrera**  
Co-dirigido por:  
**Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales**

Dra. María Lucero Gómez Herrera  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. Édgar Calva Coraza  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Sergio Alberto Isaías Blanca Álvarez  
Sinodal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Igor Salinas Sánchez  
Sinodal

\_\_\_\_\_  
Firma

Centro Universitario, Santiago de Querétaro, Qro.  
Mayo de 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE ALTERACIONES  
ANATÓMICAS EN LA ESPALDA EMPLEANDO LUZ  
ESTRUCTURADA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FÍSICO

P R E S E N T A

ESTEBAN CERVANTES ZÁRATE

DIRIGIDA POR

DRA. MARÍA LUCERO GÓMEZ HERRERA

&

DR. ÁNGEL LUIS RODRÍGUEZ MORALES



SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO., 2024

*Para Papá y Mamá, sin quienes no estaría aquí hoy.*



# Agradecimientos

## Personales

Las primeras personas a quienes debo agradecer por su invaluable apoyo a lo largo del tiempo es a Papá y Mamá. No solo me ayudaron en los largos meses que tuve que trabajar para redactar esta tesis, sino que todos sus esfuerzos, apoyo y amor se remontan desde el día en que nací, y sin los cuáles no estaría en donde estoy a día de hoy, intentando hacer que se sientan orgullosos. Los admiro y amo mucho a ambos, y sin duda les estaré eternamente agradecido por todo lo que han hecho por mí, y sin duda son unos padres increíbles, los mejores que podría pedir. Espero poder seguir compartiendo todo el éxito futuro con ambos.

Evidentemente, también debo agradecer a Santiago, mi hermano favorito (el único), por su apoyo y acompañamiento durante estos años (desde que nació, literalmente). No imagino cómo hubiera sido este tiempo sin las pláticas y momentos que compartí con él. Podría soltar las preguntas más aleatorias y sacar una tesis de filosofía con eso. Grande. Ojalá se acuerde de mí en los agradecimientos si escribe una tesis de derecho constitucional.

Además, también agradezco a mis abuelos: Lucero y Vicente, de quienes siempre conté con cariño a durante estos años, y estoy contento de que puedan verme llegar hasta donde estoy hoy. Sé que siempre confiaron en mí, y me alegra haber podido contar con ellos en este tiempo.

La siguiente persona a quien debo agradecer es a Luz Ramos. Primero que nada, es la ilustradora oficial de esta tesis. Pero además de eso, me acompañó a lo largo de estos años, compartiendo su alegría conmigo muchas noches, apoyándome en prácticamente cada cosa que he escrito, y esta tesis no ha sido la excepción. Lo único diferente es que este es un trabajo de no-ficción. Disculpa que aquí no hay superhéroes o magos, o el Fin.

Debo también por supuesto agradecer a Melanie Mendoza, a Juan Ramón Chaparro, Jorge Luis Martínez y Maricruz Díaz, viejos amigos de la preparatoria, que me siguieron el rastro y me apoyaron a lo largo de estos años, o al menos compartimos sufrimiento mientras caminábamos juntos.

Y por supuesto, agradezco también a *The L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X League*, a los miembros vivos y a aquellos que quedaron el camino. Gracias a Nico, Ricardo, Kikis, Renato, Jared y Andrew. Así como a los nuevos miembros que llegaron en las temporadas finales: el Mago Soria, Alejandra, Enrickock, Julieta Estrella, Andrea, Isa, Cris, Evelyn (quien además tiene buen gusto en libros), Fernando Vázquez, Dylan, Bruno, Sam, Hugo, Axel, y todo el elenco de personajes.

Por último, a todos los demás amigos y compañeros del Grupo 26.5, con quienes compartí más de cuatro años y medio, y a quienes extrañaré sin duda alguna.

## Académicos

A lo largo de mi carrera, muchas personas me han brindado su apoyo dentro de la academia, y concretamente a lo largo de este trabajo.

Primeramente agradezco a mis directores, por el apoyo y el acompañamiento brindado durante estos meses de trabajo. A la Dra. Lucero Gómez por guíarme como coordinadora en mis años de estudio, y por su apoyo en el cierre del proyecto.

Al Dr. Ángel Luis Rodríguez por su amistad, enseñanza y experiencias compartidas a lo largo de los años que llevamos conociéndonos; por su paciencia, comprensión y apoyo, sin el cual nada de esto habría resultado posible.

A mis sinodales, al Dr. Igor Salinas, por su apoyo y paciencia en los diagnósticos y las revisiones de la tesis también le estoy muy agradecido, ya que no hubiera sido posible realizarla.

Al M.C. Edgar Calva por su guía y orientación, por compartir su conocimiento y experiencias en las últimas etapas de mi carrera universitaria y en los primeros pasos del posgrado en Física Médica.

Al Dr. Sergio Blanca, por su amistad, consejos, conocimiento y atenciones que se remontan, literalmente, desde antes de donde tengo memoria, y ahora estoy muy agradecido de que accediera a formar parte de esta etapa de mi vida.

Agradezco también por el apoyo de la beca del Proyecto Fondo para el Desarrollo del Conocimiento (FONDEC) FIN-2021-23.

Agradezco igualmente a René Preza, encargado del taller en CFATA, quien me ayudó en el diseño y construcción de muchas piezas, y con quien la plática siempre fue buena.

Y, finalmente, a todos los miembros del núcleo académico del programa de Ingeniería Física, y al personal de la Facultad de Ingeniería que me dejó enseñanza y huella en cada etapa de mis años como universitario.

# Resumen

Las patologías posturales más comunes que afectan la columna vertebral son la escoliosis, hiper-cifosis e hiperlordosis. Las técnicas más empleadas de diagnóstico y seguimiento son la exploración física por parte de un especialista, y la medición del ángulo de Cobb (el ángulo entre rectas perpendiculares a la superficie de los cuerpos vertebrales), cada una con sus limitaciones. Recientemente se han hecho propuestas de nuevos métodos de diagnóstico mediante reconstrucciones tridimensionales de cuerpo humano, entre ellas, mediante luz estructurada.

Se desarrolló un sistema que permita prescindir de la mayor parte de las aberraciones y limitaciones de la óptica del sistema para hacer una reconstrucción de espalda mediante luz estructurada, empleando un proyector, una sola cámara, y una pared de fondo como referencia. Se realizó una valoración clínico-postural de 8 voluntarios en los cuáles se encontró escoliosis, hiper-cifosis e hiperlordosis, además de otras patologías relacionadas: secundarias a las mismas en unos casos, y causantes en otros.

El sistema opto-mecánico brindó reconstrucciones tridimensionales a partir de las rectas incidentes que permitieron realizar reconstrucciones con el detalle clínico necesario.

Sobre dichas reconstrucciones se identificó correctamente la presencia o ausencia de escoliosis en el 75% de los voluntarios, en todos los casos en el caso de la hiper-cifosis, pero solo del 37.5% en la hiperlordosis. Se sugiere el estudio de afecciones de los miembros inferiores, usualmente relacionadas a hiperlordosis, cuya consideración en el análisis podría mejorar los resultados.

Sin embargo, los resultados del método óptico podrían llevar a una estandarización de la técnica, y a su vez a optimización de los criterios de diagnóstico para aumentar su fiabilidad.

**Palabras clave:** Luz estructurada, escoliosis, hiper-cifosis, hiperlordosis, reconstrucción de cuerpo humano.

# Abstract

The most common postural pathologies which affect vertebral spine are scoliosis, hyper-kyphosis and hyper-lordosis. The most used techniques for diagnosis and follow-up are physical examination by a specialist, and Cobb's angle measurement -the angle between the perpendicular lines to the surface of vertebral bodies, each with its own limitations. Recently, there have been proposals for new diagnosis techniques using 3D body reconstructions, among them, using structured light.

It was developed a system which may allow to dispense most part of light aberration and limitations to system's optic for a back reconstruction with structured light, using a projector, a single camera and a background wall as reference. A clinic-postural assessment was done to 8 voluntaries, in whom diagnosis for scoliosis, hyper-kyphosis and hyper-lordosis were found, among other related pathologies: in some cases, as consequence, and as cause in another ones.

The opto-mechanic system showed up 3D reconstructions from the incident lines, which allowed to do reconstructions with the clinical detail needed. Using those reconstructions, it was correctly identified the presence -or absence of scoliosis in 75 % of the volunteers, in all cases for hyper-kyphosis, but just 37.5% for hyper-lordosis. It is suggested to study the affections of lower limbs - usually related to hyperlordosis- which consideration in the analysis may help improve the outcomes.

Nonetheless, the results of the optic method could lead to standardization of the technique, and so, to the optimization of the diagnosis criteria to increase its reliability.

**Key words:** Structured light, scoliosis, hyper-kyphosis, hyper-lordosis, body reconstruction.



# Índice general

Agradecimientos . . . . .	II
Resumen . . . . .	IV
Abstract . . . . .	V
<b>1 Introducción . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Problemática . . . . .	1
1.1.1. Situación de las patologías de la espalda en México . . . . .	1
1.1.2. Impacto en el bienestar de las personas . . . . .	1
1.1.3. Breve resumen de las técnicas para la detección de patologías en la espalda . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	2
1.3. Hipótesis . . . . .	2
1.4. Objetivos . . . . .	3
1.4.1. Objetivo general . . . . .	3
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.5. Metodología . . . . .	3
1.5.1. Análisis antropométrico . . . . .	3
1.5.2. Definición de puntos anatómicos característicos . . . . .	4
1.5.3. Diseño de plataforma experimental . . . . .	4
1.5.4. Modelos de reconstrucción . . . . .	6
1.5.5. Análisis comparativo del diagnóstico y el paraclínico . . . . .	6
<b>2 Antecedentes clínicos . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1. Anatomía de la espalda . . . . .	7
2.1.1. La columna vertebral . . . . .	7
2.1.2. Huesos de la espalda superior e inferior . . . . .	9
2.1.3. Sistema muscular . . . . .	10
2.1.4. Sistema nervioso . . . . .	11
2.2. Análisis de las patologías en la espalda y su diagnóstico . . . . .	13
2.2.1. Escoliosis . . . . .	13
2.2.2. Hipercifosis . . . . .	16
2.2.3. Hiperlordosis . . . . .	19
<b>3 Antecedentes técnicos . . . . .</b>	<b>21</b>
3.1. Reconstrucciones tridimensionales del cuerpo humano . . . . .	21
3.2. Luz estructurada . . . . .	22
3.3. Estudios previos de escoliosis con luz estructurada . . . . .	22

3.4.	Modelo pin hole de captura de imagen . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Diseño de la plataforma experimental . . . . .</b>	<b>26</b>
4.1.	Requerimientos . . . . .	26
4.2.	Plataforma experimental . . . . .	27
4.3.	Análisis óptico-geométrico . . . . .	28
4.3.1.	Consideraciones ópticas . . . . .	28
4.3.2.	Triangulación y determinación de coordenadas de un punto . . . . .	28
4.4.	Programación . . . . .	31
4.4.1.	Reconstrucción . . . . .	31
4.4.2.	Determinación patológica . . . . .	33
4.5.	Incertidumbre . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Evaluación experimental . . . . .</b>	<b>35</b>
5.1.	Protocolo de medición en voluntarios . . . . .	35
5.2.	Casos de estudio . . . . .	36
5.2.1.	Sujeto 1: Femenino 24 años . . . . .	36
5.2.2.	Sujeto 2: Femenino 21 años . . . . .	39
5.2.3.	Sujeto 3: Femenino 20 años . . . . .	41
5.2.4.	Sujeto 4: Femenino 19 años . . . . .	42
5.2.5.	Sujeto 5: Masculino 26 años . . . . .	43
5.2.6.	Sujeto 6: Masculino 22 años . . . . .	45
5.2.7.	Sujeto 7: Masculino 22 años . . . . .	47
5.2.8.	Sujeto 8: Masculino 23 años . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Discusión de resultados . . . . .</b>	<b>51</b>
6.1.	Análisis del sistema opto-mecánico . . . . .	51
6.2.	Consideraciones del protocolo y la morfología . . . . .	51
6.3.	Análisis de la validación clínica . . . . .	53
6.4.	Trabajo a futuro . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Conclusiones . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>Referencias . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Planos de la plataforma experimental . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Diagramas de flujo del software . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>C</b>	<b>Tabla de resumen de voluntarios . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>D</b>	<b>Carta de consentimiento informado . . . . .</b>	<b>70</b>

# Índice de figuras

1.1. Diagrama general del sistema opto-mecánico propuesto (elaboración original, por Luz Ramos). . . . .	5
1.2. Líneas blancas paralelas horizontales (1.2a) y verticales (1.2b). Propuesta de patrones para la reconstrucción tridimensional empleando luz estructurada (elaboración propia). . . . .	5
2.1. Corte sagital de la columna vertebral y los límites de sus divisiones (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). . . . .	7
2.2. Vértebra torácica y sus partes principales desde dos vistas diferentes (Quiroz, 2018). . . . .	8
2.3. Vista anterosuperior del hombro izquierdo. Reconstrucción tridimensional mediante una tomografía computarizada (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). . . . .	9
2.4. Cinturas pélvicas femenina (izquierda) y masculina (derecha). La última es más alargada que la primera (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). . . . .	10
2.5. Vista posterior de algunos de los músculos de la espalda (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). . . . .	11
2.6. Músculos superficiales de la espalda y la región modular encargada de inervarlos (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). . . . .	12
2.7. Test de Adam. Una flexión hacia adelante permite evidenciar la presencia de escoliosis (Dandy y Edwards, 2011). . . . .	15
2.8. Medición por computadora del ángulo de Cobb (Papaliadis <i>et. al.</i> , 2017). . . . .	16
2.9. Radiografías de un masculino de 16 años afectado por Scheuermann antes y después de un tratamiento quirúrgico (Yaman y Dalbayrak, 2014). . . . .	18
3.1. Sistema de proyección y captura de imagen (izquierda) y patrón de líneas paralelas proyectadas (derecha) empleados por Scharstein y Szeliski (2003). . . . .	22
3.2. Patrones de Moiré generados sobre la espalda de un afectado por escoliosis contra radiografía (Kim <i>et. al.</i> , 2009). . . . .	23
3.3. Diagrama del modelo de captura de imagen <i>pin hole</i> (elaboración original por Luz Ramos). . . . .	24
4.1. Estructura del sistema ópto-mecánico sin los componentes ópticos (elaboración propia). . . . .	27
4.2. Diagrama de la geometría de los haces de luz y sistema óptico (elaboración propia). . . . .	29
4.3. Identificación de las líneas de fondo y las líneas incidentes para la posterior reconstrucción de coordenadas (elaboración propia). . . . .	32
4.4. Puntos anatómicos característicos y fácilmente apreciables desde una vista posterior (elaboración original, por Luz Ramos). . . . .	34
5.1. Vistas lateral izquierda y posterior del Sujeto 1, femenino de 24 años (elaboración propia). . . . .	37
5.2. Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 1 (elaboración propia). . . . .	38
5.3. Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 2 (elaboración propia). . . . .	39
5.4. Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 3 (elaboración propia). . . . .	41

5.5.	Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 4 (elaboración propia). . . .	42
5.6.	Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 5 (elaboración propia). . . .	43
5.7.	Vistas lateral izquierda (5.7a) y posterior (5.7b) del Sujeto 6, se observa claramente la escoliosis (elaboración propia). . . . .	45
5.8.	Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 6 (elaboración propia). . . .	46
5.9.	Flexión hacia adelante del Sujeto 7, se evidencia claramente la rotoescoliosis y las afecciones secundarias (elaboración propia). . . . .	47
5.10.	Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 7 (elaboración propia). . . .	48
5.11.	Vistas lateral izquierda (5.11a) y posterior (5.11b) del Sujeto 8 (elaboración propia). . . .	49
5.12.	Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 8 (elaboración propia). . . .	50
6.1.	Vista posterior de la imagen umbralizada voluntarios ectomorfo de bajo peso, mesomorfo y ectomorfa (elaboración propia). . . . .	52
A.1.	Estructura del sistema opto mecánico: vista superior (A.1a) y corte transversal del material empleado (A.1b) (elaboración propia). . . . .	59
A.2.	Vista frontal del sistema optomecánico (elaboración propia). . . . .	60
A.3.	Vista lateral del soporte del proyector al eje motorizado (elaboración propia). . . . .	61
B.1.	Estructura general de las secciones del programa (elaboración propia). . . . .	63
B.2.	Estructura del ciclo de lectura de imágenes (elaboración propia). . . . .	64
B.3.	Estructura del ciclo para rotar, alinear y umbralizar (elaboración propia). . . . .	65
B.4.	Estructura general para la identificación de la posición de las rectas incidentes (elaboración propia). . . . .	66
B.5.	Estructura general de los ciclos para identificar las máximas de las pendientes y en ángulo de Cobb entre ellas (elaboración propia). . . . .	67

# Índice de tablas

C.1. Resumen de diagnóstico y herramientas diagnósticas por voluntario (elaboración propia) . . . . .	68
---	----

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Problemática

#### 1.1.1. Situación de las patologías de la espalda en México

Las afecciones posturales de la espalda, concretamente la escoliosis, hipercifosis e hiperlordosis, tienen un gran índice de prevalencia dentro de la población joven y adulta, y su salud, bienestar y capacidad laboral pueden sentir los efectos en mayor o menor medida, en especial si no se atiende (Ibarra, 1986; Zúrita *et. al.*, 2014).

La población más afectada por los padecimientos previamente mencionados es la población adolescente, periodo en el cual comienzan a desarrollarse los cuadros clínicos y, de no ser atendidos, progresan hasta la edad adulta. Es por ello que Zúrita *et. al.* (2014) llevó a cabo un estudio en población preadolescente, que es cuando se pueden comenzar a observar las afecciones. Los resultados de dicho estudio revelaron que el 14.2% de los estudiantes padecían escoliosis, pero una postura incorrecta y otras afecciones estaban presentes en 41.7% de los evaluados, una tasa muy alta de incidencia que eleva el riesgo de padecer escoliosis en edades posteriores que afecten su estilo de vida. Además, encontró que más de la mitad (53.5%) de los evaluados tenían algún grado de sobrepeso, que también, por la masa adicional, afecta la postura del cuerpo. Los resultados encontrados coincidieron con los obtenidos en otras partes del mundo.

La prevalencia de afecciones posturales ha sido señalada años atrás: Ibarra (1986) describió la prevalencia de escoliosis y lumbalgia, y que las alteraciones pueden estar presentes desde la infancia hasta la vejez, pero que sí no son atendidas en forma temprana se agravan y conducen a serias deformaciones, como también afirmó Zúrita *et. al.* (2014) posteriormente; de modo que durante la vida activa de las personas en países industrializados, las afecciones posturales alcanzan una tasa de incidencia mayor al 80%.

#### 1.1.2. Impacto en el bienestar de las personas

Los efectos de los padecimientos previamente descritos ya han sido reportados desde hace varios años. Aunque las primeras etapas, con una curvatura pequeña, el paciente no suele reportar síntomas, a medida que progresa la afección, en la escoliosis hiperlordosis e hipercifosis, se padece de dolor en la zona de la columna vertebral y un aumento de la sensibilidad ante percusiones o flexiones, además de fatiga y una disminución en el rango de movimiento. En ciertos casos, la obesidad también es un factor adicional de riesgo, ya que aumenta el riesgo de lesiones vertebrales que comprometan la movilidad y aumenten el dolor que sufre el paciente (Ibarra, 1986; Dandy y Edwards, 2011).



### 1.1.3. Breve resumen de las técnicas para la detección de patologías en la espalda

Atenderlas requiere, evidentemente, un diagnóstico y acompañamiento por parte del personal médico. El análisis radiológico de columna vertebral, y la medición del ángulo de Cobb son el método de diagnóstico más preciso aceptado por la comunidad médica a día de hoy (G. Lam *et. al.*, 2008; Srinivasalu *et. al.*, 2008). La exploración física sugerida por Dandy y Edwards (2011), entre otros de la literatura médica, es más barata y no invasiva, y permite un diagnóstico inicial de la patología; sin embargo, tiene el inconveniente de no ser cuantificable, o de serlo con un alto grado de incertidumbre, y por su parte las radiografías solo pueden realizarse al paciente un número determinado de veces en intervalos de tiempo cortos, a fin de no exponerle a la radiación.

Actualmente no hay nuevas técnicas ampliamente difundidas como las dos anteriormente mencionadas, pero se ha propuesto a la luz estructurada como una alternativa viable para generar reconstrucciones tridimensionales de la espalda, de las cuales se pueda obtener información para un diagnóstico o seguimiento (Bogdán, 2018, 2020).

Sin embargo, no hay una técnica estandarizada para la luz estructurada, debido a que el análisis de imagen y la reconstrucción depende de los patrones empleados, de los dispositivos de proyección y captura de imagen, de la distancia, o movimiento del cuerpo a reconstruir o del equipo, por mencionar algunas variables (Scharstein y Szeliski, 2003). Es por esta razón que no se puede afirmar que hayan sido exploradas todas las técnicas posibles, y menos aún determinado su efectividad.

## 1.2. Justificación

La meta del proyecto, es poder estudiar y desarrollar un método potencialmente útil de apoyo al diagnóstico y seguimiento de personas con afecciones posturales en la espalda. La reconstrucción con luz estructurada de superficies anatómicas es un método que ya ha sido descrito como viable (Bogdán, 2020), pero que no ha sido extensamente estudiado a la hora de hacer sistemas de diagnósticos (Bogdán, 2018).

Dichas técnicas, y el presente proyecto, podrían apoyar al diagnóstico y al seguimiento como una forma de cuantificar el grado de las afecciones determinadas por los profesionales de la salud mediante exploraciones como las descritas por (Dandy y Edwards, 2011), sin tener que recurrir a las radiografías, con un método no invasivo y que podría tener un costo menor.

Permitiría el análisis y estudio de una nueva propuesta de reconstrucción con luz estructurada y contribuiría al número de técnicas ya propuestas, además de estudiar su efectividad, certeza y coincidencia a la información arrojada por radiografías y requerida por los traumatólogos y fisioterapeutas.

Es posible que, a lo largo del proyecto, algunas propuestas no funcionen o sean complicadas de analizar (Scharstein y Szeliski, 2003). Sin embargo, dado que la totalidad del sistema óptico es reutilizable, no supondría un costo adicional explorar alguna otra técnica o algoritmo para el procesamiento de la imagen y la información resultante.

Evidentemente, el presente proyecto no pretende reemplazar las técnicas de diagnóstico actuales, puesto que ya han sido extensamente aceptadas por la comunidad médica, pero podría contribuir como una técnica de apoyo y arrojar resultados que puedan ser revisados e interpretados por los especialistas, dándoles más información a la hora de realizar un diagnóstico que sea más preciso, y las personas puedan llevar el tratamiento adecuado posteriormente.

## 1.3. Hipótesis

Empleando la técnica de la luz estructurada, a partir de imágenes de la espalda de personas y conociendo parámetros del sistema óptico (tales como la distancia del sistema a la persona, ángulo de



triangulación y las especificaciones de ópticas del proyector y el sensor), es posible realizar una reconstrucción tridimensional de sus espaldas para hacer mediciones cuantificables que, tras establecer un modelo anatómico, indiquen la presencia de escoliosis, hiperlordosis o hiper cifosis, equivalentes a un ángulo de Cobb mayor a 10 grados, con una correspondencia mínima del 80 % con diagnósticos convencionales.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Proponer y desarrollar un método para apoyo al diagnóstico y seguimiento de alteraciones anatómicas en la espalda prevalentes en la población joven y adulta (concretamente de escoliosis, hiperlordosis e hiper cifosis) a través de una reconstrucción tridimensional empleando luz estructurada que permita cuantificar el grado de dichas patologías y monitorear el progreso de los afectados, y cuyos resultados correspondan y complementen a las técnicas de diagnóstico mediante exploración y radiografías.

### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Hacer un análisis anatómico de la columna vertebral en condiciones fisiológicas de diversos tipos somáticos para obtener información para conocer su morfología con y sin la presencia de patologías posturales.
2. Desarrollar un modelo de evaluación estática como medio de comparación de condiciones patológicas mediante puntos anatómicos característicos, prominentes y distinguibles en la espalda de las personas.
3. Diseñar y construir una plataforma experimental, con base en el modelo de evaluación estática y que satisfaga sus requerimientos, que permita realizar una reconstrucción tridimensional de una superficie anatómica empleando luz estructurada.
4. Desarrollar un programa o una interfaz gráfica que, mediante un árbol de decisión, permita identificar y cuantificar las alteraciones anatómicas.
5. Realizar un análisis comparativo con las técnicas convenciones para la identificación de alteraciones en la columna (exploración y radiografías) para determinar la efectividad del método.

## 1.5. Metodología

### 1.5.1. Análisis antropométrico

Para poder definir el modelo anatómico que permite realizar el estudio de apoyo al diagnóstico de una posible patología postural, se definieron primero los puntos anatómicos característicos a detectar y emplear en el sistema de análisis de imagen.

Sin embargo, para definir dichos puntos, primero se realizó un análisis anatómico supervisado por un profesional de la salud de la Escuela Nacional de Estudios Superiores [ENES] de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] Campus Juriquilla.

De este análisis por parte del especialista se recabaron imágenes de la espalda y diagramas, así como los parámetros y criterios de diagnóstico que determinan la presencia o ausencia de una escoliosis, cifosis o lordosis patológicas.



### 1.5.2. Definición de puntos anatómicos característicos

Con los datos obtenidos del análisis antropométrico definieron los puntos anatómicos característicos para realizar las mediciones durante el análisis de imágenes.

Dichos puntos anatómicos fueron componentes del sistema óseo, apreciables a simple vista y con un examen físico de los participantes ectomorfos del estudio. Para el análisis de la columna vertebral, se escogieron las apófisis espinosas de las vértebras C7-T1, T12 y S2, además de la protuberancia occipital externa.

En la espalda superior los puntos anatómicos más característicos son los acromiones, el ángulo inferior de la escápula y su borde medial, que permiten a su vez realizar la medición de la distancia interescapulovertebral. Sin embargo, dado que alteraciones en sus posiciones naturales son consecuencia de una amplia variedad de afecciones, en especial de los miembros superiores, no se tomaron en cuenta. Para la espalda inferior se eligieron las crestas ilíacas, así como la espina ilíaca posterosuperior.

