



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

“Análisis Biomecánico del  
Escardado de Hortalizas”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA

Martínez Arango Diego Arturo

TUTOR:

Dr. Lázaro Morales Acosta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo a mis padres y aprovecho para agradecerle a mi madre por su gran apoyo incondicional que siempre me ha brindado, ella ha sido para mí signo de fortaleza; agradezco a mi padre, que es una persona que admiro por todos aquellos consejos que me han llevado a un desarrollo profesional y humano. Ambos me han otorgado lo mejor de sí para que pueda alcanzar el éxito y la felicidad que una buena vida puede brindar.

Deseo agradecer a mi hermano Carlos Ismael y a Ana Mendoza por los ánimos ofrecidos y por aquellos momentos de distracción que siempre son necesarios para mantener el buen temple.

Agradezco al Dr. Lázaro Morales por su instrucción y su confianza, me ha dado las herramientas y la libertad para aprender y desarrollarme tanto en el área de estudio como persona.

También deseo darle su mérito a la ya licenciada en antropología Aurora González por su colaboración en este proyecto, sin su ayuda no hubiese sido posible desarrollarlo adecuadamente.

Finalmente se agradece a Wolfram por el apoyo de su licencia de software con el cual se desarrolló parte de este proyecto.

# Contenido

---

<b>Objetivo</b> .....	1
<b>Metas</b> .....	1
<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	2
- 1.1 Planteamiento del problema.....	3
- 1.2 Agricultura .....	3
- 1.3 Clasificación del trabajador agrícola .....	5
- 1.4 Estadísticas Internacionales de accidentes y enfermedades .....	7
- 1.5 Estadísticas Nacionales de accidentes y enfermedades.....	8
1.5.1 México: .....	8
1.5.2 Puebla:.