Con base en los puntos señalados y la información obtenida por el grupo especializado, se elaboró un modelo tridimensional ideal que se usó de comparación para determinar la presencia de patologías en los casos de estudio de etapas posteriores.

A lo largo del proceso participaron los profesionales médicos para que los parámetros empleados, y la información arrojada por el modelo corresponda a la realidad, y su nivel de certeza sea el mayor posible con respecto a las mediciones obtenidas con las técnicas estándar de la literatura médica.

### 1.5.3. Diseño de plataforma experimental

#### Especificaciones y funciones del sistema optomecánico

En propuestas anteriores de reconstrucción tridimensional con luz estructurada, Scharstein y Szekely (2003) emplearon un sistema óptico consistente en un proyector y una cámara fotográfica para reconstruir figuras geométricas complicadas. Por su parte, (Bogdán, 2020) empleó un sistema similar, pero para realizar un mapa topográfico mediante patrones de Moiré en lugar de una reconstrucción tridimensional. Para el proyecto se propone un sistema con los mismos elementos, indispensables para la técnica, sin embargo, se incorporará un electromotor para realizar un barrido con los patrones, de modo que incidan sobre una mayor superficie, y a través de varias imágenes realizar la reconstrucción tridimensional.

El sistema propuesto, está ilustrado en la figura 1.1 y consta de los siguientes elementos:

- Un soporte rígido, de aluminio, que permita sostener la cámara fotográfica a una altura de aproximadamente 1.20 metros. Deberá también sujetar un electromotor, que su vez sujetará el proyector.
- Una cámara fotográfica con capacidad de variación de sensibilidad (ISO) y ajuste de velocidad del obturador, que permita capturar imágenes en un ambiente oscuro con la resolución suficiente para permitir su análisis.
- Un proyector de mínimo 6,000 lumens, que permita proyectar patrones de líneas; montado sobre un soporte que lo sostenga a cierto ángulo.
- Debe ser colocado cuidando que el centro focal del proyector se encuentre sobre el de la cámara. Mediante un actuador lineal, deberá de desplazarse verticalmente, para hacer incidir los patrones sobre áreas diferentes de la espalda en cada imagen, y así cubrir un área mayor. Dicho actuador, estará conectado a un interruptor y a un microprocesador que, mediante un sistema de control, permita desplazarlo en cierto intervalo de altura y tiempo, para hacer un barrido con los patrones.

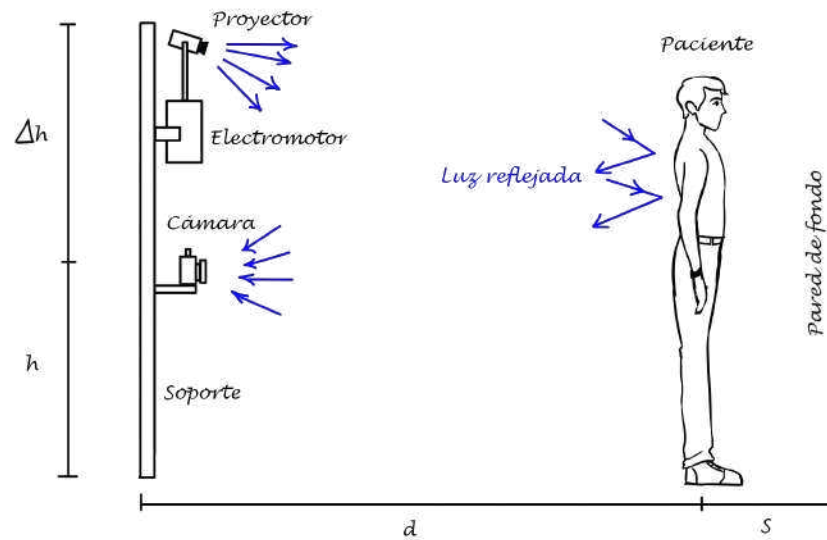


Figura 1.1: Diagrama general del sistema opto-mecánico propuesto (elaboración original, por Luz Ramos).

Para el correcto funcionamiento del sistema de reconstrucción fue usado en una habitación a oscuras, como los sistemas de Scharstein y Szeliski (2003) y Bogdán (2020), para poder marcar el contraste de los patrones con el entorno y facilitar el procedimiento de análisis de imagen.

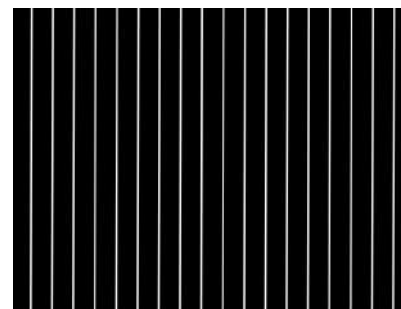
Bajo la supervisión del especialista médico, en el sistema propuesto, los voluntarios se colocaron de espaldas a una distancia reducida de la pared, pero considerable del sistema opto-mecánico ( $s$  y  $d$  respectivamente en el diagrama de la figura 1.1) para marcar este contraste con el entorno.

### Patrones propuestos

Los patrones que se probaron están formados de líneas blancas horizontales y verticales, (Figura 1.2), para evitar usar los gradientes de luces y sombras, y de este modo facilitar la umbralización



(a) Patrones horizontales.



(b) Patrones verticales.

Figura 1.2: Líneas blancas paralelas horizontales (1.2a) y verticales (1.2b). Propuesta de patrones para la reconstrucción tridimensional empleando luz estructurada (elaboración propia).



y reducir el error en la reconstrucción de las regiones sobre las que se incidió la luz. Las regiones iluminadas variaron en cada fotografía por el desplazamiento del proyector mediante el electromotor.

#### 1.5.4. Modelos de reconstrucción

La reconstrucción tridimensional se realizó al completar la construcción y pruebas del sistema opto-mecánico y de los patrones de proyección, aunado a la información proveniente del profesional médico.

Se desarrolló un modelo de reconstrucción tridimensional basado en las imágenes brindadas por profesionales, donde se empleó la luz reflejada para posteriormente evaluarla mediante el modelo anatómico desarrollado con anterioridad.

No fueron necesarias correcciones de la aberración óptica de las fotografías, por ser despreciable, y se llevó a cabo solo un análisis geométrico de la información capturada mediante un modelo de captura ideal *pin hole*.

Con la información, determinaron los bajo relieves de la superficie de la espalda, que para los voluntarios (hantomorfos) coincide usualmente con las apófisis espinosas de la columna vertebral, entonces se reconstruyó la posición de la columna desde un punto de vista posterior, y la información de profundidad se usó como criterio para determinar la presencia de hipercifosis e hiperlordosis.

#### 1.5.5. Análisis comparativo del diagnóstico y el paraclínico

Una vez que el sistema de análisis (sistema opto-mecánico, algoritmo de reconstrucción y red neural) se completó, se realizaron estudios de caso con los voluntarios para determinar la certeza del método. Este análisis se realizó con el apoyo de los datos facilitados por profesionales de la salud e instituciones colaboradoras de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] y la Universidad Autónoma de Querétaro [UAQ].

Con los resultados de la determinación de alteraciones anatómicas, a partir de la reconstrucción mediante luz estructurada, se comparó si coincide con la presencia o ausencia de alguna alteración anatómica con los datos del diagnóstico previo por profesionales.

## Capítulo 2

# Antecedentes clínicos

### 2.1. Anatomía de la espalda

#### 2.1.1. La columna vertebral

La columna vertebral es, junto con el cráneo, el conjunto de huesos más importantes del sistema óseo: posee la función de proteger la médula espinal y las funciones del sistema nervioso central, además de dar soporte al resto de estructuras óseas que a su vez albergan y protegen otros órganos vitales y dan movilidad a un individuo, como lo son las costillas, las escápulas o el cráneo. De modo que, de manera continua se encuentra sosteniendo la mayor parte del peso del cuerpo humano, junto a los fémures (Moore *et. al.*, 2013; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Esta estructura, también conocida como espina dorsal, está constituida por 33 o 34 unidades óseas denominadas vértebras. Las vértebras se encuentran clasificadas en cuatro categorías, de acuerdo a su posición. En orden cefalocaudal son: 7 cervicales, 12 torácicas (donde se relacionan con las costillas), 5 lumbares, 5 sacras y 3 o 4 coccígeas, estas últimas 8 u 9, se encuentran soldadas entre sí, formando el sacro y el cóccix; en la Figura 2.1, podemos observar las divisiones claramente (Moore *et. al.*, 2013; Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

La longitud de la columna y el tamaño de las vértebras depende de la estatura de la persona, pero su morfología se mantiene constante en un paciente sano, incluyendo sus curvaturas: De forma natural, en un paciente aparentemente sano, la columna vertebral posee cuatro curvaturas, apreciables claramente desde el plano lateral. Usando como referencia la Figura 2.1, la primera de ellas es cervical y convexa hacia el frente (lordosis); la segunda, la torácica, es convexa hacia atrás (cifosis); la tercera es de nuevo hacia adelante (lordosis),



Figura 2.1: Corte sagital de la columna vertebral y los límites de sus divisiones (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

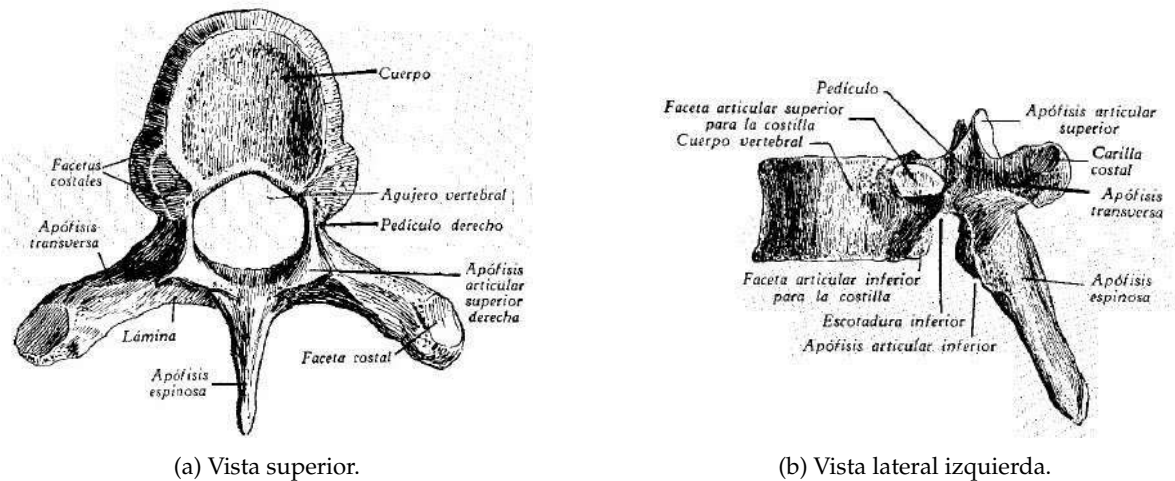


Figura 2.2: Vértebra torácica y sus partes principales desde dos vistas diferentes (Quiroz, 2018).

y está presente en las vértebras lumbares; y finalmente, la cuarta, en el sacro, es convexa de nuevo hacia atrás (cifosis). Con excepción de la cuarta (por ser un componente óseo soldado y por tanto fijo), las curvaturas son móviles, adaptables a los movimientos de flexión o extensión propios de la actividad diaria del ser humano (Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Las vértebras no son todas iguales, pues poseen morfología distinta dependiendo de su sección, aunque también hay diferencias entre las vértebras pertenecientes a la misma sección de la espina dorsal. Sin embargo, hay características generales a todas ellas, se enumeran a continuación y se pueden apreciar en la Figura 2.2 (Quiroz, 2018; Moore *et. al.*, 2013; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a):

1. Cuerpo vertebral. Una estructura ósea más o menos cilíndrica donde se encuentra el eje de rotación de la vértebra.
2. Pedículos. Dos estructuras que surgen de la zona posterolateral del cuerpo vertebral y se conectan a las apófisis transversales.
3. Apófisis transversales. Estructuras que apuntan transversalmente hacia afuera del cuerpo humano.
4. Apófisis espinosa. El saliente más prominente de la vértebra se encuentra en dirección posterior de la misma. Es fácilmente identificable al realizar el individuo una flexión hacia adelante.
5. Apófisis articulares. Las hay inferior y superior, y se denominan así porque se conectan a las de las vértebras suprayacentes y subyacentes.
6. Láminas vertebrales. Conectan las apófisis transversales con la espinosa.
7. Agujero o foramen vertebral. Formado por el cuerpo vertebral y las apófisis, por donde pasan componentes del sistema nervioso central y del sistema circulatorio.

Las vértebras se encuentran unidas las unas con las otras mediante sus apófisis articulares, como se mencionó previamente, donde se ponen en contacto las unas con las otras (Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Al espacio más importante entre las vértebras se le conoce como disco intervertebral y está entre los cuerpos de las vértebras. Se le considera una articulación cartilaginosa: está conformado por un

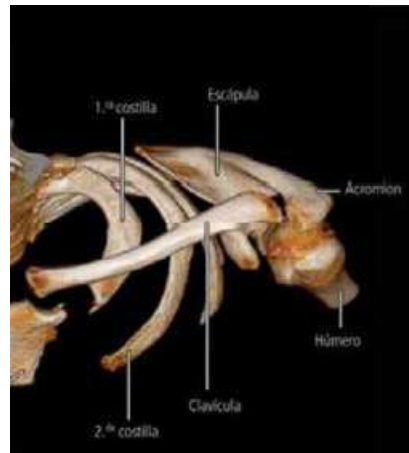


Figura 2.3: Vista anterosuperior del hombro izquierdo. Reconstrucción tridimensional mediante una tomografía computarizada (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

núcleo pulposo, blando y gelatinoso, rodeado a su vez de un anillo fibroso, adherido a las caras de las vértebras que unen. El disco posee un grosor variable, dependiendo de las vértebras que unen, siendo mayor en las lumbares y menor en las torácicas (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

A su vez, la columna vertebral también, se encuentra recubierta por dos largas láminas fibrosas, denominadas como ligamentos longitudinales anterior y posterior, que se adhieren sobre los cuerpos vertebrales y los discos intervertebrales, extendiéndose desde el hueso occipital hasta el sacro, en el caso de la anterior, y hasta el cóccix, en el caso de la posterior (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Por su parte, cabe mencionar también que las láminas se encuentran unidas con las adyacentes mediante los ligamentos amarillos, y las apófisis (también referidas en la literatura médica como procesos) mediante los ligamentos interespinosos (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

### 2.1.2. Huesos de la espalda superior e inferior

El sistema óseo de la espalda no se compone únicamente de la columna vertebral, también posee otros huesos tanto en la espalda inferior como en la superior. Algunos de los huesos que podemos distinguir en los primeros pasos de una exploración física son las costillas, que conforman 12 pares de diferente tamaño cada una, pero morfología similar. Todas parten de los costados del cuerpo de las vértebras torácicas en la que se conoce como cabeza vertebral, y las diez primeras (en sentido cefalocaudal) convergen en el esternón, en la parte anterior del cuerpo, formando la caja torácica. Las siete primeras se unen mediante cartílagos costales individuales, mientras que para la 8va, 9na y 10ma, sus cartílagos forman el llamado arco costal. Por su parte, las últimas dos son las que se conocen como costillas flotantes, pues solo se apoyan en las vértebras (Quiroz, 2018; Moore *et al.*, 2013; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019b).

Además, es necesario mencionar otros huesos que se, aunque pueden también considerarse huesos de los miembros superiores, los cuales son la clavícula y la escápula, que constituyen lo que se conoce como cintura pectoral (Figura 2.3), que también es la base del húmero, hueso del brazo (Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Las escápulas son dos huesos planos, en apariencia simétricos, de forma triangular que se apoyan sobre la caja torácica (con las costillas como componente óseo, como se mencionó previamente). Posee una saliente en sentido lateral denominada acromion, fácilmente distinguible a simple vista. De la misma forma, se aprecian fácilmente un borde lateral y un borde medial, así como un ángulo inferior,

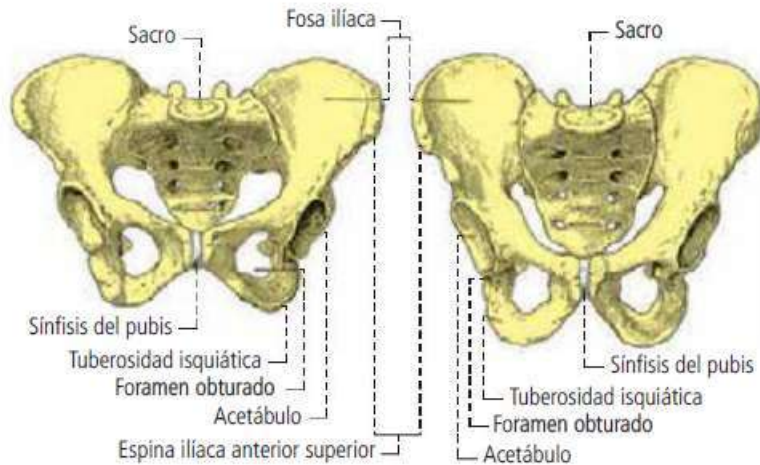


Figura 2.4: Cinturas pélvicas femenina (izquierda) y masculina (derecha). La última es más alargada que la primera (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

muy notorio al realizar movimientos con los brazos (Moore *et. al.*, 2013; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

En la espalda inferior, tenemos la cintura pélvica, sin embargo, también se considera como parte de los miembros inferiores según Latarjet y Ruíz-Liard (2019a), y está formada en realidad por varios componentes óseos. Los más grandes son los dos huesos coxales, que poseen simetría planar, y cuyos componentes más apreciables en una exploración física son las crestas ilíacas y las espinas ilíacas superiores anterior y posterior, distinguibles en las caderas. Es en estos huesos que se articula el fémur, en la fosa acetabular. Ambos huesos están unidos mediante el sacro en la parte posterior y en la parte anterior por la sínfisis del pubis, formando la pelvis, como se muestra en la Figura 2.4.

### 2.1.3. Sistema muscular

Todo este conjunto de huesos que forma la región que llamamos espalda tiene numerosas articulaciones, constituyentes de músculos y ligamentos. La gran mayoría de los músculos de esta área se consideran planos, es decir que son músculos esqueléticos de gran superficie y poco grosor. Se encuentran ligados al sistema óseo mediante tendones, la mayoría se controlan de forma voluntaria, y muchos de ellos se pueden explorar a simple vista. Los músculos que se encuentran inmediatamente bajo el tegumento y el tejido adiposo se denominan músculos superficiales, y los que están bajo ellos, músculos profundos (Hart-Davis, 2011).

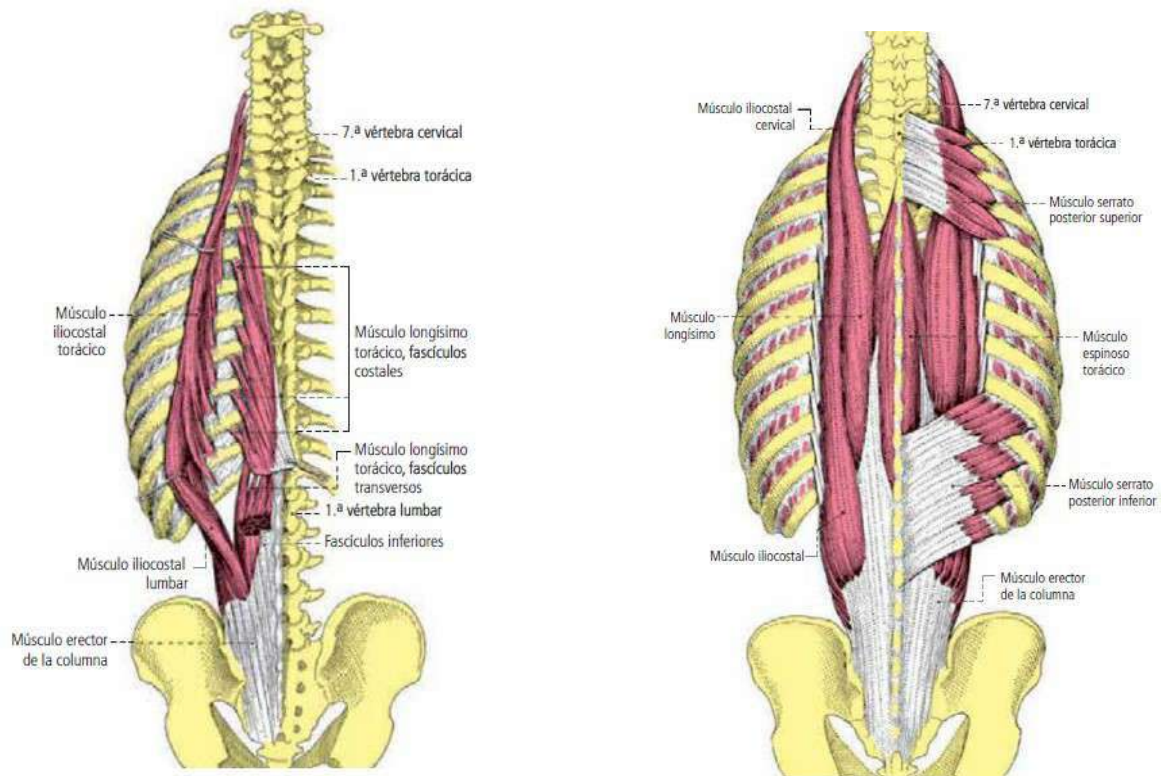
Como ya se mencionó previamente, las vértebras poseen apófisis transversales y espinosas, y a los espacios entre estas se denominan surcos vertebrales. Estos surcos están ocupados el músculo iliocostal, el músculo longuísimo torácico, el músculo espinoso torácico y los músculos transversoespinosos (Hart-Davis, 2011; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Los primeros tres músculos son músculos superficiales, que poseen la cualidad de estar individualizados en la región de las vértebras torácicas, pero se cofunden a la altura de las lumbares en el músculo erector de la columna, originado en las estructuras óseas de dicha región: las vértebras lumbares, la cresta media sacra y la espina ilíaca posterosuperior como se muestra en la figura 2.5. Cabe mencionar que estos músculos poseen además varias inserciones en distintos puntos de la columna vertebral y las costillas, dependiendo del músculo en cuestión (Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

A su vez, los músculos transversoespinosos son músculos profundos, y pueden ser divididos en tres: semiespinosos, multífidos y rotadores, cada uno con sus respectivas funciones, inserciones e incluso subdivisiones (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

Sin embargo, hay más músculos en la región, son músculos superficiales, anchos y voluminosos como los son los músculos serratos posteriores superiores e inferiores, que conectan las costillas y las vértebras de la región donde se encuentran (Figura 2.5). También están los serratos anteriores que sostienen la escápula contra las costillas desde la región anterior de la caja torácica. En la región lumbar, se encuentra el músculo cuadrado lumbar, de compleja constitución (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a, 2019b).

Así mismo, recubriendo los músculos mencionados anteriormente, están también los músculos dorsales anchos, y en la parte superior de la espalda, se encuentran el músculo trapecio, los músculos romboides mayor y menor, y el músculo elevador de la escápula, sin embargo varios autores como Latarjet y Ruíz-Liard (2019a) los estudian como parte de los miembros superiores, de la misma forma que los músculos en torno a la cintura pélvica, así como los músculos propios de la región cervical (Hart-Davis, 2011; Moore *et. al.*, 2013; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a, 2019b).



(a) Músculo iliocostal y longuísimo, y sus inserciones, ambos se confunden en la masa del músculo erector de la columna.

(b) Músculos iliocostales, longuísimos y espinoso torácico, los tres recubiertos por los músculos serratos.

Figura 2.5: Vista posterior de algunos de los músculos de la espalda (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

#### 2.1.4. Sistema nervioso

Los músculos de la espalda necesitan inervaciones, naturalmente, para poder realizar los movimientos articulares en conjunto con los huesos y ligamentos, permitiendo al ser humano realizar sus tareas cotidianas. La espalda posee uno de los componentes más importantes del sistema nervioso: la



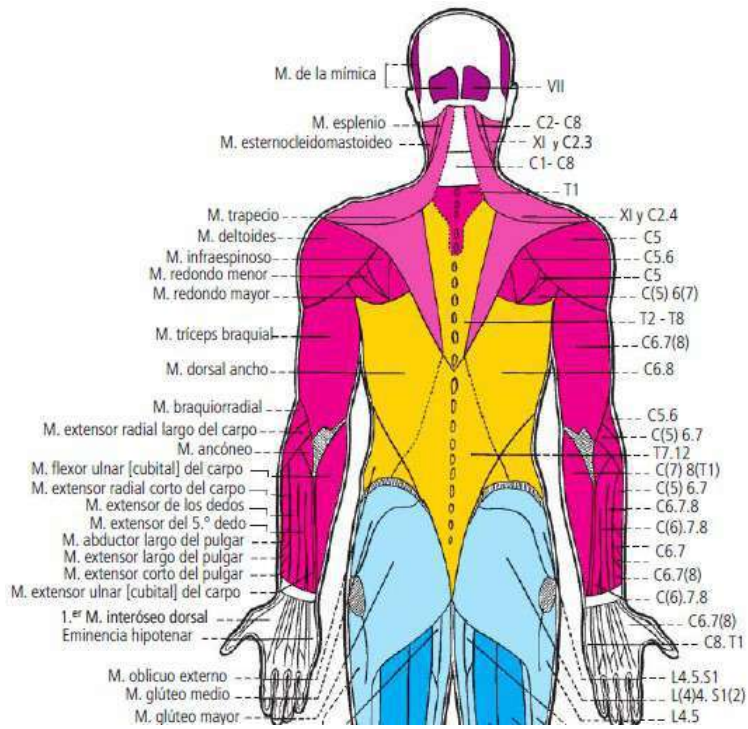


Figura 2.6: Músculos superficiales de la espalda y la región modular encargada de inervarlos (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).



médula espinal, que discurre a través de los forámenes vertebrales, y de la cuál surgen otras inervaciones hacia distintas regiones del cuerpo (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

De la médula espinal, y por tanto de la columna vertebral, es que parten muchos otros nervios, que forman el sistema nervioso periférico, encargado de inervar todo el cuerpo humano, con la excepción de aquellas zonas inervadas por los pares craneales (Mai y Paxinos, 2011; Total Community Care, s.f.).

El estudio del sistema nervioso humano es extenso, y un trabajo complejo incluso en el campo de la medicina y las neurociencias. Sin embargo, limitándonos a la región de la espalda y la columna vertebral, es importante mencionar que existen segmentos modulares de la médula espinal, los cuales también están divididos en 8 cervicales, 12 torácicos, 5 lumbares, 5 sacros y una sección coccígea. Existe cierta oblicuidad en sentido descendiente entre los módulos y las vértebras donde se alojan de modo que se nombran dependiendo del espacio intervertebral por el que surgen sus nervios espinales (Mai y Paxinos, 2011; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a; Total Community Care, s.f.).

De cada una de estas secciones surgen dos pares de raíces, un par por cada lado: los nervios espinales, a partir de los cuales comienza el sistema nervioso periférico. Conforme se alejan de la médula y se adentran en el cuerpo humano se ramifican y distribuyen para dar inervación tanto a la piel como a los músculos y los órganos (en la figura 2.6 se pueden apreciar algunas de las regiones superficiales de la espalda y su inervación) (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a).

## 2.2. Análisis de las patologías en la espalda y su diagnóstico

### 2.2.1. Escoliosis

#### Descripción

La escoliosis es una de las asimetrías posturales más frecuentes dentro de la población. Inicialmente se le describió como una curvatura anormal de la columna vertebral, vista fácilmente desde el plano coronal, donde la espalda suele tomar una forma de C o de S, dependiendo del caso o de la zona afectada (Díaz *et. al.*, 2009; Mayo Clinic, 2022b; Medtronic, 2020).

Sin embargo, más recientemente, la comunidad médica y diversos autores han reconocido que es una afección tridimensional, ya que las vértebras afectadas presentan en numerosos casos rotación que pueden alterar la cifosis dorsal y la lordosis lumbar (Díaz *et. al.*, 2009; G. Lam *et. al.*, 2008).

Es una enfermedad compleja, ya que podemos considerar a la columna vertebral como un sistema tanto óseo como fibro-cartilaginoso, y las deformidades en la estructura afectan a ambos componentes (Díaz *et. al.*, 2009; Quiroz, 2018). Cabe mencionar también, que desde sus primeros estudios estadísticos, se ha demostrado que se suele relacionar con otras afecciones posturales, e incluso con la disminución de la densidad ósea en otros huesos (Carter y Haynes, 1987).

La escoliosis no tiene una sola causa, aunque se suelen clasificar en 4, sin contar las lesiones traumáticas, las cuales son (Dandy y Edwards, 2011; Medtronic, 2020):

- Idiopática: La más común, no tiene causa aparente.
- Congénita: Por defectos genéticos, la espalda se desarrolla mal en el periodo embrionario y fetal. Puede involucrar la ausencia de vértebras y tiene los casos más severos, ya que además progresa con el tiempo.
- Neuromuscular: Por desórdenes neuromusculares que tensan la espalda de forma errónea.
- Inicio temprano: Se desarrolla durante la infancia y preadolescencia, que se puede ser congénita o neuromuscular, pero también por determinados síndromes y es asociada con problemas cardiorrespiratorios.



## Incidencia

El estudio de la escoliosis y su incidencia entre la población inicia hacia los años 80, entre algunos de los primeros estudios, Carter y Haynes (1987) encontraron la presencia de esta patología en el 8.3 % de los adultos de entre 25 y 74 años, con una tendencia mayor en las mujeres (10.7 %), casi el doble que en los hombres (5.6 %). Desde entonces, se acepta que la escoliosis es una afección postural que afecta a casi una décima parte de las personas aproximadamente, y los estudios posteriores se han centrado en las poblaciones por mayor susceptibilidad de desarrollar alguna escoliosis patológica que pueda poner en riesgo su salud.

Una vez que los estudios arrojaron que la escoliosis tiene una tendencia progresiva con la edad, y de la misma forma es mayor en mujeres que en hombres (Dickson, 1983; Kebaish *et. al.*, 2022), se han llevado a cabo estudios de niños y adolescentes para determinar la incidencia y factores de riesgo en este grupo de edad, antes de que se vuelva patológica.

En estudios llevados a cabo en niños de educación primaria se han encontrado que, al igual que la población adulta, alrededor de una décima parte presenta algún tipo de escoliosis. Sin embargo, la incidencia se duplica en aquellos que tienen sobrepeso, puesto que representaban casi la mitad de los casos con presencia de la patología, además de que también se identificó como factor de riesgo el sedentarismo, la mala postura y el uso prolongado de dispositivos electrónicos con pantallas; aunque también el presentar deformidad plantar y afecciones en los miembros inferiores se consideran factores importantes de riesgo. (Cunha-Ciaccia *et. al.*, 2017; Zúrita *et. al.*, 2014).

En México en concreto, donde la obesidad infantil ha aumentado en los últimos años, se ha visto también un aumento de la escoliosis, agravada por la mala postura, ya que se estima que 4 de cada 10 estudiantes tienen una postura anómala en su día a día. En la adolescencia casi el 3 % de los jóvenes presentan una escoliosis con curvatura mayor a 10°, y el 10 % de estos requiere tratamiento quirúrgico en algún punto (Zárate-Kalfópulos *et. al.*, 2018; Zúrita *et. al.*, 2014).

## Efectos en la salud

La escoliosis presenta el mayor riesgo cuando no recibe el tratamiento adecuado. La mayoría de las alteraciones anatómicas de la espalda presentan como síntoma general dolor en la zona afectada como cervicalgia o lumbalgia (Ramírez-Restrepo, 2015), además de la fatiga, alteraciones en la sensibilidad y deformidades progresivas en la postura o el andar de la persona; aunque cabe mencionar que las afecciones posturales tienen variadas manifestaciones (Ibarra, 1986).

En los casos más graves (curvaturas mayores a 20°), existe el riesgo incluso de insuficiencia respiratoria o ciertos grados de parálisis, e incluso a largo plazo degradación del cartílago y del tejido de los discos intervertebrales, así como afecciones neuromusculares en la zona afectada en los casos donde la escoliosis no tiene este origen (Ibarra, 1986; Ramírez-Restrepo, 2015).

Además, se debe de prestar especial atención a las afecciones congénitas, ya que son las que más afectan la biomecánica de la columna vertebral con lesiones vertebrales, cuyo daño le generaría más dolor a los afectados (Ibarra, 1986).

Como ya se mencionó previamente, la escoliosis es progresiva con el tiempo y con la edad, y al no llevar el tratamiento adecuado, conforme aumente la curvatura anormal, el paciente puede ver comprometida su motricidad, y por tanto su capacidad laboral y su habilidad de realizar tareas cotidianas (Ibarra, 1986; Kebaish *et. al.*, 2022; Zúrita *et. al.*, 2014).

## Métodos de tratamiento y diagnóstico

Dandy y Edwards (2011) surgieron dividir la columna vertebral en varias zonas de análisis para la exploración ortopédica por parte de un traumatólogo. Dichas zonas corresponden a la división de las vértebras convencional, ya aceptada por la comunidad médica, como lo indican Moore *et. al.* (2013), Quiroz (2018) o Latarjet y Ruíz-Liard (2019a), pero cabe recordar que estas son técnicas

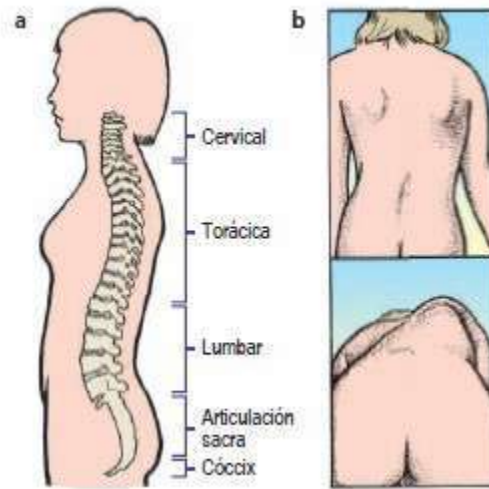


Figura 2.7: Test de Adam. Una flexión hacia adelante permite evidenciar la presencia de escoliosis (Dandy y Edwards, 2011).

de exploración y diagnóstico preliminares, ya que en caso de detectarse afecciones más graves es necesario inspecciones radiológicas.

Para la exploración cervical se recomienda poner al paciente de pie para comprobar que el cuello pueda soportar el peso de la cabeza, realizar observaciones de la posición antes de hacer pruebas de movilidad que requieran flexión y extensión del cuello, flexión lateral y rotación lateral, y observarlas desde sus planos correspondientes. Aplicar tensión a la columna cervical suele ser fútil (Dandy y Edwards, 2011; Ministerio de Salud Paraguay, 2017).

Cuando se analiza la columna torácica es cuando se suele poner en evidencia el padecimiento de cifosis o de escoliosis, y se sugiere habitualmente a los pacientes realicen una flexión hacia adelante, postura en la cual se marcan más las afecciones posturales en lo que se conoce como Test de Adam (Figura 2.7), y que a su vez permite analizar la movilidad y aplicar percusión suave en la apófisis de las vértebras puede producir dolor al paciente, lo que suele ser signo de alguna lesión (Dandy y Edwards, 2011; Ministerio de Salud Paraguay, 2017).

Finalmente, columna lumbar se puede estudiar también en la inclinación hacia adelante, en el Test de Adam, donde se evidencia la escoliosis, y también se presta atención a la unión con el sacro en caso de dolor por parte del paciente, ya que la mayoría de las afecciones ocurren entre L4-L5, o L5-S1. De la misma forma que con las vértebras torácicas, se pierde sensibilidad y movimiento al sufrir una afección ortopédica, aunque es menos evidente (Dandy y Edwards, 2011).

Las técnicas anteriormente mencionadas permiten un diagnóstico visual de las afecciones ortopédicas, sin embargo, cuando el médico detecta que la afección es patológica, se suele recurrir a la radiografía para analizar y cuantificar el grado de afección que padece el paciente, empleando las técnicas que nos mencionan Moore *et. al.* (2013) y Latarjet y Ruíz-Liard (2019a) para el análisis de la zona en cuestión y que se aprecie la columna vertebral, para poder emplear la técnica de medición conocida como ángulo de Cobb, que es probablemente la técnica más empleada y difundida (G. Lam *et. al.*, 2008; Srinivasalu *et. al.*, 2008).

Dicha técnica consiste en proyectar líneas perpendiculares al eje de las vértebras, sobre los discos vertebrales, de modo que al extenderse, la intersección produzca un ángulo, que fue el propuesto por Cobb para realizar mediciones de escoliosis (Figura 2.8). Anteriormente, las mediciones se realizaban a mano por los traumatólogos, pero hoy en día se busca implementar mediciones por computadora



Figura 2.8: Medición por computadora del ángulo de Cobb (Papaliadis *et. al.*, 2017).

que den resultados más precisos y con una incertidumbre reducida (Papaliadis *et. al.*, 2017). Además, recientemente se comienza a evaluar a la escoliosis como una afección tridimensional, y no bidimensional, ya que las mediciones se realizan solo analizando el plano coronal, cuando las curvaturas de la columna adquieren también profundidad, G. Lam *et. al.* (2008) busca con ello mayor precisión para los casos graves, que requieren cirugías.

En años posteriores, también se han desarrollado métodos para medir el componente tridimensional de la escoliosis, es decir, la rotación anormal de las vértebras que se presenta con la patología. Para dichas mediciones hay varias técnicas, cada una con sus respectivas ventajas e inconvenientes, estos últimos usualmente dados por la dificultad de obtener una buena calidad de imagen de los procesos espinosos (puntos de referencia para estas mediciones) desde una radiografía (G. Lam *et. al.*, 2008).

Regresando a la medición del ángulo de Cobb, se han realizado también estudios, comparando la eficiencia de cada uno de los métodos: concretamente los manuales y los computacionales, inclusive algunos realizados por aplicaciones de dispositivos móviles, que han concluido que todos los métodos gozan de confiabilidad, aunque los digitales suelen ser ligeramente más precisos, debido a que la capacitación de los observadores humanos era directamente proporcional a su capacidad de seleccionar y medir con certeza (Langensiepen *et. al.*, 2013).

## 2.2.2. Hipercifosis

### Descripción

Podemos definir a la hipercifosis también como una curvatura anormal en la espalda en el plano sagital o desde una vista lateral, a diferencia de la escoliosis, que se aprecia desde el plano coronal (Edelstein, 1934; Dandy y Edwards, 2011; Mayo Clinic, 2022a).

Como se mencionó previamente, la espalda posee curvaturas naturales hacia la parte anterior



(lordosis) o posterior (cifosis) (Quiroz, 2018; Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a). Esta afección, denotada por el nombre, indica una curvatura anormal, usualmente más pronunciada, hacia la parte posterior del cuerpo (Dandy y Edwards, 2011; Kendall *et. al.*, 2005).

Se caracteriza por afectar usualmente a las vértebras torácicas superiores, en lo que se conoce como cifosis dorsal, causando en la mayoría de los casos una notoria inclinación hacia delante de la cabeza o la aparición de una joroba en la zona cervico-dorsal, aunque también puede afectar otras regiones vertebrales (Stanford Medicine, s.f.; Mayo Clinic, 2022a).

Las causas de la hipercifosis, al igual que en la escoliosis, son variadas. La *Scoliosis Research Society* definió 13 causas diferentes, entre las que se cuentan la congénita, traumática, postraumática, posirradiación, metabólica, desórdenes de enanismo, enfermedad de colágeno, tumor, infección o neurofibromatosis (“A Glossary of Scoliosis Terms.”, 1976; Winter, 1991), sin embargo, estudios más recientes han encontrado causas más diversas para esta afección, ya que existen muchos factores biológicos a tomar en cuenta (Yaman y Dalbayrak, 2014).

Sin embargo, las más frecuentes, desde que se describió por primera vez la cifosis hasta la fecha inclusive, son (Edelstein, 1934; Stanford Medicine, s.f.; J. Lam y Mukhdomi, 2023)

1. Enfermedad de Scheuerman, un trastorno sin causa aparente que provoca la inclinación de la columna hacia adelante en la zona cervo-torácica.
2. Postural, observada en la adolescencia y provocada por una postura constante y anormal, o para evitar dolor causado por alguna otra afección en una posición normal.
3. Trastornos neuromusculares, que tensan la espalda en posición incorrecta.

Todo esto sin contar también la que se da debido al envejecimiento, ya que a mayor edad tenga el paciente, mayor es la prevalencia de la cifosis (J. Lam y Mukhdomi, 2023; Mayhew *et. al.*, 2024).

### **Incidencia**

Tan solo la enfermedad de Scheuermann se estima que está presente entre el 0.4 y el 8% de las personas en Estados Unidos, esta gran incertidumbre se debe en parte a que los pacientes suelen buscar tratamiento únicamente por la estética, lo que hace que solo los casos más graves de hipercifosis lleven el seguimiento adecuado (De Mauroy *et. al.*, 2010; J. Lam y Mukhdomi, 2023).

Así mismo, la hipercifosis afecta principalmente a los hombres, en una proporción de 7 a 1 en comparación con las mujeres, algo ya reportado por Edelstein (1934) al ser uno de los primeros en registrar la enfermedad y diferenciarla de la postura anormal de las víctimas de Tuberculosis. Así mismo, las estadísticas más conservadoras siguen mostrando que los hombres son el doble de propensos a desarrollar la enfermedad de Scheuermann (J. Lam y Mukhdomi, 2023)

Además, como se mencionó anteriormente, la tasa de incidencia y el grado de la enfermedad aumenta con la edad, concretamente después de los 40 años, llegando a afectar entre 20 y 40% de los adultos mayores a 60 años, y es durante este periodo que las mujeres muestran un mayor crecimiento en la tasa de incidencia, concretamente durante la menopausia (J. Lam y Mukhdomi, 2023; Mayhew *et. al.*, 2024).

### **Efectos en la salud**

El principal síntoma del que aquejan los afectados por la hipercifosis es el dolor por la posición de la columna vertebral, aunque este puede variar dependiendo del caso en particular y la causa de su alteración postural, sin embargo, al igual que con la cifosis, la intensidad del dolor puede limitar la movilidad del afectado (sobretudo si ya es de edad avanzada) y limitar su capacidad laboral y su motricidad necesaria para el día a día (Farsetti *et. al.*, 1991).



Figura 2.9: Radiografías de un masculino de 16 años afectado por Scheuermann antes y después de un tratamiento quirúrgico (Yaman y Dalbayrak, 2014).

Además, hay veces que la hiperCIFOSIS aparece como consecuencia de otra afección, tales como inflamación, irritación posirradiación, o la edad, entonces el alcance sobre el estado del paciente es amplio y variado (Winter, 1991).

Sin embargo, como encontró Farsetti *et. al.* (1991), en caso de que el afectado no reciba tratamiento oportuno, la condición tiende a agravarse con el paso del tiempo y el dolor se vuelve común; esto ocurre también entre aquellas personas que recibieron tratamiento y al concluirlo no dieron seguimiento a su condición, e incluso la afección regresa con mayor severidad.

### Métodos de diagnóstico

El diagnóstico de la cifosis se hace usualmente durante una exploración física, cuando suele ser evidente la afección, debido a que, como mencionó Winter (1991), las personas suelen buscar tratamiento por la estética en esta afección. Durante la exploración se revisa la posición del paciente y es normal observa la columna inclinada hacia adelante, una hiper extensión de la columna cervical, flexión incrementada de la espina torácica, abducción en las escápulas, e inclusive ligeras alteraciones en los miembros inferiores (Kendall *et. al.*, 2005).

Sin embargo, para cuantificar la hiperCIFOSIS, y llevar un seguimiento de la afección a lo largo del tratamiento se utilizan radiografías, al igual que con la escoliosis, y se mide el equivalente al ángulo de Cobb: la intersección entre las líneas paralelas a los planos de los cuerpos vertebrales, pero en esta ocasión desde una vista sagital (Figura 2.9). Sin embargo, en esta ocasión es más un poco más complicado, ya que el ángulo puede ir naturalmente desde los 20 hasta los 40 grados, dependiendo de la edad del paciente, y a pesar de no existir consenso definido, se suele aceptar que en personas jóvenes, un ángulo mayor a los 40° ya es patológico y requiere tratamiento, y en adultos mayores, de 50° (Lemire *et. al.*, 1996; Spinal Deformity Study Group, 2008; Yaman y Dalbayrak, 2014; Mayhew *et. al.*, 2024).

Cabe mencionar que, al igual con la escoliosis, la medición del ángulo a partir de una radiografía también se puede emplear, de forma manual y/o computarizada con precisiones similares a la reportadas en la primera patología, pero desde una vista sagital para la hiperCIFOSIS o la hiperlordosis (Schuler *et. al.*, 2004).



### 2.2.3. Hiperlordosis

#### Descripción

Al igual que la hipercifosis, esta afección se describe principalmente por una curvatura anormal en la columna vertebral desde una vista sagital. Sin embargo, a diferencia de la primera, en esta ocasión la curvatura apunta hacia la parte anterior del cuerpo, de modo que el paciente parece tener una curvatura exagerada en la región cervical o en la lumbar de la columna vertebral (Dandy y Edwards, 2011; Health Library, 2019).

Sin embargo, la hiperlordosis lumbar suele estar acompañada de afecciones en la pelvis, usualmente una inclinación anormal, que a su vez puede ser consecuencia de alteraciones en la posición natural de los miembros inferiores (Celestre *et. al.*, 2018).

La hiperlordosis comparte también son más parecidas a las de la escoliosis y la hipercifosis, ya que puede deberse a problemas congénitos o neuromusculares, lesiones traumáticas o quirúrgicas, o sencillamente a causas posturales (Dandy y Edwards, 2011; Health Library, 2019; Asher, 2022).

Cabe mencionar, que algunos profesionales sospechan que varios casos de lordosis entre mujeres se deben al uso de tacones elevados, sin embargo los resultados los estudios al respecto, no han sido concluyentes (Russell *et. al.*, 2012).

Sin embargo a veces la hiperlordosis se sufre como consecuencia de otras patologías, como lo es la acondroplasia, una mutación genética, que puede hacer que un paciente que no ha alcanzado la adultez desarrolle lordosis, o también como consecuencia del desarrollo de hernias discales, que son una condición médica compleja con sus propias causas y síntomas. Cabe mencionar que la hiperlordosis también es progresiva con la edad, sobretodo si no se lleva a cabo el tratamiento oportuno (Dandy y Edwards, 2011; Health Library, 2019; Skaf *et. al.*, 2011).

#### Efectos en la salud

De la misma forma que las dos patologías anteriores, la hiperlordosis provoca dolor al afectado, que puede variar dependiendo de la causa de la hiperlordosis, su severidad y el estado físico del paciente. Sin embargo, la hiperlordosis lumbar, al estar usualmente relacionada con afecciones en la pelvis, puede generar problemas de movilidad más severos que la hipercifosis, puesto que involucra también a los miembros inferiores del cuerpo, y se puede comprometer la capacidad de caminar de forma efectiva en los casos más severos, y por consiguiente la capacidad laboral e incluso la independencia de la persona para realizar tareas diarias.

#### Métodos de tratamiento y diagnóstico

El diagnóstico se lleva a cabo primeramente con valoración física, donde se valora la curvatura en el área afectada, usualmente la zona lumbar, pero también se busca una inclinación de la pelvis hacia la parte anterior del cuerpo, y alteraciones en los miembros inferiores, ya que es común observar las rodillas ligeramente hiperextendidas (Dandy y Edwards, 2011; Kendall *et. al.*, 2005)

Sin embargo, también se toman radiografías desde el plano sagital para cuantificar la medición de la afección, sobre la cual se miden ángulos característicos. Por ejemplo, en pacientes sanos, el ángulo entre el plano superior del sacro y la horizontal debe ser menor a 11° y una inclinación pélvica debe ser menor a 15° (Celestre *et. al.*, 2018).

En la zona de las vértebras, es frecuente volver a encontrar mediciones hechas con el ángulo de Cobb, al igual que con la hipercifosis, ya que es un estándar bien conocido (Eddine *et. al.*, 2023). Sin embargo, existe el inconveniente de que evidentemente hay una curvatura natural en las vértebras, y en la región lumbar, cada vértebra contribuye en distinta medida a dicha curvatura, yendo desde el 4% de la misma para L1, hasta el 40%-53% para L5 (Mi Le *et. al.*, 2022), y aun a día de hoy se sigue estudiando esto. Baker y Robertson (2020) hicieron un estudio donde relaciona la posición promedio





de las vértebras dependiendo de la inclinación de la pelvis, aunque lo normal, aceptado por el manual del Spinal Deformity Study Group (2008), indica una curvatura de  $40^\circ$  a  $60^\circ$  en la zona lumbar.

## Capítulo 3

# Antecedentes técnicos

### 3.1. Reconstrucciones tridimensionales del cuerpo humano

La imagenología tiene como fin último el desarrollo y estudio, y empleo de técnicas que puedan brindar información clínica sobre el cuerpo humano. Desde sus inicios, con la radiografía desarrollada por Wilhelm Rontgen, a finales del Siglo XIX, se han estado buscando nuevas técnicas más certeras y precisas sobre las condiciones clínicas de cada paciente en particular. Sin embargo, en las primeras etapas de esta ciencia, y la radiología en concreto, los pacientes se sometían a pruebas invasivas y no se era consciente de los peligros de la radiación, u otros procedimientos, en la salud del paciente a largo plazo. Es por ello que, con el pasar del tiempo, se fueron puliendo y desarrollando nuevos métodos cada vez menos invasivos para obtener la información clínica (The British Institute of Radiology, s.f.).

Las reconstrucciones tridimensionales de cuerpo, como su nombre lo indica, buscan obtener información de la posición y morfología del cuerpo humano desde el exterior del cuerpo humano, y no desde el interior. Algunos métodos de reconstrucción no solo tienen la finalidad de obtener información sobre la morfología, o un modelo tridimensional, sino que también buscan obtener información de patologías a través de sus manifestaciones físicas de los pacientes. Curiosamente, algunas de los primeros intentos de reconstrucción tridimensional tenían fines de análisis postural con fines deportivos o artísticos inclusive, antes de usarse en el ámbito clínico.

Hoy en día hay numerosas técnicas que permiten la reconstrucción tridimensional, algunas con ventajas y aplicables al cuerpo humano. Se ha intentado la reconstrucción mediante láseres, luz estructurada, e inclusive se han hecho estudios de reconstrucción a partir de una sola imagen mediante redes neuronales, utilizando un gran número de fotografías y modelados de sus figuras (Saito *et. al.*, 2020).

Sin embargo, a pesar del desarrollo de la tecnología, el mayor interés para realizar reconstrucciones corporales tridimensionales con fines médicos y el creciente número de estudios, las técnicas aun no están estandarizadas ni existen protocolos de ética, de modo que cada estudio emplea un modelo propio, sus propias calibraciones y métodos de reconstrucción. Inclusive, dentro de los propio métodos, no existen tampoco estándares ni protocolos, por lo que no existen marcos con los cuales comparar los resultados de los estudios, y, tradicionalmente, estos solo se comparan unos con los otros (Gill *et. al.*, 2016).

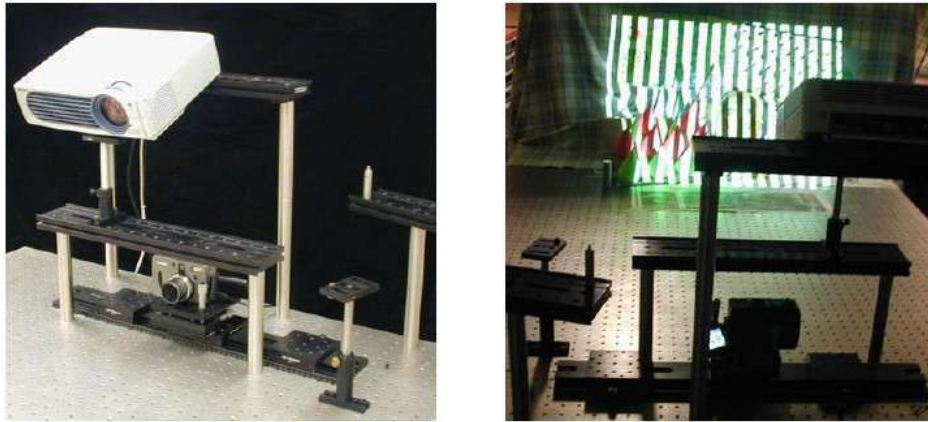


Figura 3.1: Sistema de proyección y captura de imagen (izquierda) y patrón de líneas paralelas proyectadas (derecha) empleados por Scharstein y Szeliski (2003).

### 3.2. Luz estructurada

La técnica de luz estructurada consiste en proyectar un patrón, usualmente de franjas iluminadas, paralelas entre sí, sobre una superficie, de modo que, al incidir sobre ella, el patrón periódico se deforme, concretamente al pasar sobre un volumen irregular (Scharstein y Szeliski, 2003).

Para realizar dicha técnica, se requiere de una fuente de iluminación, y un dispositivo de captura de imagen, además de que exista cierto contraste con la luz de fondo (es posible emplear longitudes de onda infrarrojas o de luz visible). Finalmente, la captura de imagen debe ser analizada de forma computacional mediante un algoritmo que considere la óptica del sistema, que puede variar dependiendo del patrón proyectado, las características del proyector y de la cámara, la distancia, entre otros factores, y Scharstein y Szeliski (2003) afirman que el desarrollo de dichos algoritmos no se ha mantenido a la par de la dificultad que resulta analizar las imágenes obtenidas.

### 3.3. Estudios previos de escoliosis con luz estructurada

Se ha realizado una propuesta del empleo de la luz estructurada para poder realizar una reconstrucción tridimensional de la superficie de una espalda humana empleando patrones de Moiré, como resultado de la interferencia de dos patrones paralelos a diferentes ángulos (Bogdán, 2018, 2020).

La técnica trabajada por (Bogdán, 2018) consiste en la proyección de líneas paralelas blancas y negras sobre la espalda del paciente en un entorno oscuro. Al incidir sobre la espalda del paciente y ser capturada la imagen por la cámara, las líneas se distorsionan de la imagen proyectada original. Computacionalmente, se proyecta sobre la imagen capturada, las franjas oscuras de la imagen proyectada. Al interferir las líneas de la imagen con las de la proyección, se crean patrones de Moiré, cuyas líneas oscuras más espesas representan variaciones en la topografía de la espalda del paciente, como si fuera un plano topográfico. Se pueden observar dichas líneas en la figura 8, que la contrasta con una radiografía. Se nota fácilmente una correspondencia entre ambas imágenes, donde el patrón de Moiré arroja información sobre la prominencia de las escápulas, los huesos de la pelvis, cuya posición es afectada por la morfología de la columna vertebral del paciente, que es la información que se desea reunir (Kim *et. al.*, 2009; Bogdán, 2020).

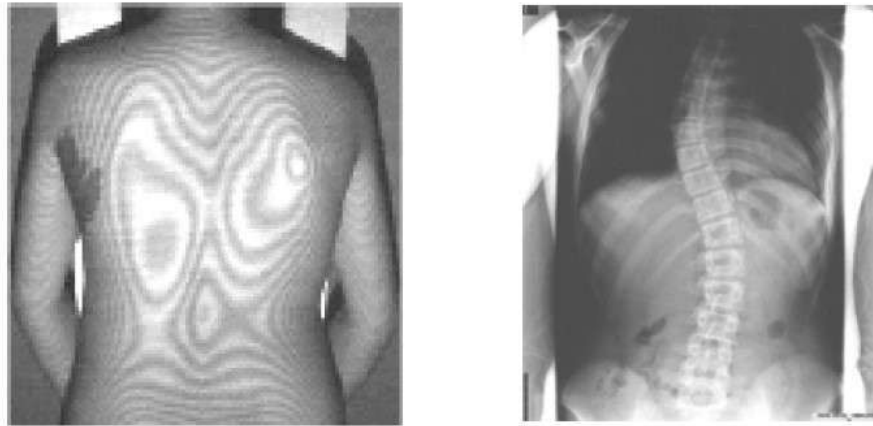


Figura 3.2: Patrones de Moiré generados sobre la espalda de un afectado por escoliosis contra radiografía (Kim *et. al.*, 2009).

### 3.4. Modelo pin hole de captura de imagen

Uno de los componentes más importantes de la reconstrucción mediante luz estructurada es la cámara, encargada de recabar la información geométrica del sistema capturado, generada a través de la proyección. Sin embargo, la captura de imagen y su análisis conlleva numerosos fenómenos ópticos, que son toda una rama de estudio de la óptica física, llamada fotogrametría.

El modelo de captura de imagen más sencillo es el modelo *pin hole*, que podría considerarse un modelo ideal para la captura de imágenes, y fue uno de los primeros en estudiarse. Dicho sistema consta de dividir la cámara en dos componentes: el punto de captura de imagen y el plano de proyección (consultar figura 3.3). La luz reflejada por un objeto pasa a través del punto de captura hacia el plano de proyección, que muestra una imagen invertida de lo que captura la cámara. Sin embargo, observando que el plano de proyección se encuentra en el plano  $xy$ , a una distancia  $-f\hat{z}$  del punto de origen, podemos cambiar la dirección del plano al eje positivo y corregir la inversión en el plano de proyección de la imagen (Hartley y Zisserman, 2004).

Según lo describe Hartley y Zisserman (2004), el modelo *pin hole* crea una asociación entre un punto tridimensional del espacio capturado  $P(X, Y, Z)$  a un punto en el plano de proyección  $P_C(u, v)$  que es bidimensional. Si se conocen las coordenadas de ambos puntos, es fácil observar que (ya que el plano de proyección está orientado en una distancia  $f$  en dirección  $z$  positivo) se forman dos triángulos equivalentes, y se pueden obtener relaciones de proporcionalidad

$$\frac{f}{Z} = \frac{1}{m_u} \frac{u}{X} = \frac{1}{m_v} \frac{v}{Y}$$

donde  $m_u$  y  $m_v$  son constantes de proporcionalidad de centímetros sobre píxeles, en caso de que la imagen esté dada en estos últimos. De aquí, es fácilmente describible una relación entre las coordenadas  $X, u$  y  $Y, v$ .

Esto se hace a través de una matriz de transformación, deducible a partir de un despeje de las coordenadas del plano bidimensional  $u$  y  $v$

$$u = \frac{m_u f}{Z} X + m_u t_u, \quad v = \frac{m_v f}{Z} Y + m_v t_v$$

considerando además que  $t_u$  y  $t_v$  describen traslaciones en el plano de imagen, en caso de usar un sistema coordenado diferente. Expresando estas relaciones en una matriz, omitiendo el término  $1/Z$

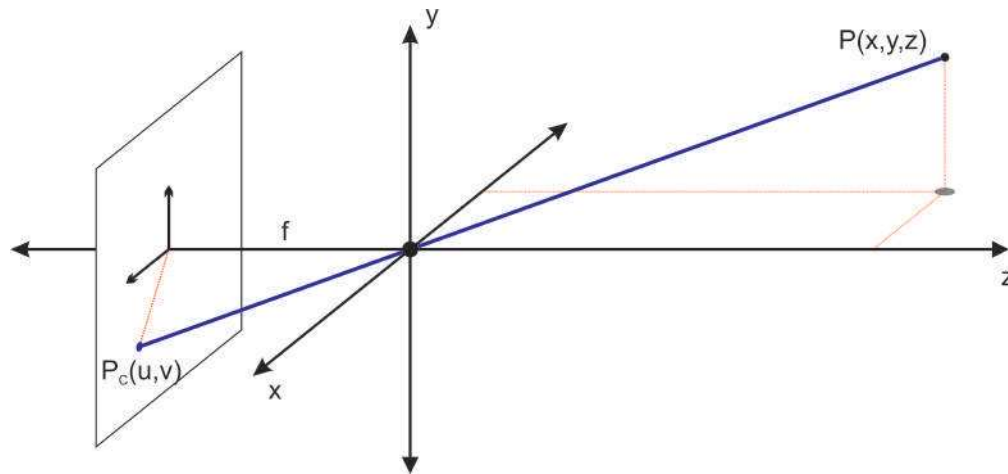


Figura 3.3: Diagrama del modelo de captura de imagen *pin hole* (elaboración original por Luz Ramos).

por razones mostradas posteriormente, sabríamos que

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_u f & 0 & m_u t_u \\ 0 & m_v f & m_v t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

donde a la matriz que multiplica los valores de  $P$ , se le llama matriz de parámetros intrínsecos de cámara, o más simplemente matriz intrínseca, y se denomina por la letra  $K$ .

En el modelo, de la misma forma, se consideran los parámetros extrínsecos. Es decir, aquellos que no dependen de la óptica del sistema y la proyección, sino de que de la posición de donde se capturan las imágenes, y como lo hace de la misma forma con una matriz, se le denomina matriz de parámetros extrínsecos de cámara, y considera dos de las más importantes operaciones: traslación y rotación, de modo que

$$E = (R|RT)$$

donde  $R$  es una matriz de rotación, dependiendo del eje de referencia con el que se esté rotando (el más frecuente es  $Z$ ), y  $T$  es un vector de traslación con respecto al nuevo sistema de coordenadas, entonces, podemos definir a la matriz de calibración, que considera los parámetros intrínsecos y extrínsecos como

$$C = KE = K(R|RT) = KR(I|T)$$

y el sistema de asociación queda dado por

$$P_C = CP$$

sin embargo, dado que  $C$  es una matriz de  $3 \times 4$ , y  $P$  de  $3 \times 1$ , no se pueden multiplicar, y es necesario realizar una transformación homogénea que arregle el problema, de modo que ahora  $P$  tiene cuatro componentes, con  $P_{41} = 1$ , y  $P_C$  tiene tres, con  $P_{C31} = 1$ , y donde la localización exacta de las coordenadas de  $P_C$  resulta de la división de los primeros dos componentes entre el tercero, y ahí reaparece el término  $1/Z$  que se omitió en la primera expresión, y brinda las mismas coordenadas.

Sin embargo, expresar  $P$  en términos de  $P_C$  es más complicado, ya que la matriz  $C$  lo que hace es, después de la transformación homogénea, reducir una dimensión, cuya información se pierde, y no es posible hacerlo en el sentido inverso, a menos que se trate de un sistema de múltiples cámaras que



considere las limitaciones en la geometría del espacio, y permita obtener la posición tridimensional del punto reflejado en la imagen  $P_C$ .

Por último, hay que mencionar que este modelo considera una cámara ideal, con un punto de captura puntual. Pero más allá de la imposibilidad de crear dicho punto, el comportamiento de la luz en el modelo no corresponde a la realidad, ya que un haz de luz difracta sobre rendijas muy pequeñas (dependiendo de su energía), y causaría deformaciones en la imagen generada, lo cual es algo que sí se ha observado repetidamente en la fotogrametría; además, como las cámaras requieren de lentes, no se ha creado, a la fecha, ningún dispositivo de captura de imagen que no genere aberraciones ópticas.

## Capítulo 4

# Diseño de la plataforma experimental

### 4.1. Requerimientos

El éxito en el uso de todo equipo médico depende de la capacidad de integrar y observar los parámetros de acuerdo a las necesidades de los involucrados en el uso de los dispositivos. Por tanto, se realizó una entrevista con un representante de la comunidad de fisioterapeutas con la finalidad de obtener algunas de las necesidades básicas, arrojando lo siguiente:

- El dispositivo debe ofrecer una certeza igual o superior a la obtenida a través de los métodos clásicos, para caso, tales como, identificación y medición de los puntos característicos anatómicos en la espalda utilizando cinta métrica, medición y estimación anatómica utilizando cuadrículas y valoración por medio de análisis de simetría, entre otras.
- Por otro lado, es necesario que el dispositivo sea autocalibrado y que no requiera ajustes una vez iniciada la valoración.
- El tamaño debe ser lo suficientemente compacto y ligero para que pueda almacenarse en un espacio relativamente pequeño.
- Debe ser escalable en capacidad de análisis.
- Debe de ofrecer una imagen de seguridad en donde los pacientes no se sientan intimidados por el uso de dispositivos mecatrónicos.
- Finalmente, el sistema debe ser totalmente inocuo, es decir, que no represente ningún riesgo para el paciente en su uso y operación.

Desde el punto de vista del producto, este debe de ser de fácil ensamble, con un mínimo de calibración, y fabricado con componentes de fácil reemplazo. Al utilizar partes móviles, es necesario que estas cumplan con las normas oficiales o, en su defecto, que cuenten con una certificación. Finalmente debe ser un dispositivo económico.

En entrevistas realizadas con potenciales voluntarios, al informarles del protocolo, se concluyó que para su comodidad el tiempo de ejecución del mismo debería ser en torno a 5 minutos, con el espacio de prueba con iluminación tenue, y no en completa oscuridad, y con el entendimiento de que el sistema es completamente seguro: es decir, no tiene componentes que interactúen directamente con el paciente, ni emplea radiaciones ionizantes.



Figura 4.1: Estructura del sistema ópto-mecánico sin los componentes ópticos (elaboración propia).

## 4.2. Plataforma experimental

El sistema está conformado por cuatro componentes principales.

1. **Sistema mecatrónico:** Es donde se encuentran colocados la cámara y el proyector, el último sobre un eje motorizado con un desplazamiento de 300 milímetros por minuto, este motor es alimentado por corriente directa y no está integrado en un lazo de control, por lo que se considera lazo abierto. Esto es debido a que no se requiere de un control preciso sobre la posición traslacional, ya que la carga referida está asociada directamente con la masa del proyector (350 gramos), y la fuerza de empuje traslacional del eje motorizado es de 6,000N, por lo que para efectos de análisis, puede considerarse sin carga.
2. **Fuente de alimentación:** La fuente de alimentación es de tipo conmutada de 120 – 12V de corriente directa con 5.26A. Esta alimenta directamente al eje motorizado, y podría ser sustituida por una batería de 12V a 5A.
3. **Componentes ópticos:** Dentro de la óptica se encuentran el proyector y la cámara. El proyector obtiene la información del patrón de proyección de una computadora en donde previamente se





ha diseñado y programado. La intensidad de luz es de 10,000 lumens, suficiente para obtener un alto contraste en la imagen.

Por otro lado, se usó una cámara *Canon* Modelo 70D con una lente de 135mm cuya función es coleccionar la imagen reflejada del paciente y del patrón de líneas.

4. **Software:** El software del sistema fue programado en MatLab, puesto que solo requiere de análisis de imagen. Al no requerir un lazo de control, no fue necesario programar un software que controlara el desplazamiento del programa, y al ser la cámara *Canon* capaz de ser programada para capturar imágenes cada cierto tiempo, tampoco fue necesario automatizar el proceso de captura de imágenes, y en cada voluntario, solo se requería devolver al eje motorizado a su posición de inicio.

La estructura del sistema mecánico puede apreciarse en la figura 4.1, y sus dimensiones y diseño exactos, pueden apreciarse claramente en el Apéndice A. La estructura fue construida con perfiles Bosch de aluminio de 45mm, y escuadras de las mismas dimensiones, para otorgar solidez a la estructura. Se optó por los perfiles de aluminio por su amplio uso en talleres e industria, peso reducido en comparación a las estructuras tradicionales de acero, alta resistencia a la oxidación y facilidad para separar o unir piezas sin necesidad de soldadura y con herramientas básicas, lo que reduce su necesidad de mantenimiento y permite la fácil sustitución de piezas.

Los modelos ópticos y el software, serán descritos con detalle en las secciones subsecuentes.

### 4.3. Análisis óptico-geométrico

#### 4.3.1. Consideraciones ópticas

Se escogió colocar la cámara a una distancia de 2.70 metros del voluntario y realizar la captura de imagen con una distancia focal de 35mm, un ISO-6400, y un tiempo de exposición mínimo de 1/50s.

Al revisar la imagen, se determinó que la distancia reducida permite que la aberración óptica del lente de 135mm en la proyección de imagen sea muy reducida, en especial si la región de interés se encuentra cerca del eje focal de la imagen.

Esto, sumado al hecho de que el modelo de cámara *Canon* ya posee un software de corrección de aberración para la imagen capturada (software protegido), y que la región de análisis dentro de las imágenes capturadas se encuentra muy cerca del eje focal (el diámetro angular de la zona de análisis, es menor a 15° horizontalmente), permiten despreciar la aberración óptica y hacer un análisis geométrico del sistema con un modelo ideal de captura de imagen, en este caso el modelo *pin hole*.

#### 4.3.2. Triangulación y determinación de coordenadas de un punto

El análisis trigonométrico de la reconstrucción tridimensional se muestra en la figura 4.2, que ilustra la triangulación entre los patrones generados por el proyector, entre aquellos que incidirían sobre la superficie, y entre aquellos que se reflejarían de la espalda del paciente.

En dicha figura, se aprecia que las coordenadas de nuestro interés para un punto cualquiera en la espalda serían  $P(x, y, z)$ , y, considerando que  $x$  estará dada simplemente por el desplazamiento horizontal de nuestro análisis sobre la imagen capturada, es necesario primero encontrar  $y$  y  $z$ , que son respectivamente, la altura con respecto al eje focal de la cámara y la separación del punto  $P$  con respecto a la pared del fondo.

Las deducciones siguientes se hacen sobre el centro de la imagen, cuando, y posterior a ello, se generalizará para las variaciones de  $x$ .

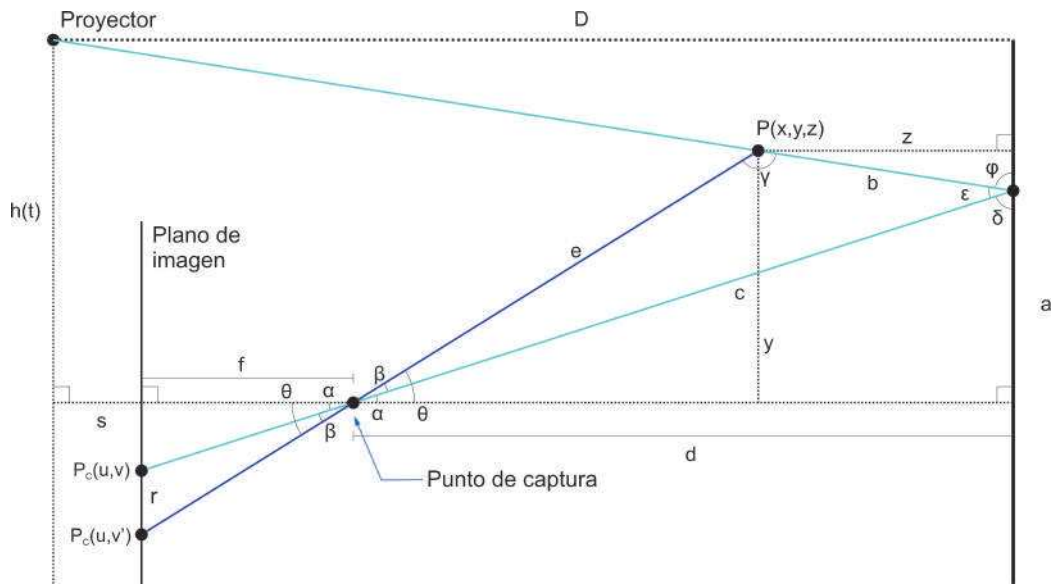


Figura 4.2: Diagrama de la geometría de los haces de luz y sistema óptico (elaboración propia).

Se puede determinar las coordenadas de interés mediante las expresiones

$$\begin{aligned} y &= a + b \cos \varphi \\ z &= b \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.3.2.1)$$

donde, según la imagen,  $a$  es la altura a la que una línea proyectada debería de incidir sobre la pared, usando el eje focal de la cámara de referencia y donde  $\varphi$  es el ángulo entre el haz antes de incidir sobre la pared y la vertical.

Es posible entonces expresar  $\varphi$  mediante el triángulo equivalente que se genera entre el proyector, el punto de incidencia del haz con la pared y la intersección de  $D$  con la pared como lo muestra la figura 4.2, entonces

$$\varphi = \arctan \left( \frac{D}{h(t) - a} \right) \quad (4.3.2.2)$$

El cálculo ahora se centra en  $b$ , y para esta triangulación, es necesario conocer los ángulos que describe la figura 4.2. Los primeros que se pueden obtener con la información obtenida por la imagen, son los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , que describen la inclinación con respecto de la horizontal del haz incidiendo teóricamente con la pared, y del haz incidido sobre la espalda humana, respectivamente.

El modelo *pin hole* de captura ideal de imagen permite crear una asociación entre los puntos tridimensionales de un objeto capturado  $P(x, y, z)$  y su punto proyectado  $P_c(u, v)$  a través de una matriz de con los parámetros intrínsecos de captura de imagen. Sin embargo, en ausencia de rotación o traslación sobre las imágenes de análisis, se puede establecer una relación entre las coordenadas  $v - Y$  mediante la relación entre  $Z$  y la distancia focal por equivalencia de triángulos, como lo mostraría una versión bidimensional de la figura 3.3. Es decir, para este caso

$$\frac{f}{Z} = \frac{1}{m_x} \frac{u}{X} = \frac{1}{m_y} \frac{v}{Y} \quad (4.3.2.3)$$

donde  $m_x$  y  $m_y$  son coeficientes de resolución de píxeles sobre centímetro para que las unidades



coincidan. Entonces, para el eje vertical

$$Y = \frac{vZ}{m_v f} \quad (4.3.2.4)$$

y siguiendo la convención, se define  $\alpha_v = m_v f$ . Con esta expresión es posible hacer el escalamiento y la conversión de unidades necesarias para determinar cualquier ángulo a partir de su medición en pixeles desde la imagen. Visto de forma gráfica, el valor de  $Y$  correspondería a la altura de un punto sobre la pared (con  $X = 0$  y  $Z = 0$ ) que realizaría la misma proyección sobre el plano de imagen que el punto  $P(x, y, z)$ .

Entonces, el ángulo con respecto de la horizontal que generaría un segmento entre este punto de altura  $Y$  y el punto de captura de imagen sería dado por

$$\theta = \arctan\left(\frac{vd/\alpha_v}{d}\right) = \arctan\left(\frac{v}{\alpha_v}\right) \quad (4.3.2.5)$$

Usando esta expresión se pueden calcular los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  nada más con su información de coordenadas en la imagen, y con ellos, a su vez, la longitud del segmento  $c$ , y de los ángulos  $\epsilon$ ,  $\delta$  y  $\gamma$  que permitirían obtener finalmente el valor de  $b$ .

Iniciando por el cálculo del segmento  $c$ , que está dado, en términos de  $\alpha$  por

$$c = \sqrt{d^2 + a^2} = \sqrt{d^2 + d^2 \tan^2 \alpha} = \frac{d}{\cos \alpha} \quad (4.3.2.6)$$

Y regresando al cálculo de los ángulos, el ángulo  $\delta$  es dado por

$$\delta = 90 - \alpha$$

a su vez, el ángulo épsilon

$$\begin{aligned} \epsilon &= 180 - \varphi - \delta \\ &= 90 - \varphi + \alpha \end{aligned}$$

y finalmente el ángulo gamma será dado por

$$\begin{aligned} \gamma &= 180 - \beta - \epsilon \\ &= 90 + \varphi - (\alpha + \beta) \end{aligned}$$

que es necesario para calcular  $b$  mediante ley de senos. Definamos  $\theta = \alpha + \beta$  por motivos de simplicidad, y entonces

$$b = c \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(90 + \varphi - \theta)}$$

Considerando que los  $90^\circ$  son una rotación que produce un cambio de cuadrante en el marco de referencia, y que  $\beta = \theta - \alpha$ , la expresión se simplifica entonces como

$$b = c \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos(\varphi - \theta)} \quad (4.3.2.7)$$

ahora, al sustituir la ecuación 4.3.2.6 en 4.3.2.7, y esta a su vez en las ecuaciones 4.3.2.1, se definen las coordenadas  $y, z$  mediante

$$\begin{aligned} y &= a + d \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha) \cos \varphi}{\cos(\varphi - \theta) \cos \alpha} \\ z &= d \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha) \sin \varphi}{\cos(\varphi - \theta) \cos \alpha} \end{aligned} \quad (4.3.2.8)$$

Este análisis debe de repetir para cada columna de píxeles de la imagen, cuidando la ligera variación de  $d$ , producida por el desplazamiento horizontal al analizar la imagen. Denominaremos momentáneamente  $d'$  a dicha variación de  $d$ , la cual es dada por

$$d' = \sqrt{d^2 + X^2} \quad (4.3.2.9)$$

donde la distancia  $X$  se obtiene, según el modelo pinhole, a partir de

$$u = \alpha_u \frac{X}{Z} \rightarrow X = \frac{u \cdot d}{\alpha_u} \quad (4.3.2.10)$$

a pesar de que  $X < d$ , lo que produce una variación pequeña, pero que se debe de tener en consideración para la reconstrucción. Por consiguiente, el cálculo de  $d'$  será

$$d' = \sqrt{d^2 + \left(\frac{u \cdot d}{\alpha_u}\right)^2} = d \sqrt{1 + \frac{u^2}{\alpha_u^2}} \quad (4.3.2.11)$$

Entonces, el sistema de coordenadas que obtendrá la reconstrucción lo hará mediante las expresiones

$$P(x, y, z) = \begin{cases} x(u) = \frac{d}{\alpha_u} u \\ y(u, v) = a + d \sqrt{1 + \frac{u^2}{\alpha_u^2}} \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha) \cos \varphi}{\cos(\varphi - \theta) \cos \alpha} \\ z(u, v) = d \sqrt{1 + \frac{u^2}{\alpha_u^2}} \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha) \sin \varphi}{\cos(\varphi - \theta) \cos \alpha} \end{cases} \quad (4.3.2.12)$$

donde

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_{\text{lineas}}}{\alpha_v}\right), \quad \theta = \arctan\left(\frac{v_{\text{espalda}}}{\alpha_v}\right) \quad (4.3.2.13)$$

y finalmente, recordemos la expresión para  $\varphi$ , que reescrita en los términos ya deducidos a partir de la imagen

$$\varphi = \arctan\left(\frac{D}{h(t) - d'v_{\text{lineas}}/\alpha_v}\right)$$

sin embargo, ahora consideremos el desplazamiento del proyector y el tiempo entre cada fotografía, que resultó ser cada 5 segundos. Significaría entonces que la altura sería dada por

$$h(t) = H_0 + n \cdot V \cdot \Delta t$$

donde  $n$  es el número de imagen,  $V$  la velocidad del motor (no confundirse con la coordenada  $v$  en píxeles de la imagen) y  $\Delta t = 5s$ , que es el intervalo de tiempo entre cada fotografía. Entonces, ahora  $h$  se puede expresar en términos del número de imagen que esté analizando el sistema, y por consiguiente

$$\varphi = \arctan\left(\frac{D}{h_0 + nV\Delta t - d'v_{\text{lineas}}/\alpha_v}\right) \quad (4.3.2.14)$$

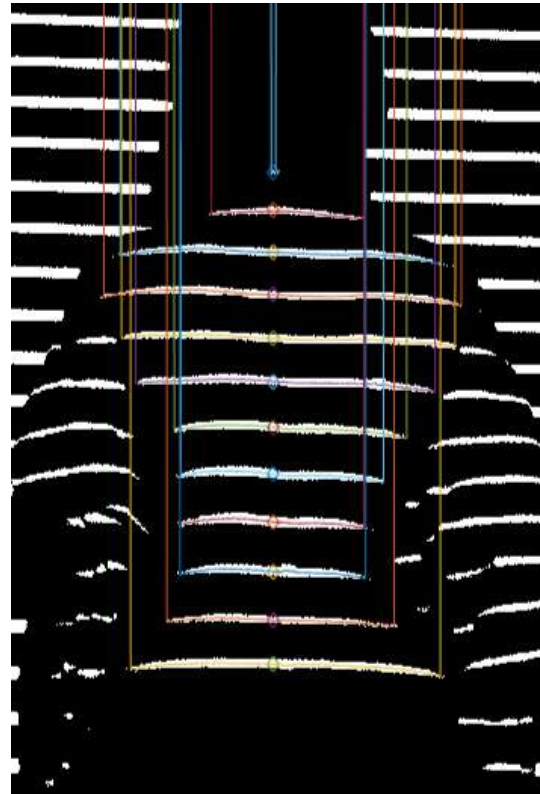
## 4.4. Programación

### 4.4.1. Reconstrucción

La primera parte del programa se encarga de la lectura de imágenes desde una carpeta en la computadora, y las guarda en una celda.



(a) Identificación de las incidencia teórica de las líneas de fondo.



(b) Identificación de la sección de los patrones de luz incidentes sobre la espalda.

Figura 4.3: Identificación de las líneas de fondo y las líneas incidentes para la posterior reconstrucción de coordenadas (elaboración propia).

Posteriormente, las convierte a blanco y negro para después umbralizarlas dependiendo del parámetro que se introduzca y minimice el ruido en la imagen, además del hacer una corrección en la rotación de la imagen en caso de ser necesario por algún malposicionamiento de la cámara, pero manteniendo el tamaño y la resolución de todas las imágenes.

Una vez todas las imágenes se encuentran adecuadamente alineadas y umbralizadas, el programa analiza las líneas proyectadas al fondo y las identifica para hacer una función, siguiendo la ecuación de la recta, que describa la incidencia teórica de las rectas a lo largo de la imagen en el caso de que un voluntario no se encontrase bloqueándola (figura 4.3a). La posición vertical de estas rectas corresponde a la variable  $v_{\text{lineas}}$  (tras una corrección correspondiente en el origen del sistema de coordenadas cartesianas en la imagen) señalada en la sección anterior.

Usando el mismo algoritmo de identificación del centro de las líneas, se identifican las líneas incidentes sobre el voluntario, y se descartan aquellas que estén muy separadas, secundarias al ruido o a la baja estatura de la persona, y con estos puntos, se inicia un ciclo que va identificando la trayectoria de la recta hacia la izquierda y hacia la derecha hasta encontrar una discontinuidad amplia en la misma, que indicarían un cambio abrupto de relieve (figura 4.3b). La posición vertical de esta recta corresponde, tras la misma corrección de coordenadas, a  $v_{\text{espalda}}$ , la otra variable necesaria e indicada en la sección previa.

El programa procedería posteriormente a calcular los ángulos  $\alpha$  y  $\theta$  señalados por las ecuaciones 4.3.2.13, y el ángulo  $\varphi$  dado por la ecuación 4.3.2.14, donde  $n$  es el número de elemento dentro de la celda de imágenes que se está analizando. Con esta información se determina posteriormente las coordenadas cartesianas para el punto incidente, según la ecuación 4.3.2.12, y se repite para todos los elementos de una línea incidente, después para cada línea incidente en la imagen, y finalmente, para cada imagen en la celda.

#### 4.4.2. Determinación patológica

Posterior a obtener la información tridimensional del voluntario, se procede a la interpretación de la misma y a la determinación de la posible presencia o ausencia de patologías posturales.

Dado que el protocolo fue diseñado para personas ectomofas (consultar sección 5.1 para información más detallada del mismo), la depresión media en el relieve de la espalda coincide teóricamente con la trayectoria de las apófisis espinosas de los cuerpos vertebrales, y nos da información directa de la trayectoria de la columna vertebral. Cabe considerar, sin embargo, que en el dado caso de una rotación vertebral existirá incertidumbre de la posición precisa de la vértebra, pero también es necesario mencionar que la correcta medición de la rotación vertebral presenta problemas incluso en las radiografías, y hay discusión sobre la técnica más precisa para dicha medición (G. Lam *et. al.*, 2008).

Otros puntos característicos que el programa puede identificar en personas con reducido tejido adiposo se ilustran en la figura 4.4 e incluyen la cresta occipital y S2, el punto donde inicia la línea interglútea. En la espalda superior son identificables los acromiones, los bordes mediales de la escápula y el ángulo inferior de la escápula. En la espalda inferior, se identifican las crestas ilíacas y las espinas ilíacas posterosuperiores.

Sin embargo, es importante mencionar que la posición de los puntos de la espalda superior, también descritos dentro de la literatura médica como componentes de los miembros superiores (Latarjet y Ruíz-Liard, 2019a), y que se han reportado alteraciones en estos puntos debido a otras patologías de los miembros superiores (Kendall *et. al.*, 2005; Dandy y Edwards, 2011), secundarias o independientes, de la escoliosis, hipercifosis o hiperlordosis, algo que también se observó en los casos de estudio reportados en la sección 5.2.

El correcto discernimiento de la patología que altera la posición de los puntos característicos de los miembros superiores involucraría una investigación extensa adicional, y la observación de numerosos casos, algo que excede por mucho los objetivos de la presente tesis.

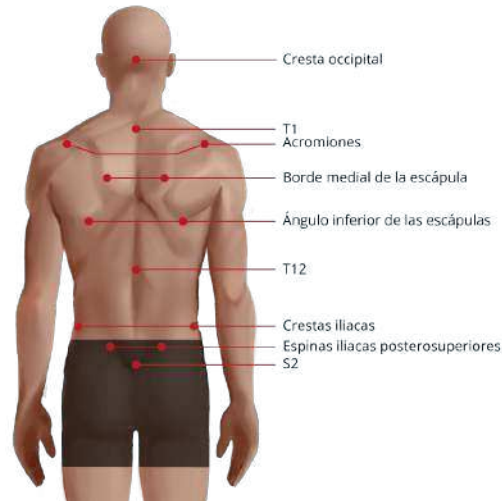


Figura 4.4: Puntos anatómicos característicos y fácilmente apreciables desde una vista posterior (elaboración original, por Luz Ramos).

Por el contrario, los puntos de la espalda baja son apreciables más fácilmente, pero aun dependientes de la cantidad de tejido adiposo del voluntario, e inclusive de la incidencia pélvica o de la presencia de alguna alteración en las crestas ilíacas.

Por lo mismo, el programa se centró en el reconocimiento de la trayectoria de las apófisis espinosas, y su posterior parametrización para un análisis matemático más sencillo mediante la identificación de pendientes máximas en el plano coronal, su cálculo, y el posterior resultado de un ángulo equivalente a Cobb.

## 4.5. Incertidumbre

Más allá de la posible incertidumbre del método por la captura de imágenes, análisis óptico, desplazamiento del proyecto y etcétera, que serán analizados en la discusión de resultados como corresponde, se estudió la incertidumbre debido a la posición del voluntario en distintas tomas, y su movimiento durante el tiempo de captura de imágenes, que es alrededor de 40 segundos.

Se pidió a un voluntario, con marcadores en los puntos anatómicos característicos, que se colocara en posición de captura de imagen, se tomara una fotografía, y se retirara para descansar unos minutos, y posteriormente intentar replicar la posición. Esto se repitió 10 veces, con la cámara en la misma posición de análisis. En MatLab se midió manualmente la posición de los marcadores y la desviación estándar se midió para los puntos de la columna vertebral desde  $\sigma = 8.25$  píxeles en T12 a  $\sigma = 17.25$  píxeles en C7 (de una imagen de  $3648 \times 2432$  píxeles), pero aumentó casi hasta los 50 píxeles en los puntos de las escápulas, lo que fue un factor decisivo para descartarlos en el software de determinación patológica.

La incertidumbre en los puntos de la columna vertebral, si se mide su ángulo de inclinación cervico-dorsal (cresta occipital-C7), dorso-lumbar (C7-T12) y lumbo-sacra (T12-S2) para posteriormente determinar la equivalencia del ángulo de Cobb, sería aproximadamente del 5%, y aunque un valor exacto dependería de un análisis proveniente de un tamaño de muestra mucho mayor a la de los casos de estudios, preliminarmente correspondería con la incertidumbre de otras mediciones realizadas manual o computacionalmente sobre radiografías (Langensiepen *et. al.*, 2013).

## Capítulo 5

# Evaluación experimental

### 5.1. Protocolo de medición en voluntarios

Se considerarán los siguientes criterios de inclusión para determinar si los voluntarios fueron aptos para la investigación.

- Somatotipo ectomorfo y mesomorfo.
- Edad entre 18 y 40 años.
- Sexo indistinto.

Los criterios de exclusión fueron:

- Personas con somatotipos: Endomorfos.
- Edad fuera del rango señalado: Niños y menores a 18 años y adultos mayores a 40 años.
- Personas con lesiones traumáticas agudas o cirugías recientes resultado de dichas lesiones.
- Padecer alguna patología ósea en estado inestable o sin seguimiento.
- Las personas que tengan tatuajes en color negro en una porción igual o mayor al 25% de la espalda.

Los criterios de eliminación para un voluntario durante el estudio fueron que:

- Decidan libremente dejar de ser voluntarios en cualquier punto del proceso de la investigación.
- Tengan algún trauma en el intervalo experimental que ponga en riesgo su salud.
- Tengan un proceso quirúrgico en el mismo tiempo.
- En el caso de las mujeres, si alguna se encuentra en proceso de gestación, o postparto durante el tiempo de las pruebas.

No se realizó ninguna consideración adicional además de las mencionadas anteriormente, es decir, no hubo selectividad considerando género, raza, origen étnico, religión, situación socio-económica u otro aspecto médico o social que no esté relacionado directamente a la posible presencia o ausencia de escoliosis, hiperlordosis o hipercifosis.





En cuanto a los datos obtenidos del paciente, todos se trataron como parámetros. Se les asignó un número, y serán tratados en el estudio con dicho identificador. La información obtenida de los procedimientos con personas se empleó únicamente en la forma de resultados estadísticos, y no se crearon expedientes personales asociados a los participantes. Las fotografías de la espalda de los voluntarios y sus datos de su reconstrucción aquí referidos, se presentan de modo que se pueda mantener el anonimato del voluntario, y mencionando únicamente los datos médicos que sean relevantes e indispensables.

Las pruebas a las que se sometieron los pacientes, debidamente conscientes de ellos mediante la carta de consentimiento informado (anexa en el Apéndice D) son los siguientes:

- Análisis anatómico (estudios cinéticos de Wilder: observaciones sobre rotación y traslación de las vértebras) mediante exploración física, efectuado por un especialista, con el fin de determinar la posible presencia o ausencia de asimetrías posturales, concretamente escoliosis, hiperlordosis e hipercifosis.
- Exploración de la superficie anatómica de la espalda para reconocer puntos anatómicos característicos que se distingan con facilidad y se puedan relacionar con el estado de la columna vertebral.
- Captura de imágenes de la espalda bajo patrones de luz estructurada y reconstrucción tridimensional. Dichas imágenes tratadas con las medidas pertinentes para resguardar su identidad y privacidad.
- Comparación la información obtenida del análisis anatómico y la reconstrucción tridimensional para determinar la certeza clínica.

## 5.2. Casos de estudio

### 5.2.1. Sujeto 1: Femenino 24 años

#### Interpretación clínico-funcional

**Observaciones:** Desde una vista anterior, se aprecia en la voluntaria buena linealidad con la línea de plomada, aunque la cabeza presenta rotación hacia la izquierda y la oreja izquierda presenta mayor elevación que la derecha, sin embargo, hay simetría en rasgos faciales.

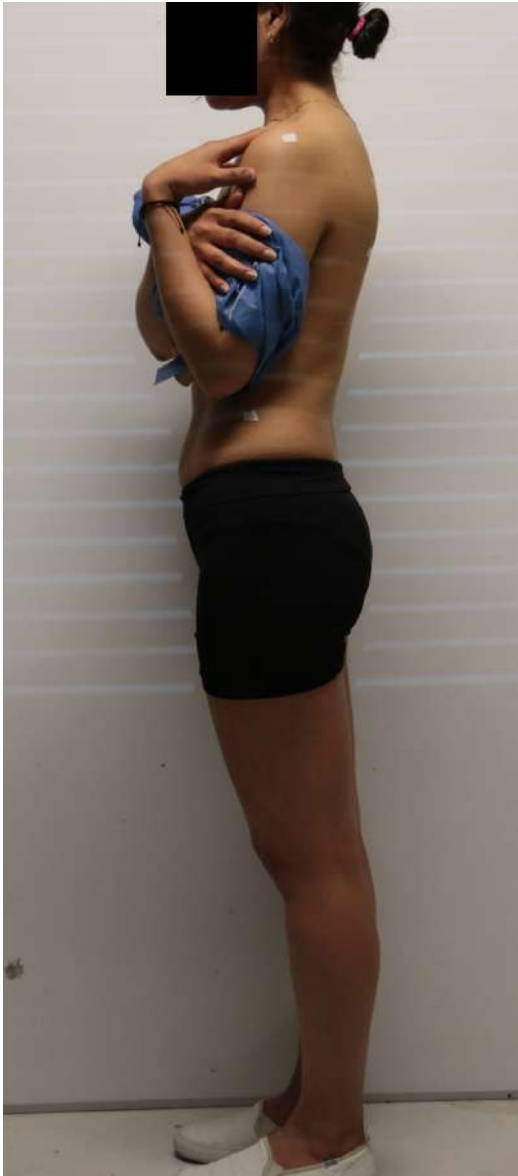
También hay simetría en clavículas y escápulas. El pecho derecho es más elevado y el izquierdo más abierto. Se aprecia que la sínfisis pubiana se encuentra ligeramente a la derecha de la línea de plomada.

Se aprecia *genu recurvatum* en ambas rodillas: están en valgo e hiper extensión, y un aparente pie flexible.

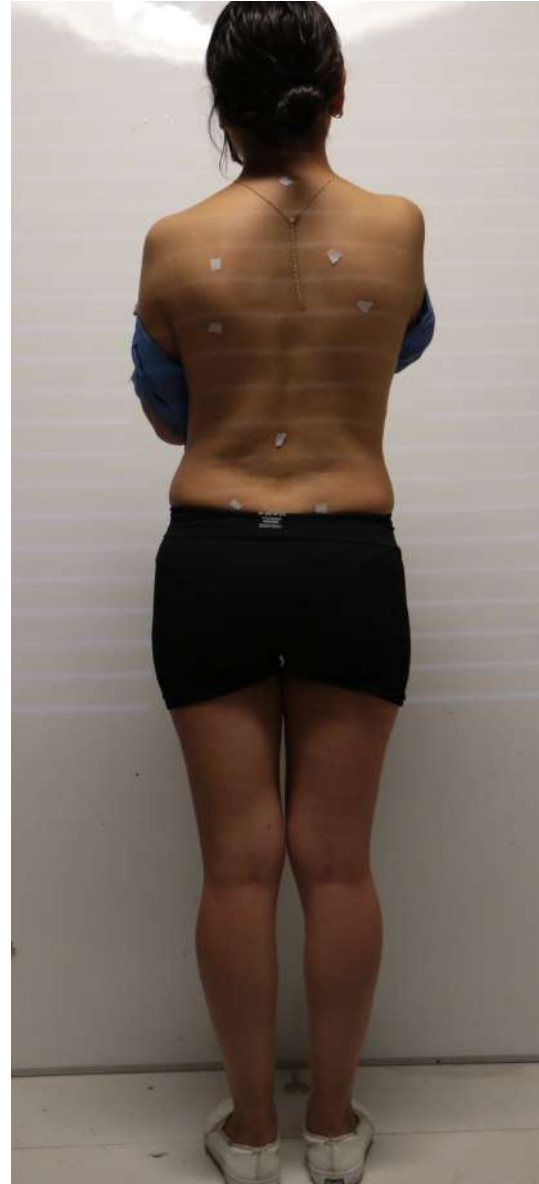
Desde una vista lateral derecha se aprecia claramente una hiperlordosis lumbar, marcada por protuberancia abdominal, lo que indica que el *genu recurvatum* es una compensación a esta condición. Además, se aprecian los hombros adelantados, aunque la cabeza está perfectamente alineada sobre el pubis.

La vista posterior confirma la rotación a la izquierda de la cabeza y la separación de ambas escápulas. Aquí se observa claramente una escoliosis dorsal derecha no compensada, de probable causa idiopática, y la línea interglútea desplazada ligeramente a la izquierda.

Finalmente, la vista izquierda muestra de nuevo la hiperlordosis y la protusión abdominal, sin embargo, se aprecia que el *genu recurvatum* es más prominente en la rodilla izquierda que en la derecha.



(a) Vista lateral del Sujeto 1. Evidencia hiperlordosis y *genu recurvatum* en ambas rodillas.



(b) Vista posterior del Sujeto 1. Evidencia escoliosis derecha dorsal.

Figura 5.1: Vistas lateral izquierda y posterior del Sujeto 1, femenino de 24 años (elaboración propia).

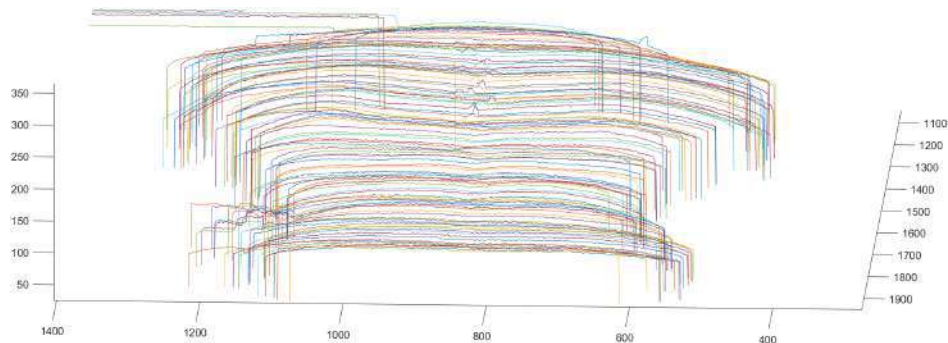


Figura 5.2: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 1 (elaboración propia).

En el interrogatorio, afirmó padecer dolor en la zona lumbar de 3 meses previos a la valoración, afirmando que es por un desgarre del nervio ciático. Aunque la revisión indica por el contrario una compresión del nervio ciático lumbar debido a la tensión postural y una posterior inflamación.

**Diagnóstico:** Escoliosis idiopática derecha dorsal no compensada. Rotación de cabeza hacia la izquierda. Escápulas aladas. *Genu recurvatum* en ambas rodillas (mayor en la izquierda) secundarias a hiperlordosis lumbar. Posible compresión del nervio ciático lumbar.

**Recomendaciones:** Ejercicios de postura para la cadera y ejercicios hipopresivos.

#### Valoración con luz estructurada

En la reconstrucción de la Sujeto 1, apreciable en la figura 5.2, muestra el relieve de la espalda desde la cadera hasta las primeras vértebras cervicales, y se aprecia claramente la silueta de la voluntaria. Con la reconstrucción se notó una mayor prominencia del lado derecho del tren superior, correspondiente a la escápula izquierda. La escápula derecha no reveló signos de alteración.

El recorrido de la columna vertebral es fácilmente determinable en las zona dorso-lumbar, sin embargo, requirió de asistencia e interpretación para lograr discernir su posición en la zona cervico-dorsal, debido a que su morfología cambió (consultar sección para la discusión) sin embargo, el análisis de la zona dorso-lumbar reveló un desplazamiento hacia la derecha de la depresión correspondiente aparentemente a las apófisis espinosas, de modo que la información de dicha reconstrucción revelaría que se trata de una posible escoliosis derecha, que afecta la zona dorsal. Sin embargo, la interpretación revelaría signos de escápula alada bilateral, mayor en miembro izquierdo.

Por su parte no muestra signos de hipercifosis ni hiperlordosis, de modo que en ese aspecto, no corresponde a la valoración clínico funcional de la sección anterior.

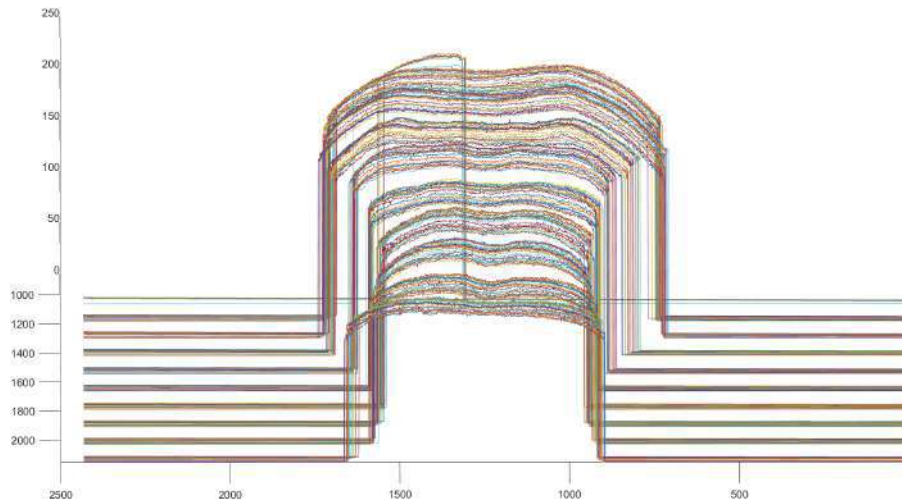


Figura 5.3: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 2 (elaboración propia).

### 5.2.2. Sujeto 2: Femenino 21 años

#### Interpretación clínico-funcional

**Observaciones:** Desde una vista frontal, en sentido céfalo-caudal se aprecia una lateralización izquierda de cabeza, una rotación derecha del tren inferior y una lateralización y rotación derechas de la sínfisis pubiana.

En rasgos faciales se aprecia simetría, con excepción de la boca, que está más elevada del lado izquierdo. Se aprecia mayor tonificación en el trapecio izquierdo, lo que produce una mayor elevación de dicho hombro con respecto al derecho. La voluntario reporta acudir al gimnasio habitualmente. Hay simetría en clavículas y en pecho, así como en miembros superiores.

Desde la vista lateral derecha se nota que la cabeza está alineada, y el hombro derecho ligeramente adelantado. Se aprecia una ausencia de lordosis natural en la zona lumbar, pero perfectamente funcional, y simetría de rodillas.

Desde una vista posterior, se confirman las observaciones ya mencionadas de cabeza y trapecio, además de que la escápula izquierda se aprecia rotada y más elevada que la derecha, aunque ambas se encuentran en abducción.

Se observa una escoliosis lumbar izquierda no compensada, probablemente idiopática, y la línea interglútea ligeramente a la izquierda.

Desde la vista lateral derecha confirma la rectificación, y el pie izquierdo con el arco disminuido, así como el hombro frontalizado.

**Diagnóstico:** Escoliosis lumbar izquierda no compensada con rectificación lumbar. Escápula derecha abducida, escápula izquierda abducida, elevada y rotada. Rotación de tren inferior a la derecha. Pie izquierdo con arco disminuido.

**Recomendaciones:** Ejercicios heterométricos, isométricos e hipopresivos. Se recomienda revisar su plan de ejercicio para los miembros superiores.

#### Valoración con luz estructurada

La reconstrucción tridimensional (Figura 5.3) de la espalda de la Sujeto 2 reveló que la trayectoria de la columna vertebral se nota desviada a la derecha del punto medio de la región reconstruida.



Un análisis más detallado sobre la reconstrucción, con un algoritmo que considere más criterios, sin embargo podría notar la rotación a la derecha del tren inferior.

Se aprecian además fácilmente las escápulas, y los bordes inferiores de dichos huesos muestran una abducción de ambas escápulas, es decir, bilateral.

No se encuentran signos de hipercifosis ni hiperlordosis, aunque el criterio para hiperlordosis lumbar indicado por la literatura médica, indica que la curvatura natural es de  $40^\circ$  a  $60^\circ$ , sin embargo, resulta, a primera vista, más complicado determinar cuando hay una rectificación.

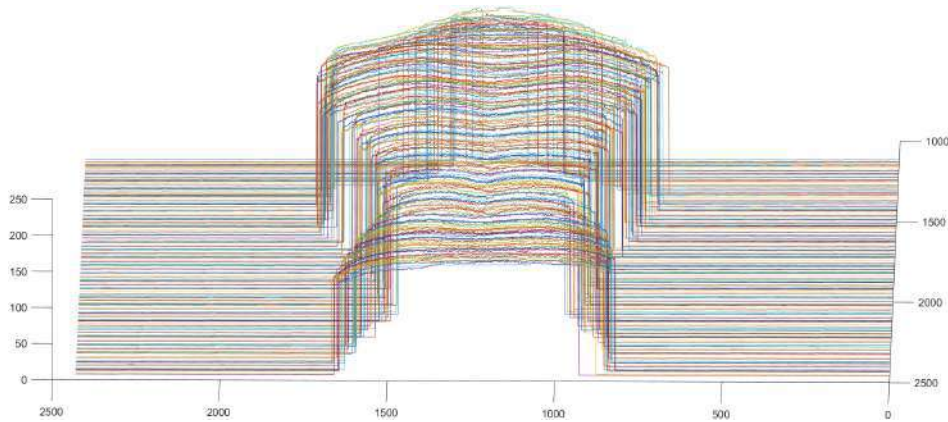


Figura 5.4: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 3 (elaboración propia).

### 5.2.3. Sujeto 3: Femenino 20 años

#### Interpretación clínico-funcional

**Observaciones:** Desde la vista anterior se aprecia un cuerpo aparentemente simétrico, con la excepción de una lateralización derecha de cabeza. Se observa hombro derecho en elevación, pero existe simetría en clavículas, brazos, senos, codos y caderas. No se aprecia acortamiento de extremidades, y existe simetría en los miembros superiores e inferiores. Sin embargo se aprecia una rotación medial de la rodilla derecha, que ejerce un acortamiento postural.

Desde la vista lateral derecha se aprecia una cabeza en correcta alineación con respecto al hombro, pero una anteposición abdominal compensada, secundaria de una hiperlordosis lumbar.

La vista posterior confirma la lateralización derecha con rotación de la cabeza y revela una escoliosis derecha dorsal no compensada no patológica y perfectamente funcional. Existe también ligera elevación de la cadera derecha por posible contractura muscular del cuadrado lumbar. Se observa también que la línea interglútea está lateralizada a la derecha. El ángulo de pie es adecuado, no existe hiperextensión, sin embargo, las rodillas se aprecian en varo.

La vista lateral izquierda no revela alguna patología adicional pero confirma la hiperlordosis lumbar.

**Diagnóstico:** Lateralización derecha de cabeza. Hiperlordosis lumbar. Escoliosis dorsal derecha no compensada. Probable contractura del músculo cuadrado lumbar derecho. Ligero acortamiento postural secundario a rotación medial de rodilla derecha.

**Recomendaciones:** Ejercicios de fortalecimiento abdominal, ejercicios heterométricos, isométricos e hipopresivos.

#### Valoración con luz estructurada

La reconstrucción (Figura 5.4) muestra la trayectoria de la columna resaltada con la zona dorso-lumbar, y en dicha zona la trayectoria se curva a la derecha con pendientes máximas de hasta  $20^\circ$ .

No hay signos de hipercifosis, sin embargo, la trayectoria de la zona dorso-lumbar, revelada por el marcado bajorrelieve, muestra en realidad una depresión de la columna vertebral

Un análisis interpretativo de la reconstrucción tridimensional reveló por su parte que existe una rotación del tren inferior a la izquierda. La abducción de las escápulas es muy sutil, y la reconstrucción apenas las percibe.

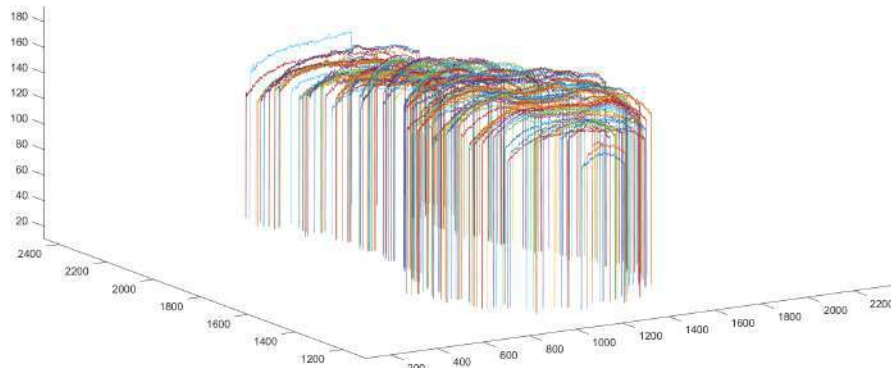


Figura 5.5: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 4 (elaboración propia).

#### 5.2.4. Sujeto 4: Femenino 19 años

##### Interpretación clínico-funcional

Desde la vista frontal se aprecia una ligera rotación derecha de cabeza, sin embargo hay simetría de rasgos faciales. Hay lateralización de tronco hacia la izquierda, además de una diferencia en la linealidad con el esternón y la sínfisis pubiana. Se observa una depresión en el hombro izquierdo.

Existe *genum recurvatum* en ambas rodillas, además de que la voluntaria tiene una base de sustentación amplia.

En la vista izquierda se observa el cuerpo echado hacia atrás Y la cadera hacia adelante sin embargo no existe hipercifosis además de que se aprecian las rodillas en hiperextensión.

Desde la vista posterior se confirma la rotación de cabeza y la depresión del hombro izquierdo. Se observa linealidad en la columna vertebral, aunque existe una ligera hiperlordosis en la zona dorso lumbar, además de que las rodillas también se encuentran en valgo.

Desde la vista izquierda se confirma la hiperlordosis dorso-lumbar, acorde a la posición de la cadera y el cuerpo, cómo secundaria a la hiperextensión de las rodillas. La voluntaria en el interrogatorio reportó padecer dolor lumbar.

**Diagnóstico:** Ligera hiperlordosis dorso-lumbar secundaria a *genum recurvatum* bilateral. Lateralización general hacia la izquierda. Ligera rotación de cabeza hacia la derecha.

**Recomendaciones:** Ejercicios de fortalecimiento abdominal, ejercicios heterométricos, isométricos e hipopresivos.

##### Valoración con luz estructurada

La espalda reconstruida de la Sujeto 4 (Figura 5.5) muestra que la trayectoria de la columna vertebral corresponde a un estado aparentemente sano en la zona dorso-lumbar. Sin embargo, interpretando el relieve, existe prominencia bilateral de las escápulas y una mayor separación de la derecha.

Presenta un marcado relieve en la zona dorso-lumbar, signo de hiperlordosis, pero presenta ausencia de signos de hipercifosis.

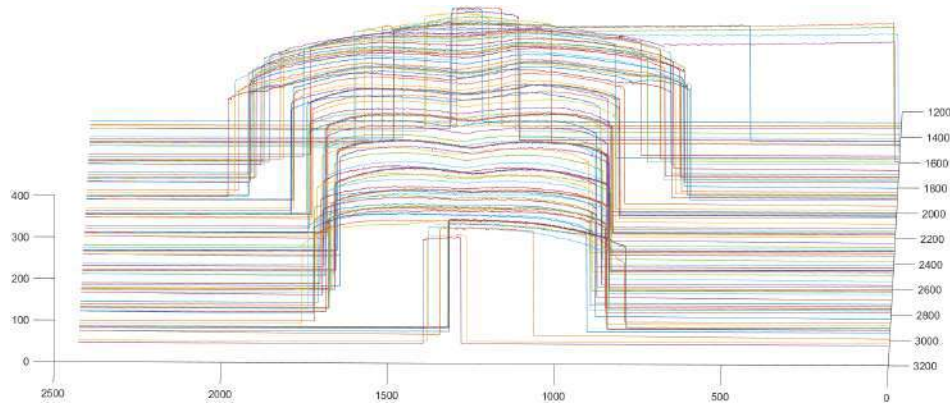


Figura 5.6: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 5 (elaboración propia).

### 5.2.5. Sujeto 5: Masculino 26 años

#### Interpretación clínico-funcional

**Observaciones:** Desde una vista anterior se aprecia una desviación izquierda a nivel dorso lumbar de la línea media de plomada, en aparente escoliosis no compensada, y una rotación a la izquierda del tren superior.

Se aprecia simetría de la cabeza con la línea de plomada, no hay rotación: esta se encuentra en posición correcta, pero aparentar estar a la derecha por compensar la rotación de tren superior. Hay asimetría en cejas con la izquierda más elevada, y se observa que el ojo izquierdo es más grande y la nariz está lateralizada a la izquierda.

Las rodillas están correctamente alineadas, pero la base de sustentación es más amplia.

Desde una vista lateral derecha se confirma la rotación de tronco y la alineación de la cabeza con la línea de plomada lateral. Se aprecia que la escápula izquierda está alada y una ligera hipercifosis dorsal, y una posible hiperlordosis. Cabe mencionar que en el interrogatorio reportó dolor en zona lumbar.

La vista posterior revela una escoliosis no patológica, fácilmente apreciable, pero menor a  $20^\circ$ . Se confirma la escápula alada en la izquierda, y en la derecha se observa una abducción de 7cm de la espina dorsal, mucho mayor que la izquierda (5cm). La cresta ilíaca izquierda se aprecia más abajo que la derecha.

La vista lateral izquierda, por su parte, nos confirma la rotación y la protuberancia abdominal y la hiperlordosis, además de que revela una hiperextensión de rodilla, y un acortamiento de la pierna izquierda, de 3 milímetros tras realizar la medición.

**Diagnóstico:** Rotación izquierda de tren superior, compensada en la cabeza, escápula izquierda alada y derecha abducida, hipercifosis, *genu recurvatum* en rodilla izquierda, secundarias a acortamiento de 3mm en pierna izquierda. Hiperlordosis por debilidad muscular abdominal.

**Recomendaciones:** Ejercicios de fortalecimiento abdominal, ejercicios heterométricos, isométricos, hipopresivos y estiramientos con metodología de Williams o McKenzie.

#### Valoración con luz estructurada

La información revelada por la reconstrucción, donde se aprecian curvaturas muy suaves, correspondientes a la trayectoria de la columna vertebral. Sin embargo una depresión significativa en la zona dorso-lumbar, que podría ser indicativa de hiperlordosis.





Fuera de ello, el voluntario no presenta signos de hipercifosis, aunque la zona dorsal está desplazada a la izquierda y podría revelar una posible escoliosis al interpretarse, sin embargo, al no ser muy pronunciada para desviar lo suficiente la línea de la columna, aparentemente el paciente es sano.

Aunque un análisis interpretativo de la reconstrucción, nos indicaría la existencia de una rotación del tren superior a la izquierda, pero no revelaría que la posición de la cabeza es compensada a dicha rotación debido a que la luz no refleja sobre dicha área.



(a) Vista lateral del Sujeto 6.



(b) Vista posterior del Sujeto 6.

Figura 5.7: Vistas lateral izquierda (5.7a) y posterior (5.7b) del Sujeto 6, se observa claramente la escoliosis (elaboración propia).

### 5.2.6. Sujeto 6: Masculino 22 años

#### Interpretación clínico-funcional

**Observaciones:** Desde la vista frontal se aprecia inmediatamente una rotación izquierda de esternón y clavículas. No existe alineación con la cadera, que también presenta una rotación izquierda, y se observa asimetría de rodillas, con la izquierda más abajo que la derecha.

En rasgos faciales se observa la ceja derecha más abajo y el ojo izquierdo más grande, además de que la oreja derecha se encuentra más proyectada.

Desde la vista lateral derecha se aprecia una correcta alineación con la línea media de plomada, sin hiperlordosis ni hipercifosis, aunque se aprecia una protuberancia abdominal por tejido adiposo.

La vista posterior revela una escoliosis izquierda dorsal no compensada mayor a  $10^\circ$  pero menor a  $20^\circ$  sin afectar su funcionalidad. La cadera izquierda se encuentra más elevada por posible causa postural. Se aprecia una posible contractura en el músculo cuadrado lumbar izquierdo, mientras que el cuadrado lumbar derecho se encuentra más elongado. En el interrogatorio no reportó lesión ni

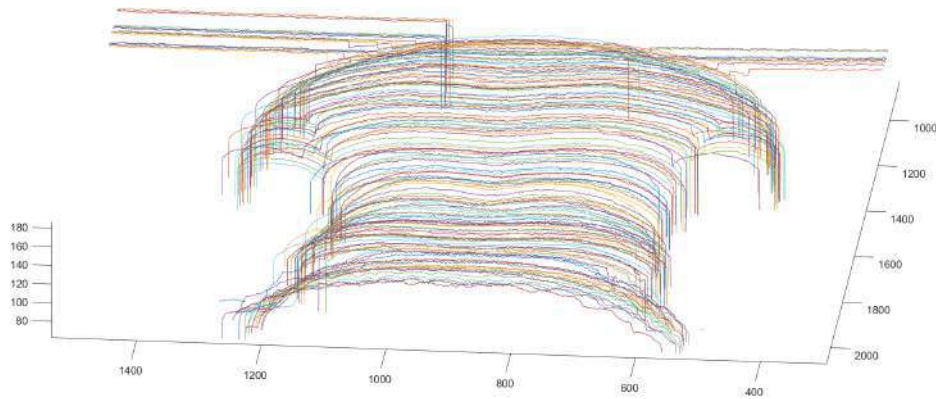


Figura 5.8: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 6 (elaboración propia).

dolor en la zona, sin embargo, si menciono dolor en la rodilla derecha.

La vista lateral izquierda reveló la pierna izquierda más alargada que la derecha Y al medirla extremidades inferiores se encontró un acortamiento en pierna derecha de 7 mm, pero al no padecer obesidad, dicho acortamiento no ha afectado su funcionalidad.

**Diagnóstico:** Escoliosis izquierda dorsal no compensada menor a  $20^\circ$ , rotación dorsal hacia la izquierda y asimetría de rodillas secundarias a un acortamiento de 7mm del miembro inferior derecho.

**Recomendaciones:** Ejercicios de heterométricos, isométricos e hipopresivos, y ejercicios de fortalecimiento abdominal.

#### Valoración con luz estructurada

La espalda no muestra signos de hipercifosis ni de hiperlordosis aunque la curvatura de la reconstrucción indica es sutil y menos pronunciada.

La línea media de la columna vertebral no muestra desviación en la zona dorso-lumbar, por lo que aparentemente no habría escoliosis en dicha zona, y la ausencia de curvatura detectable dentro de la zona cervico-dorsal tampoco sería signo de escoliosis, contrario a lo observado en el análisis clínico postural.

Sin embargo, un análisis interpretativo mostraría que la escápula derecha está ligeramente más elevada que la izquierda, que podría ser por la forma en la que se acomodó el voluntario en dicha prueba.



Figura 5.9: Flexión hacia adelante del Sujeto 7, se evidencia claramente la rotoescoliosis y las afecciones secundarias (elaboración propia).

### 5.2.7. Sujeto 7: Masculino 22 años

#### Interpretación clínico-funcional

En el interrogatorio previo a valoración el voluntario reportó haber sido ya diagnosticado con rotoescoliosis, además de haber padecido de recién nacido craneosinostosis, tratada posteriormente. El fisioterapeuta especialista determinó que puede proceder con el estudio.

Desde la vista anterior se aprecia inmediatamente una lateralización derecha en cabeza, desviación de causa probablemente escoliótica. La barbilla está jalada hacia la derecha, la oreja derecha se encuentra más abajo que la izquierda, sin emabrgo, existe simetría en el resto de rasgos faciales.

La clavícula izquierda se observa más elevada que la derecha, los pectorales se aprecian simétricos, aunque existe elevación de la cadera derecha. Asimismo la rodilla derecha también se encuentra más elevada que la izquierda, ambas rodillas se aprecian en varo secundarias a pie plano, contrario al valgo que cabría esperar de dicha condición.

Desde la vista posterior se aprecia un anteriorización de la cabeza. Se observa una proyección hacia atrás de las escápulas, las cuales aparentan ser de una escala mayor al promedio. Reporta haberlas tenido previamente abducidas, pero que con el ejercicio físico se redujo la condición. Además la escápula derecha se encuentra más elevada que la izquierda, secundaria a la rotoescoliosis. Se observa una aparente hiperlordosis, que en realidad es una compensación a la rotoescoliosis. Existe una ligera hipercifosis, secundaria ala rotoescoliosis y la cráneosinostosis. El voluntario es muy funcional para haber padecido cráneosinostosis y sufrir de rotoescoliosis.

**Diagnóstico:** Rotoescoliosis derecha cervico-dorso-lumbar compensada. Anteposición de cabeza. Proyección posterior de las escápulas. HiperCIFosis dorsal secundaria a la rotoescoliosis. Pie plano

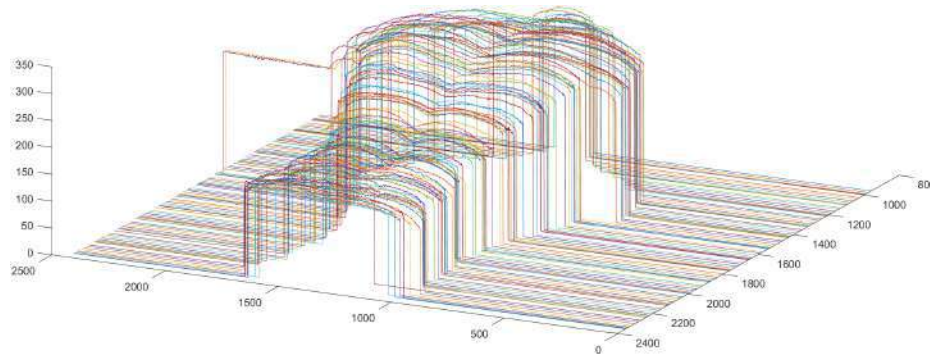


Figura 5.10: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 7 (elaboración propia).

varo bilateral.

**Recomendaciones:** Se le aconseja revisar y cambiar su plan de ejercicio y trabajar el músculo subscapular ya que presenta debilidad en ambos miembros. Así como seguir las indicaciones de su médico y/o traumatólogo para las condiciones ya diagnosticadas.

#### Valoración con luz estructurada

La reconstrucción tridimensional (Figura 5.10) reveló marcados desniveles en las regiones de la espalda, por su somatotipo mesomorfo.

Revela, primero que nada, una marcada hipercifosis dorsal, y una depresión en la zona dorso-lumbar, en una aparente hiperlordosis.

De la misma forma, la curvatura de la columna, fácil de identificar por la reconstrucción de la musculatura, se marca desviada claramente a la derecha en aparente escoliosis dorso-lumbar derecha.

Por lo marcado de la patología, dichas patologías resultaron fácilmente identificables, sin la necesidad de interpretación, sin embargo, el sistema ni puede detectar que se trate de una rotoescoliosis, el cuál ya es un diagnóstico médico que requiere además confirmación mediante rayos X.



(a) Vista lateral del Sujeto 8. Se aprecia la hiperцифosis ni hiperlordosis



(b) Vista posterior del Sujeto 8. No se aprecian rotaciones.

Figura 5.11: Vistas lateral izquierda (5.11a) y posterior (5.11b) del Sujeto 8 (elaboración propia).

### 5.2.8. Sujeto 8: Masculino 23 años

#### Interpretación clínico-funcional

Desde una vista frontal se aprecia inmediatamente una amplia base de sustentación de 30 a 40 cm, sin embargo posee buena alineación corporal y simetría en los miembros superiores e inferiores. Hay simetría de rasgos faciales, con la excepción de la ceja izquierda más elevada que la derecha y el ojo izquierdo más grande que el derecho, además de una lateralización derecha del labio, y la borla derecha más tonificada.

Hay simetría en las clavículas y hombros, el pecho izquierdo se encuentra más abajo que el pecho derecho, pero son simétricos. Existe también simetría de caderas, brazos y rodillas, pero se aprecia un pie plano con pronación bilateral.

Desde una vista izquierda se aprecia una marcada anteposición de cabeza y unas evidentes hiperцифosis e hiperlordosis: la cabeza se encuentra aventada hacia arriba y elevada, lo que produce la hiperlordosis cervical y la hiperцифosis dorsal. Se aprecia además la ausencia de lordosis natural en la zona lumbar marcando claramente una rectificación lumbar y una linealidad en el abdomen. La escápula derecha está más abajo que la izquierda y se encuentra abducida la izquierda se encuentra a 8 cm de la columna mientras que la derecha a 9.5.

Desde la vista posterior no se aprecia rotación de ningún segmento del cuerpo, hay linealidad y

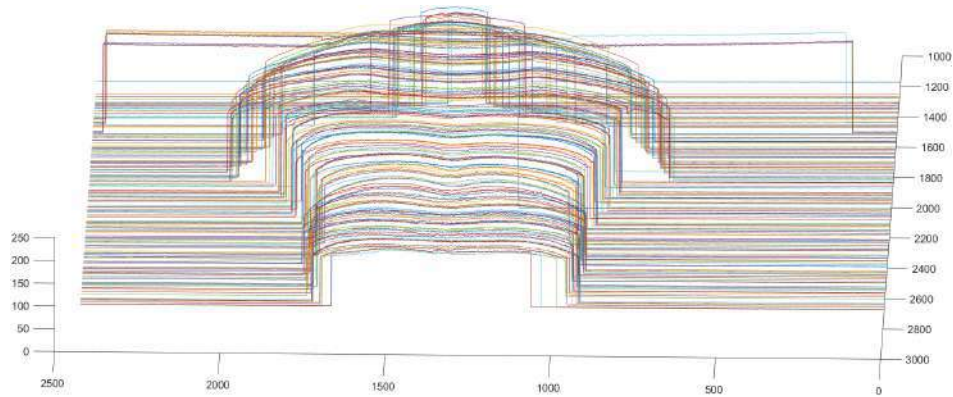


Figura 5.12: Vista posterior de la reconstrucción de la espalda del Sujeto 8 (elaboración propia).

simetría en la cadera. Se aprecia un *genum recurvatum* en las rodillas que se encuentran en extensión y recurvadas.

Desde una vista lateral izquierda se confirma la anteposición de la cabeza y la retrovolución de la zona dorsal.

Cabe mencionar que al revisar su equilibrio el voluntario siente que se cae al reducir la separación de sus piernas.

**Diagnóstico:** Anteposición de cabeza, elevada y orientada hacia arriba. Hiperlordosis cervical compensada con hipercifosis dorsal. Escápula derecha abducida. *Genum recurvatum* en ambas rodillas. Pie plano con pronación bilateral.

**Recomendaciones:** Ejercicios de heterométricos, isométricos e hipopresivos.

#### Valoración con luz estructurada

El sistema no encontró, tras el análisis de curvaturas, una desviación de la aparente posición de la columna vertebral que sugiera la posible presencia de escoliosis, por lo que en apariencia no la presenta.

El zona dorsal se aprecia una inclinación anterior marcada y evidencia la presencia de hipercifosis dorsal, sin embargo, el sistema no fue capaz de detectar correctamente la hiperlordosis cervical.

Además, como se ve en la figura, el voluntario presenta rectificación en la zona dorso-lumbar, y al igual que con el Sujeto 2, no se puede determinar con los criterios actuales la presencia de dicha patología con el sistema si no es con la interpretación.

## Capítulo 6

# Discusión de resultados

### 6.1. Análisis del sistema opto-mecánico

Como se ha explicado en la presente tesis, es necesario construir, implementar y validar nuevas técnicas que permitan dar información certera de apoyo al diagnóstico buscando la inocuidad y repetibilidad de los estudios paraclínicos. Bajo estas premisas, se diseñó el sistema de luz estructurada. Sin embargo, como en todos los sistemas, existieron limitaciones a la eficacia debido a parámetros intrínsecos.

Una de las primeras limitaciones que surgen en los sistemas de luz estructurada son los modelos ópticos (Kim *et. al.*, 2009; Bogdán, 2020) en donde existen aberraciones ópticas relacionadas con la construcción de las lentes. Por otro lado, estos sistemas son muy susceptibles a perder la calibración debido a fallas en la alineación de los ejes como lo son el eje óptico y eje de referencia cartesiano, el paralelismo entre el plano de referencia y el plano de imagen (Hartley y Zisserman, 2004), y finalmente, problemas en la colocación del paciente, esto es una mínima rotación sobre el eje sagital que puede provocar un falso positivo a una patología.

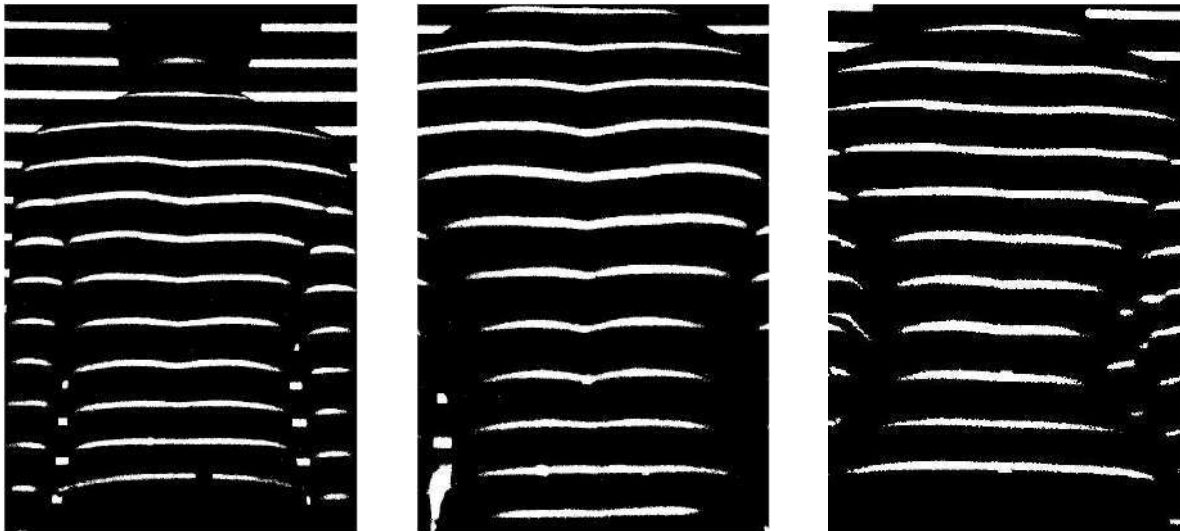
Para minimizar los errores antes descritos, en el presente trabajo, siguiendo trabajos de otros autores, se ha optado por utilizar espacios calibrados acordes a las distancias requeridas por el modelo óptico, la utilización de cámaras (Canon 70D con lente de 135mm en este caso) con compensación de aberración óptica. En el estudio, el plano de imagen utilizado fue multi-enfoque, característica que se le atribuye también a la cámara utilizada. En cuanto a los errores asociados a la postura del paciente, se recurrió a una proyección de líneas verticales, para que en combinación con las horizontales usadas en la reconstrucción, permitieran definir de manera acertada la colocación del voluntario.

Adicionalmente, se requirió de un experto con experiencia en la colocación y manejo del voluntario, ya que, cuando este se coloca frente al plano de referencia, es muy común que trate de hacer compensaciones posturales, por tanto, resultó necesario liberar primero la tensión del mismo para adquiriera su posición normal en reposo.

### 6.2. Consideraciones del protocolo y la morfología

En el proceso de selección de voluntarios, dentro de las consideraciones que se hicieron dentro del protocolo, fue que debían ser personas de somatotipo ectomorfo, esto con el fin de apreciar mejor puntos anatómicamente característicos (Figura 4.4) que diesen información directa sobre el estado de su salud postural en la columna vertebral (Kendall *et. al.*, 2005), ya que aquellas personas de somatotipo endomorfo poseen más tejido adiposo que dificultaría la identificación de los puntos anatómicos característicos, además de que la obesidad es identificada como un importante factor de riesgo en la





(a) Vista posterior umbralizada del Sujeto 5, un ectomorfo.

(b) Vista posterior umbralizada del Sujeto 7, un mesomorfo.

(c) Vista posterior umbralizada del Sujeto 4, una ectomorfa.

Figura 6.1: Vista posterior de la imagen umbralizada voluntarios ectomorfo de bajo peso, mesomorfo y ectomorfa (elaboración propia).

presencia y desarrollo de patología posturales en la espalda (Zárate-Kalfópulos *et. al.*, 2018; Zúrita *et. al.*, 2014), lo que sesgaría el estudio al elegir miembros de un grupo vulnerable y con tendencia mayor a presentarlas.

Sin embargo, se aceptaron dentro del estudio a personas mesoformas, y los resultados en el análisis de imagen mostraron morfologías interesantes en los patrones de reconstrucción al ser analizadas por el especialista (Figura 6.1).

Si comenzamos observando la imagen a la izquierda (figura 6.1a), que corresponde a un voluntario masculino ectomorfo, de bajo peso, aunque no inferior a la media para su talla, observamos, en sentido cefalocaudal, una curvatura suave que se adapta a las escápulas en la parte superior, a la curvatura posterior de las costillas en la zona dorsal, y que se reduce progresivamente en la zona lumbar ante el reducido tejido adiposo.

La figura 6.1b, correspondiente a un masculino mesomorfo, corresponde a la misma tendencia que el ectomorfo, sin embargo, el bajorrelieve correspondiente a la espina dorsal es mucho más marcado, concretamente en la zona dorso-lumbar, por la aumentada masa muscular, lo que facilita su identificación a simple vista.

Por último, la figura 6.1c corresponde a una femenino ectomorfa, donde se aprecia claramente la curvatura de las caderas, pero la luz presenta una mayor dispersión en los bordes en lugar de reflexión. En esta imagen se aprecia una curvatura más suave y reducida de las líneas incidentes, y el relieve de la columna vertebral es más difícil de apreciar, pero el análisis si permitió detectarlo.

Sin embargo, un análisis sobre personas de somatotipo endomorfo revelaría un mayor arco en las curvas proyectadas en la zona lumbar, correspondiente al tejido adiposo, pero reduciría la apreciación de la curvatura en la zona dorsal, y en caso de considerar las escápulas dentro del modelo, también limitaría su ubicación.

El análisis y la identificación de la columna vertebral a partir de las imágenes, ignorando relieve, variable como se mencionó antes, e influido más por otras características fisiológicas que por la morfología de la espalda, tuvo el fin de evitar los falsos positivos generados en los estudios de relieve a



partir de patrones de Moiré en los estudios de Kim *et. al.* (2009) o Bogdán (2020).

El estudio brindó buena información de la aparente posición de la columna vertebral basándonos en los criterios previos, sin embargo, concretamente en las mujeres, y por la baja reflexión de la luz sobre el cabello, resultó imposible en todos los casos encontrar información de la posición de la cresta occipital y de las vértebras en la zona cervical. Sus efectos se discutirán en la sección subsecuente.

### 6.3. Análisis de la validación clínica

Tras comparar los resultados de las valoraciones clínico-posturales, con la información extraída de las reconstrucciones tridimensionales, se observaron diferentes tasas de coincidencia en la escoliosis y la hipercifosis, no obstante, no se puede decir lo mismo de la hiperlordosis.

De los 8 casos de estudio, 6 dieron positivo a escoliosis, mientras que 2 aparentemente están sanos. Se identificó correctamente a estos últimos, sin embargo no se indicó la presencia de la patología en dos ocasiones en que sí estaba presente, a pesar de ser capaz de identificar en el relieve signos asociados a ella, los limitados criterios no permitieron su determinación.

En el caso de la hipercifosis, hubo una coincidencia en los 8 casos de estudio, aunque cabe mencionar que solo hubo dos casos positivos a dicha patología, por lo que presentó una baja incidencia a lo largo del estudio, y harían falta más pruebas para determinar con certeza su efectividad.

En el caso de la hiperlordosis, hubo tres casos positivos a dicha patología, sin embargo, esto es sin considerar otras afecciones en la misma zona que también estuvieron presentes, como dos casos de rectificación lumbar, evidentemente no detectada directamente por el sistema por no tenerla en consideración.

Sin embargo, limitándonos a la evaluación de la hiperlordosis, hubo coincidencia en 3 casos: 2 aparentemente negativos y 1 positivo. Los otros 2 casos positivos no fue capaz de identificarlos, y en tres ocasiones arrojó un falso positivo a voluntarios que sí tenían afecciones posturales en la espalda, pero no hiperlordosis propiamente dicha, lo que no hace fiable la predicción arrojada por los datos de la reconstrucción.

Buena parte de esta poca fiabilidad, en el caso de la hiperlordosis, y como posible causa de los errores en la identificación de escoliosis, podría deberse a la limitación en los criterios y puntos característicos a analizar de los voluntarios por el sistema y la reconstrucción.

Otro factor importante para el análisis de la hiperlordosis y escoliosis, es que en varios casos resultó estar acompañada de una hiperextensión de rodillas, de modo que se compensan mutuamente, y de expandir el sistema de análisis a esta región, podría ser posible tomarlas de criterio para mejorar la precisión de la información arrojada.

Sin embargo, es evidente que la resolución de las reconstrucciones permite la apreciación de más puntos anatómicos característicos que, con mayor información de las mismas, ya que como son comunes, en algunos casos, a numerosas patologías, como es el caso de las escápulas (Kendall *et. al.*, 2005), tras mejorarse su estudio y disponer de mayor información, sería posible incluirlos como criterios de evaluación para obtener una mayor certeza.

### 6.4. Trabajo a futuro

Realizar un modelo o una técnica aceptada por la comunidad médica es un proceso extenso con numerosas consideraciones, e incluso los métodos tradicionales, como la radiografía, o los más modernos, como las tomografías computarizadas, tienen sus respectivas limitaciones. En el caso de un sistema de apoyo al diagnóstico de patologías posturales, aceptado y certificado por la comunidad médica, ha resultado ser un proceso que ha revelado consideraciones necesarias de hacer a futuro tras las evaluaciones de los primeros voluntarios.



Las patologías posturales y alteraciones anatómicas han demostrado ser complejas, y en la gran mayoría de los casos estudiados aquí, presentar otras alteraciones en otras partes del cuerpo, sobre todo los miembros inferiores, como compensación a dichas patologías, o como la causa de las mismas.

Más allá de las consideraciones y compensaciones ópticas tratadas en el presente trabajo, con el objetivo de reducir la incertidumbre y el error en el método de reconstrucción, y optimizar el método para facilitar su manejo, existen algunas consideraciones que deberían ser tomadas en cuenta a la hora de seguir investigando esta técnica.

En la parte anatómica, futuros estudios podrían considerar dentro de la reconstrucción los miembros inferiores, para expandir los criterios empleados en el diagnóstico, e incluso las patologías que son su objeto de estudio. Por su parte, en los miembros superiores, dado que las afecciones de las escápulas (puntos anatómicos más prominentes) muestran en ocasiones los mismos signos para diversas patologías, se podrían estudiar para expandir los criterios que considera el programa, y posiblemente las afecciones que pueda evaluar.

Sin embargo, incluso limitándonos a la presente técnica, tras definir en la presente tesis las consideraciones del estudio y los criterios más óptimos, tales como las distancias de los componentes ópticos y la preparación del voluntario, podría aplicarse a un mayor número de participantes en un periodo de tiempo más reducido, con la estandarización propuesta del método, para obtener un análisis estadístico más completo.

Con todo lo anterior mencionado, cabe aclarar que no es indicativo que el estudio actual está incompleto, ya que los estudios futuros propuestos exceden, por mucho, los objetivos planteados en la presente tesis, y resultaron como consecuencia de las averiguaciones encontradas en el transcurso de la investigación.

## Capítulo 7

# Conclusiones

Las afecciones posturales de la espalda, concretamente la escoliosis, hipercifosis e hiperlordosis, son más complejas de lo que aparentan a primera vista tras conocer solo su descripción, y es hasta que se revisa más a detalle la literatura, estadísticas y casos de estudio de primera mano, que se repara en lo complejo de estas enfermedades, los impactos en la salud, la incidencia y los factores de riesgo, y por último, lo reducido de la investigación en dichas áreas en comparación de otras áreas de la medicina.

Los actuales métodos de diagnóstico, valoración y radiografía, presentan cada sus respectivas limitaciones, pero dentro de las propuestas de reconstrucción tridimensional de cuerpo, en el ámbito clínico ya ha sido empleada la luz estructurada, y concretamente para el caso de las alteraciones anatómicas en la espalda, ya se han realizado algunas propuestas.

Sin embargo, la principal limitante del análisis de luz estructurada consiste en las aberraciones ópticas y la compleja geometría de los sistemas, además de la necesidad de una calibración constante de los sistemas para que los modelos de reconstrucción funcionen con precisión a partir de pocas imágenes, esto sin contar los requisitos computacionales para algoritmos robustos de análisis.

En el trabajo actual, las consideraciones ópticas, la calidad de los componentes ópticos y la posibilidad de usar dentro de la misma imagen puntos de control para la calibración, correcto enfoque y captura de imágenes, así como el análisis de la geometría del sistema, donde se limita el área de análisis, hizo posible que se pudieran minimizar las aberraciones ópticas al punto de volverlas despreciables para el análisis de la geometría del sistema.

La reconstrucción tridimensional permitió generar figuras de alta calidad, donde se aprecian con buena resolución, los puntos anatómicos característicos de la espalda humana, demostrando la posibilidad de minimizar los efectos del comportamiento de la luz, y poder analizar las imágenes mediante modelos sencillos de fotogrametría.

Sin embargo, la limitante a describir únicamente tres afecciones, y el número reducido de criterios empleados, no permitió la correcta automatización del sistema, ni el desarrollo de un modelo con muchos criterios en consideración, debido al número limitado de voluntarios y a la frecuencia en que alteraciones de estos puntos característicos son signos comunes a numerosas patologías.

Para concluir, el sistema opto-mecánico permite simplificar el análisis óptico y las consideraciones y la incertidumbre dadas por la óptica, y de seguirse explorando, perfeccionar y expandir los criterios empleados conforme nuevas investigaciones arrojen sobre los mismos más luz.

# Referencias

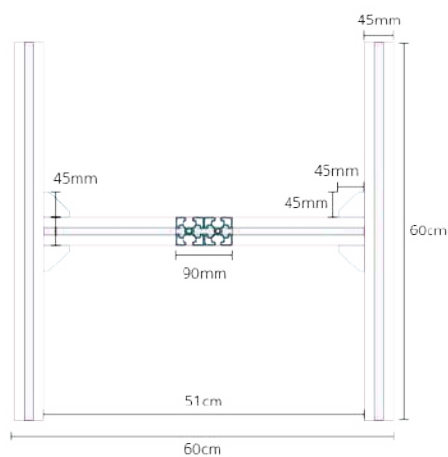
- Asher, A. (2022, 2 de julio). *What is lumbar lordosis?* Descargado de <https://www.verywellhealth.com/lumbar-lordosis-angle-what-is-normal-296978>
- Baker, J. F., y Robertson, P. A. (2020). Segmental contributions to lumbar lordosis: A computed tomography study. *International Journal of Spine Surgery*, 14(6), 949–955. doi: <https://doi.org/10.14444/7144>
- Bogdán, C. (2018, Octubre). The moiré method and its application in scoliosis. En *International interdisciplinary 3d conference engineering section*, Pécs, Hungría. Descargado de [https://www.researchgate.net/publication/340941004\\_The\\_Moire\\_Method\\_and\\_its\\_Application\\_in\\_Scoliosis](https://www.researchgate.net/publication/340941004_The_Moire_Method_and_its_Application_in_Scoliosis)
- Bogdán, C. (2020). *The moiré method and a research framework concept adapted to moiré imaging in scoliosis*. (Tesis de Master no publicada). MedTech, Wiener Neustadt, Austria.
- Carter, O., y Haynes, S. (1987). Prevalence rates for scoliosis in us adults: Results from the first national health and nutrition examination survey. *International Journal of Epidemiology*, 16(4), 537–544.
- Celestre, P., Dimar, J., y Glassman, S. (2018). Spinopelvic parameters: Lumbar lordosis, pelvic incidence, pelvic tilt, and sacral slope what does a spine surgeon need to know to plan a lumbar deformity correction? *Neurosurgery Clinics*, 29(3), 323–329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nec.2018.03.003>
- Cunha-Ciaccia, M. C., de Castro, J. S., Abduch-Rahala, M., Silveira-Penattia, B., Borin-Selegatto, I., Morette-Giampietra, J. L., y Vagnozzi-Rullo, V. E. (2017). Prevalence of scoliosis in public elementary school students. *Revista Paulista de Pediatria*, 35(2), 191–198.
- Dandy, D., y Edwards, D. (2011). *Ortopedia y traumatología* [Essential orthopedics and trauma, 5th edition]. México: Editorial El Manual Moderno.
- De Mauroy, J., Weiss, H., Aulisa, A., Aulisa, L., Brox, J., Durmala, J., ... Zaina, F. (2010). 7th sort consensus paper: conservative treatment of idiopathic & scheuermann's kyphosis. *Scoliosis Journal*, 5(9). Descargado de <https://scoliosisjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1748-7161-5-9>
- Dickson, R. A. (1983). Scoliosis in the community. *British Medical Journal*, 286(2), 615–618.
- Díaz, J., Schröter, C., y Schulz, R. (2009). Actualización de la evaluación radiológica de la escoliosis. *Revista Chilena de Radiología*, 15(3), 141–151.
- Eddine, H., Saleh, S., Hajjar, J., Harati, H., Nasser, Z., Desoutter, A., ... Estephan, E. (2023). Evaluation of the accuracy of new modalities in the assessment and classification of lumbar lordosis: A comparison to cobb's angle measurement. *Heliyon*, 9(8). doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18952>
- Edelstein, J. (1934). Adolescent kyphosis. *British Journal of Surgery*, 22(85), 119-133. doi: <https://doi.org/10.1002/bjs.1800228514>
- Farsetti, P., Tudisco, C., Caterini, R., y Ippolito, E. (1991). Juvenile and idiopathic kyphosis: Long-term follow-up of 20 cases. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 110(3), 165-168. doi: [10.1007/BF00395802](https://doi.org/10.1007/BF00395802)

- Gill, S., Hayes, S., y Parker, C. J. (2016, Noviembre). 3d body scanning: Towards shared protocols for data collection- addressing the needs of the body scanning community for ensuring comparable data collection. En *Proceedings of the 6th international workshop of advanced manufacturing and automation* (p. 281-284). Atlantis Press. Descargado de <https://doi.org/10.2991/iwama-16.2016.53> doi: 10.2991/iwama-16.2016.53
- A glossary of scoliosis terms. (1976). *Spine*, 1(1), 57-58.
- Hart-Davis, A. (2011). *Ciencia* [Science]. México: D.R. Santillana Ediciones Generales S.A. de C.V.
- Hartley, R., y Zisserman, A. (2004). *Multiple view geometry in computer vision*. Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- Health Library. (2019, 3 de enero). *Lordosis*. Descargado de <https://myhealth.ucsd.edu/Spanish/RelatedItems/90,P05880>
- Ibarra, L. (1986). Prevención de enfermedades de la columna vertebral. *Salud Pública de México*, 28(2), 147-153.
- Kebaish, K. M., Neubauer, P. R., Voros, G. D., Khoshnevisan, M. A., y Skolasky, R. L. (2022). Scoliosis in adults aged forty years and older. *Spine*, 36(9), 731-736. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181e9f120
- Kendall, F. P., McCreary, E. K., Provance, P. G., Rodgers, M. M., y Romani, W. A. (2005). *Muscles: Testing and function, with posture and pain*. Estados Unidos de América: Lippincott Williams & Wilkins.
- Kim, H., Tan, J. K., Ishikawa, S., y Shinomiya, T. (2009, Aug.). Automatic detection of spinal deformity based on statistical features from the moire topographic images. *International Journal of Computing*, 8(1), 72-78. Descargado de <https://computingonline.net/computing/article/view/658> doi: 10.47839/ijc.8.1.658
- Lam, G., Hill, D., Le, L., Raso, J., y Lou, E. (2008). Vertebral rotation measurement: a summary and comparison of common radiographic and ct methods. *Scoliosis*, 3(16). doi: 10.1186/1748-7161-3-16
- Lam, J., y Mukhdomi, T. (2023, 8 de agosto). *Kyphosis*. Descargado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558945/>
- Langensiepen, S., Semler, O., Sobottke, R., Fricke, O., Franklin, J., Schönau, E., y Eysel, P. (2013). Measuring procedures to determine the cobb angle in idiopathic scoliosis: a systematic review. *European Spine Journal*, 22, 2360-2371. doi: 10.1007/s00586-013-2693-9
- Latarjet, M., y Ruíz-Liard, A. (2019a). *Anatomía humana: Tomo 1, 5a ed.* Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Latarjet, M., y Ruíz-Liard, A. (2019b). *Anatomía humana: Tomo 2, 5a ed.* Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Lemire, J., Mierau, D., Crawford, C., y Dzus, A. (1996). Scheuermann's juvenile kyphosis. *J. Manipulative Physiol Ther.*, 19(3), 195-201.
- Mai, J., y Paxinos, G. (2011). *The human nervous system*. San Diego: Academic Press.
- Mayhew, P., Campos, A., y Knipe, H. (2024). Kyphosis. reference article. *Radipaedia*. Descargado de <https://radiopaedia.org/articles/kyphosis> doi: 10.53347/rID-44126
- Mayo Clinic. (2022a, 18 de junio). *Cifosis*. Descargado de <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/kyphosis/symptoms-causes/syc-20374205>
- Mayo Clinic. (2022b, 4 de mayo). *Escoliosis*. Descargado de <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/scoliosis/symptoms-causes/syc-20350716>
- Medtronic. (2020, febrero). *About the condition: Scoliosis*. Descargado de <https://www.medtronic.com/us-en/patients/conditions/scoliosis.html>
- Mi Le, J.-R., Kuang-Ting, Y., Chen, C. C., Jaw, F., Shu-Hua, Y., y Wu, W. (2022). Quantitative evaluation of correlation between lumbosacral lordosis and pelvic incidence in standing position among asymptomatic asian adults: a prospective study. *Scientific Reports*, 12. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21840-x>
- Ministerio de Salud Paraguay. (2017, 19 de julio). *Test de adams, una prueba oportuna para detectar la*

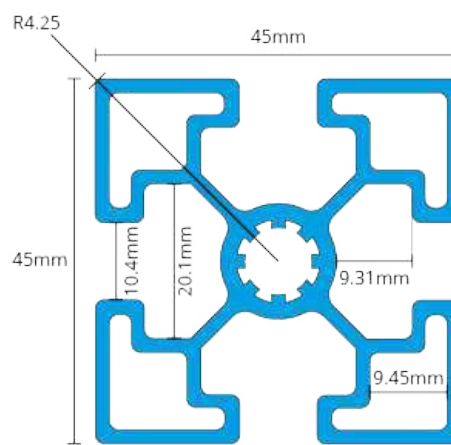
- escoliosis*. Descargado de <https://www.mspbs.gov.py/portal/12623/test-de-adams-una-prueba-oportuna-para-detectar-la-escoliosis.html>
- Moore, K., Dailey, A., y Agur, A. (2013). *Anatomía con orientación clínica* [Clinically oriented anatomy, 7th edition]. China: Wolters Kluwer Health, S.A., Lippincott Williams & Wilkins.
- Papaliadis, D. N., Bonanni, P. G., Roberts, T. T., Hesham, K., Richardson, N., Cheney, R. A., ... Lavelle, W. F. (2017). Computer assisted Cobb angle measurements: A novel algorithm. *International Journal of Spine Surgery*, 11(3), 167–172. doi: 10.14444/4021
- Quiroz, F. (2018). *Anatomía humana 43a ed.* España: Editorial Porrúa.
- Ramírez-Restrepo, L. (2015). Alteraciones orgánicas y funcionales ocasionadas por el uso excesivo de pantallas de visualización de datos. *Archivos de Medicina (Manizales)*, 15(2), 326–342. Descargado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273843539016>
- Russell, B. S., Muhlenkamp, K. A., Hoiriis, K. T., y DeSimone, C. M. (2012). Measurement of lumbar lordosis in static standing posture with and without high-heeled shoes. *Journal of Chiropractic Medicine* 11, 145–153, 11, 145–153. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcm.2012.02.002>
- Saito, S., Simon, T., Saragih, J., y Joo, H. (2020, Junio). Pifuhd: Multi-level pixel-aligned implicit function for high-resolution 3d human digitization. En *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*.
- Scharstein, D., y Szeliski, R. (2003). High-accuracy stereo depth maps using structured light. *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, 195–202. doi: 10.1109/CVPR.2003.1211354
- Schuler, T. C., Subach, B. R., Branch, C. L., Foley, K. T., y Burkus, J. K. (2004). Segmental lumbar lordosis: Manual versus computer-assisted measurement using seven different techniques. *Journal Spinal Disord Tech*, 17(5), 372–379. doi: 10.1097/01.bsd.0000109836.59382.47
- Skaf, G. S., Ayoub, C. M., Domloj, N. T., Turbay, M. J., El-Zein, C., y Hourani, M. H. (2011). Effect of age and lordotic angle on the level of lumbar disc herniation. *Advances in orthopedics*, 2011. doi: 10.4061/2011/950576
- Spinal Deformity Study Group. (2008). *Radiographic measurement manual*. Descargado de <https://www.srs.org/Files/Research/Manuals-and-Publications/sdsg-radiographic-measurement-manual.pdf>
- Srinivasalu, S., Modi, H., Smehta, S., Suh, S.-W., Chen, T., y Murun, T. (2008). Cobb angle measurement of scoliosis using computer measurement of digitally acquired radiographs-intraobserver and interobserver variability. *Asian Spine Journal*, 2(2), 90–93. doi: 10.4184/asj.2008.2.2.90
- Stanford Medicine. (s.f.). *Cifosis*. Descargado de <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=kyphosis-85-P07833>
- The British Institute of Radiology. (s.f.). *History of radiology*. Descargado de <https://www.bir.org.uk/useful-information/history-of-radiology.aspx>
- Total Community Care. (s.f.). *Nerves – what they are and what they do*. Descargado de <https://totalcommunitycare.co.uk/spinal-nerves-what-they-are-and-what-they-do/>
- Winter, R. (1991). The treatment of spinal kyphosis. *International Orthopaedics*, 15(3), 265–271. doi: 10.1007/BF00192305
- Yaman, O., y Dalbayrak, S. (2014). Kyphosis: Diagnosis, classification and treatment methods. *Turkish Neurosurgery*, 24(1), 62–74.
- Zárate-Kalfópulos, B., Martínez-Ríos, H. R., López-Meléndez, F., García-Ramos, C. L., Rosales-Olivarez, L. M., y Reyes-Sánchez, A. A. (2018). Idiopathic scoliosis surgical treatment. results in Mexico's national rehabilitation institute. 24-month follow-up. *Cirugía y Cirujanos*, 86, 343–348. doi: 10.24875/CIRUE.M18000059
- Zúrita, F., Ruiz, L., Zaleta, L., Fernández, M., Fernández, R., y Linares, M. (2014). Análisis de la prevalencia de escoliosis y factores asociados en una población escolar mexicana mediante técnicas de cribado. *Gaceta Médica de México*, 150(5), 432–439. Descargado de <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=52731>

## Apéndice A

# Planos de la plataforma experimental



(a) Vista superior de la estructura del sistema opto mecánico.



(b) Corte transversal de un perfil de aluminio de 45mm, usado para la estructura del sistema.

Figura A.1: Estructura del sistema opto mecánico: vista superior (A.1a) y corte transversal del material empleado (A.1b) (elaboración propia).



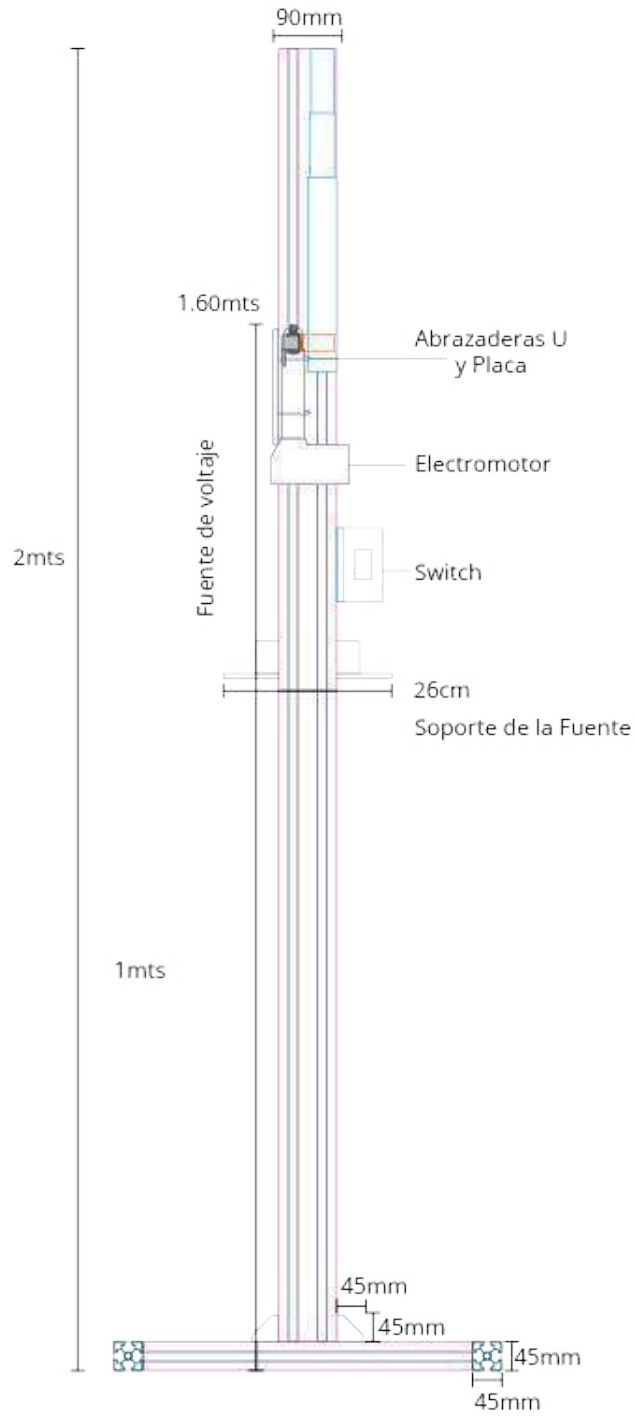


Figura A.2: Vista frontal del sistema optomecánico (elaboración propia).

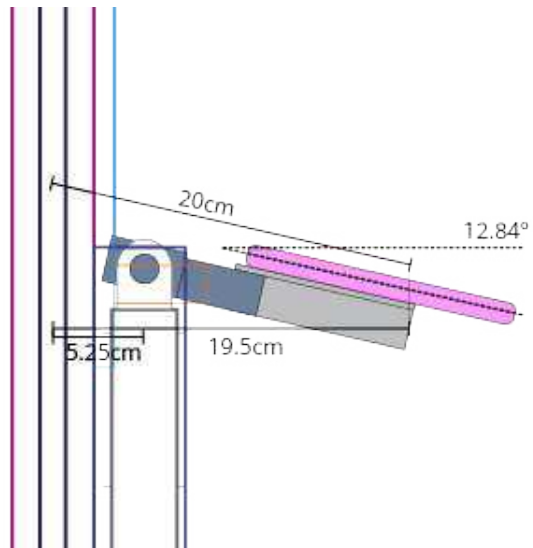


Figura A.3: Vista lateral del soporte del proyector al eje motorizado (elaboración propia).

## **Apéndice B**

# **Diagramas de flujo del software**

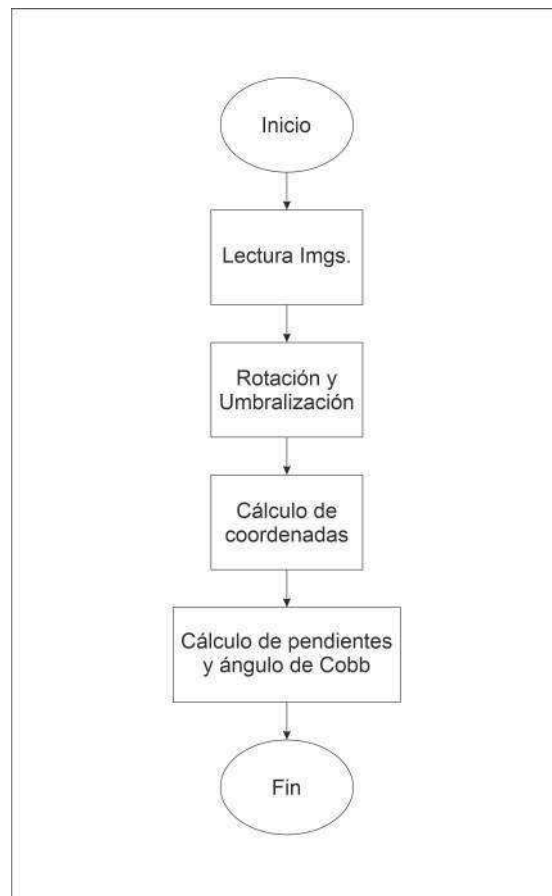


Figura B.1: Estructura general de las secciones del programa (elaboración propia).

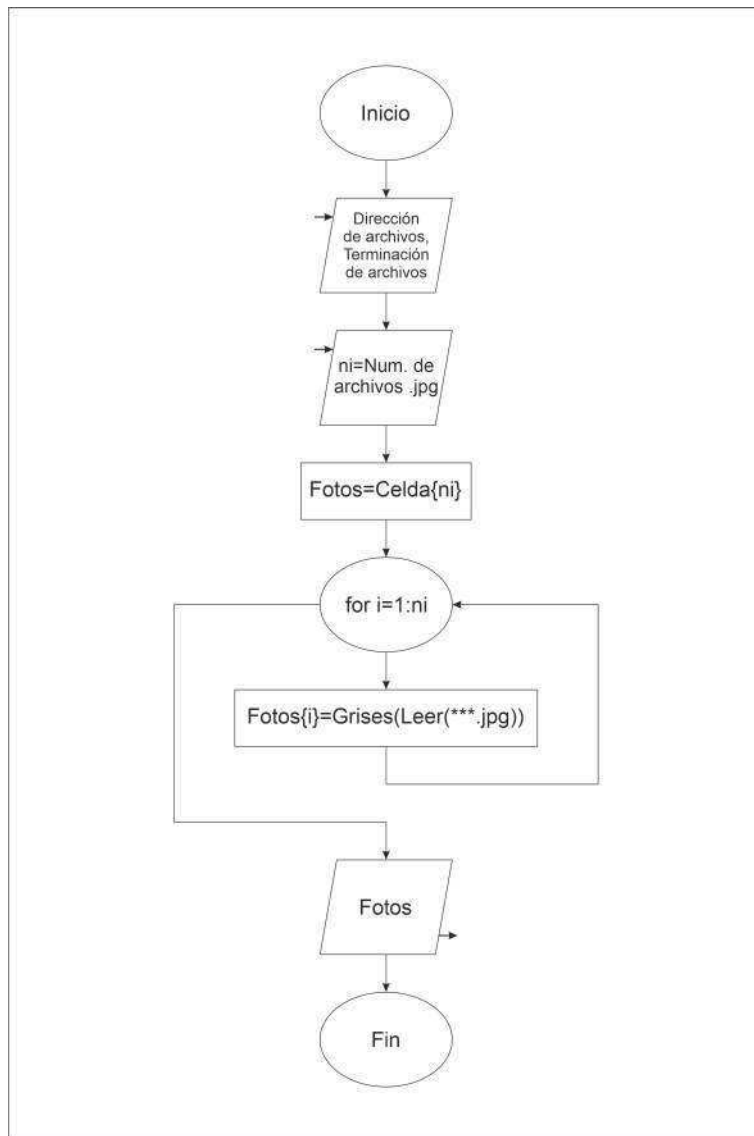


Figura B.2: Estructura del ciclo de lectura de imágenes (elaboración propia).

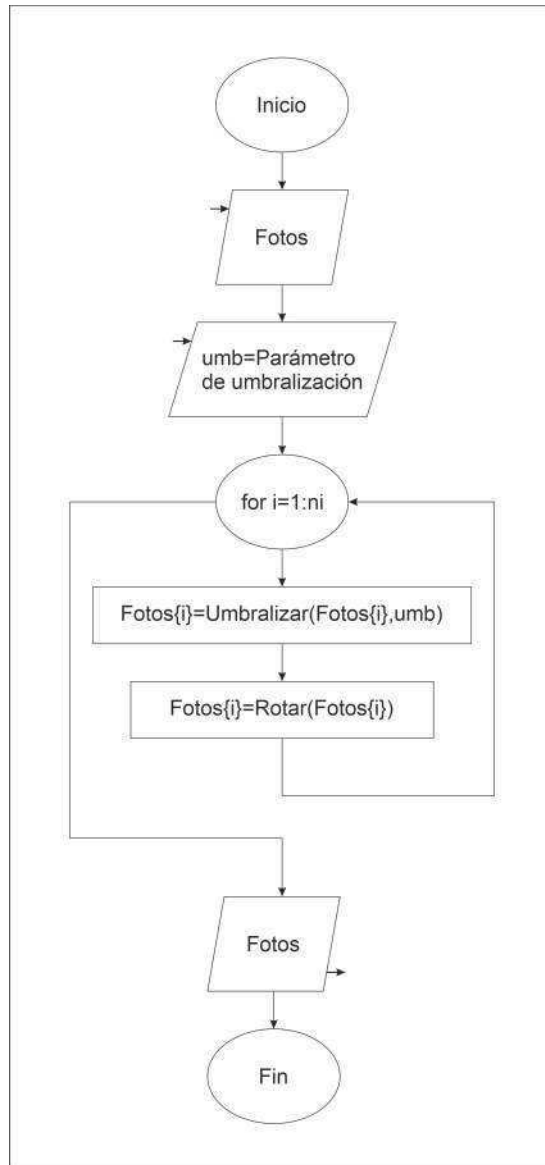


Figura B.3: Estructura del ciclo para rotar, alinear y umbralizar (elaboración propia).

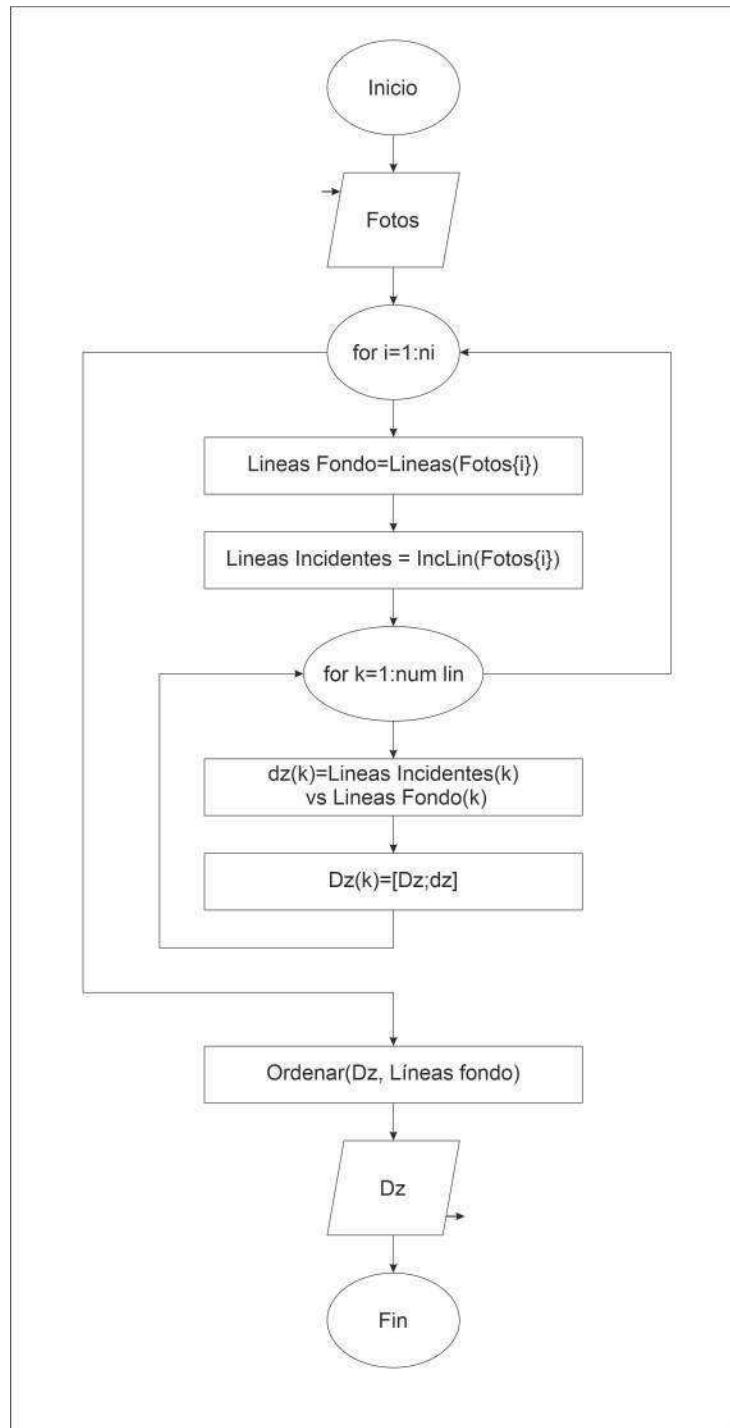


Figura B.4: Estructura general para la identificación de la posición de las rectas incidentes (elaboración propia).

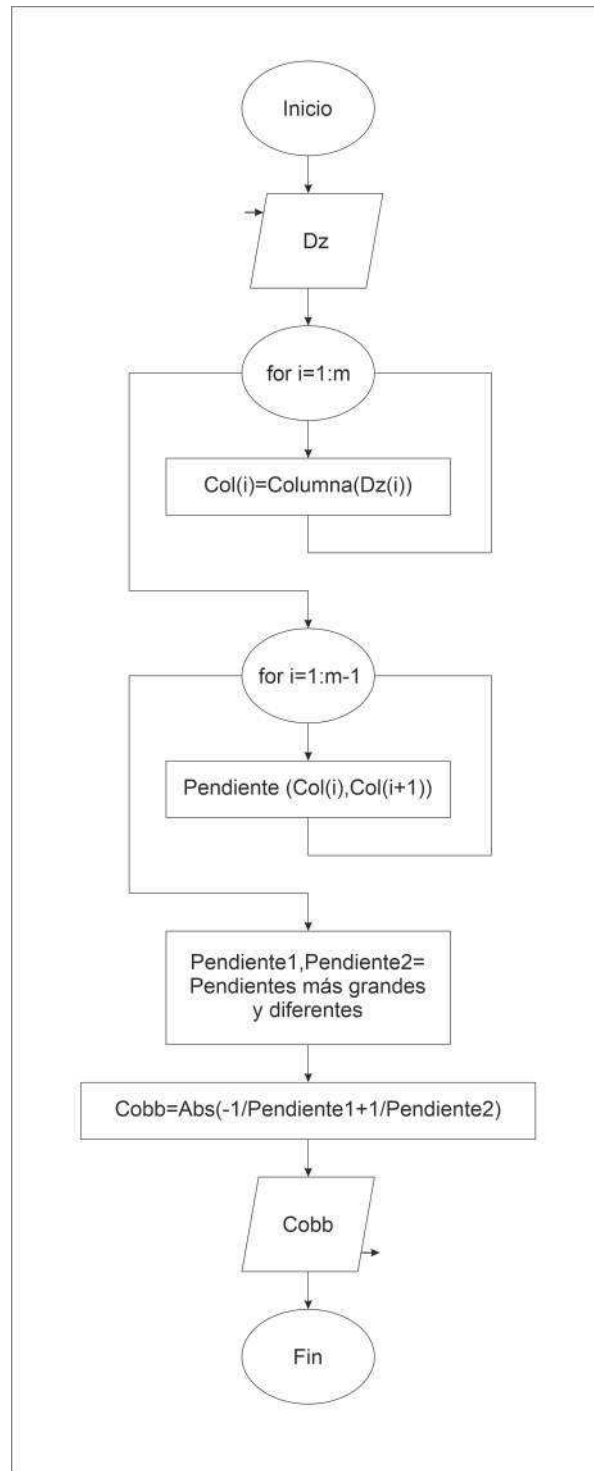


Figura B.5: Estructura general de los ciclos para identificar las máximas de las pendientes y en ángulo de Cobb entre ellas (elaboración propia).



## Apéndice C

### Tabla de resumen de voluntarios

Tabla C.1: Resumen de diagnóstico y herramientas diagnósticas por voluntario (elaboración propia).

Voluntario	Diagnóstico	Herramienta diagnóstica
<b>Sujeto 1:</b> Femenino de 24 años.	Escoliosis idiopática derecha dorsal no compensada. Rotación de cabeza hacia la izquierda. Escápulas aladas. <i>Genum recurvatum</i> bilateral, más pronunciada en la izquierda. Hiperlordosis lumbar. Posible compresión del nervio ciático.	<b>Interrogatorio:</b> Dolor en zona sacrolumbar desde 3 meses previos a valoración. <b>Valoración física y postural:</b> Cabeza rotada hacia la izquierda, apreciable desde vista anterior y posterior. Sínfisis pubiana hacia la derecha. Hombros y abdomen adelantados. anteposición abdominal, compensada por la hiper extensión de rodillas. Escápulas separadas y aladas. Línea interglútea ligeramente hacia la izquierda.
<b>Sujeto 2:</b> Femenino de 21 años.	Escoliosis lumbar izquierda no compensada con rectificación lumbar.	<b>Interrogatorio:</b> Hace ejercicio con regularidad. No reporta dolor en espalda o piernas. <b>Valoración física y postural:</b> Lateralización izquierda de cabeza, rotación derecha del tren inferior, y lateralización y rotación derechas de la sínfisis pubiana. Mayor tonificación en el trapecio izquierdo. Ausencia de lordosis natural en la zona lumbar, pero perfectamente funcional. Presencia de una curvatura vertebral en la zona dorsal. Línea interglútea a la izquierda

Continúa en la página siguiente.

Tabla C.1 – Continuación de la página previa.

Voluntario	Diagnóstico	Herramienta diagnóstica
<b>Sujeto 3:</b> Femenino de 21 años.	Lateralización derecha de cabeza. Hiperlordosis lumbar. Escoliosis dorsal derecha no compensada. Probable contractura del músculo cuadrado lumbar derecho. Acortamiento postural secundario a rotación medial de rodilla derecha.	<b>Interrogatorio:</b> No reporta dolor ni incomodidad con su postura. <b>Valoración física y postural:</b> Lateralización derecha de cabeza. Hombros asimétricos con el derecho en elevación. Curvatura y prominencia abdominal, secundarias a probable hipercifosis.
<b>Sujeto 4:</b> Femenino de 19 años.	Ligera hiperlordosis dorso-lumbar. Lateralización general hacia la izquierda. Ligera rotación de cabeza hacia la derecha. <i>Genum recurvatum</i> en ambas rodillas.	<b>Interrogatorio:</b> Reporta dolor lumbar constante. <b>Valoración física y postural:</b> Ligera rotación derecha de cabeza. Diferencia de linealidad entre esternón y sínfisis pubiana. Depresión de hombro izquierdo. Hiperextensión bilateral de rodillas.
<b>Sujeto 5:</b> Masculino de 26 años.	Rotación izquierda de tren superior, compensada en la cabeza, escápula izquierda alada y derecha abducida, hipercifosis, <i>genum recurvatum</i> en rodilla izquierda, secundarias a acortamiento de 3mm en pierna izquierda. Hiperlordosis por debilidad muscular abdominal.	<b>Interrogatorio:</b> Reporta dolor constante en zona lumbar. <b>Valoración física y postural:</b> Desviación izquierda a dorso lumbar, en aparente escoliosis no compensada. Rotación a la izquierda del tren superior. Escápula alada izquierda, escápula derecha en abducción de 7cm. Cresta ilíaca izquierda más abajo que la derecha. Hiperextensión bilateral de rodillas. Acortamiento de pie izquierdo de 3mm.
<b>Sujeto 6:</b> Masculino de 22 años.	Escoliosis izquierda dorsal no compensada menor a 20°, rotación dorsal hacia la izquierda y asimetría de rodillas secundarias a un acortamiento de 7mm del miembro inferior derecho.	<b>Interrogatorio:</b> Manifiesta dolor esporádico de rodillas. <b>Valoración física y postural:</b> Rotación de esternón y clavículas. Asimetría de rodillas con elevación de rodilla izquierda. Pierna izquierda más alargada por 7mm.
<b>Sujeto 7:</b> Masculino de 22 años.	Rotoescoliosis derecha cervico-dorso-lumbar compensada. Anteposición de cabeza. Proyección posterior de las escápulas. Hipercifosis dorsal secundaria a la rotoescoliosis. Pie plano varo bilateral.	<b>Interrogatorio:</b> Previo diagnóstico de rotoescoliosis. <b>Valoración física y postural:</b> Lateralización derecha y anteriorización de cabeza. Proyección posterior de las escápulas, previmanete abducidas. Elevación del hombro derecho por debilidad del músculo subescapular derecho. Rodillas en varo secundarias a un pie plano.
<b>Sujeto 8:</b> Masculino de 23 años.	Anteposición de cabeza, elevada y orientada hacia arriba. Hiperlordosis cervical compensada con hipercifosis dorsal. Escápula derecha abducida. <i>Genum recurvatum</i> en ambas rodillas. Pie plano con pronación bilateral.	<b>Interrogatorio:</b> No reporta dolor o incomodidades frecuentes con su postura. <b>Valoración física y postural:</b> Amplia base de sustentación 30 – 40cm. Anteposición de cabeza y rectificación de la espalda a nivel lumbar.

## Apéndice D

# Carta de consentimiento informado

La carta de consentimiento informado presentada a los pacientes, describe el protocolo de investigación, las pruebas a realizar, la información que se obtendrá de ellas, así como los beneficios y posibles inconvenientes.

El protocolo de investigación del trabajo de tesis *Análisis antropométrico para la determinación de alteraciones anatómicas en la espalda empleando luz estructurada* y el formato y contenidos de la carta de consentimiento informado, fueron aprobados el día 6 de octubre de 2023 por el Comité de Ética Aplicada a la Investigación de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Querétaro, con el número de registro CEAFI-102-2023-TF.

Se anexa la carta de consentimiento informado presentada a los voluntarios.

## ANEXO 1

### “Carta de Consentimiento informado”



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO



Santiago de Querétaro, Querétaro., a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

### Lineamientos del proyecto.

He sido invitado de manera libre y sin coerción alguna, a participar de forma completamente voluntaria como participante de estudio en el proyecto denominado “**Análisis antropométrico para la determinación de alteraciones anatómicas en la espalda empleando luz estructurada**” registrado ante la Universidad Autónoma de Querétaro bajo la revisión del Comité de Ética, mismo que dio su aprobación en el registro número CEAIFI-102-2023-TF.

La luz estructurada en este proyecto, se refiere a la proyección de patrones de luz visible sobre su espalda, de modo que, al incidir sobre ella, brinden información sobre su relieve y sobre alguna posible afección que pudiera llegar a presentar. La luz estructurada es una técnica no invasiva y no genera alteraciones anatómicas, fisiológicas o biológicas durante su empleo. A continuación, se le describen los detalles del estudio, y se le recuerda que puede preguntar al especialista y al investigador cualquier duda que tenga en cualquier punto del estudio.

Las pruebas realizadas serán:

- a) **Hacer un análisis anatómico de la espalda para obtener información estadística que permita identificar alteraciones anatómicas;**
- b) **Realizar una reconstrucción tridimensional de la espalda empleando luz estructurada;**
- c) **Realizar un análisis comparativo con las técnicas convenciones (exploración y radiografías) para la identificación de alteraciones anatómicas para determinar la certeza del método.**

Estoy informado y acepto que para conseguir esto se me realizarán las siguientes pruebas:

1. Se realizará un análisis anatómico (estudios cinéticos de Wilder: observaciones sobre rotación y traslación de las vértebras) mediante exploración física, efectuado por un especialista, con el fin de determinar la posible presencia o ausencia de asimetrías posturales, concretamente escoliosis, hiperlordosis e hipercifosis.
2. Se explorará la superficie anatómica de la espalda para reconocer puntos anatómicos característicos que se distingan con facilidad y se puedan relacionar con el estado de la columna vertebral.
3. Se tomarán fotografías de la espalda bajo patrones de luz estructurada (que permitirán mantener el anonimato) y se realizará una reconstrucción tridimensional. Dichas imágenes se tratarán con las medidas pertinentes para resguardar mi identidad y privacidad.

4. En caso de ser necesario (en el caso de que se encuentre una alteración importante descrita por el especialista), se me solicitará de manera voluntaria una radiografía para corroborar.
5. Se comparará la información obtenida del análisis anatómico, la reconstrucción tridimensional y la radiografía (si así es el caso) para determinar la certeza clínica.

Declaro que he sido informado sobre los posibles riesgos, inconvenientes, molestias y beneficios derivados de mi participación en el estudio los cuales son:

Posibles beneficios:

- **Obtendrá información certera de parte de un especialista, mismo que le dará una consulta gratuita, y una opinión sobre las observaciones que haya encontrado.**

Posibles inconvenientes:

- **En caso de tener sensibilidad o alguna una lesión en alguna parte del área anatómica explorada, podría presentar ligera molestia física al participar en los estudios. En dicho caso, deberá notificar previamente al especialista, quien determinará si usted puede proceder con el estudio.**
- **Ligera molestia física en caso de tener poca flexibilidad o no realizar actividad física con frecuencia. En dicho caso, deberá notificar inmediatamente al especialista.**
- **Posible incomodidad al tener la espalda descubierta en la valoración física o en la toma de imágenes. En dicho caso, deberá notificar inmediatamente al especialista.**

Soy consciente de que no habrá beneficios materiales para mi persona y que no se me recompensará económicamente. Se me ha proporcionado el nombre y teléfono del investigador responsable que puede ser fácilmente contactado dentro de la institución universitaria para cualquier duda o inquietud, quienes se han comprometido a darme la información oportuna sobre cualquier duda, pregunta o aclaración.

Consiento participar en esta investigación como voluntario y entiendo que tengo el derecho de retirarme de la investigación en cualquier momento sin que me afecte en ninguna manera ya que mi participación es de manera voluntaria.

---

**Participante**

---

**Dr. Igor Salinas Sánchez**  
Terapeuta Físico y Rehabilitador  
Cédula profesional: 48066945  
Cédula de colegio: 00328

---

**Esteban Cervantes Zárate**  
Investigador en el proyecto

*COMO PARTICIPANTE HE LEÍDO CON EXACTITUD O HE SIDO TESTIGO DE LA LECTURA FIEL DEL DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO Y HE TENIDO LA OPORTUNIDAD DE HACER PREGUNTAS. CONFIRMO QUE HE DADO MI CONSENTIMIENTO LIBREMENTE Y EN CASO DE NECESITAR MAS INFORMACIÓN ENTIENDO QUE PUEDO COMUNICARME CON EL INVESTIGADOR RESPONSABLE EN CUALQUIER MOMENTO.*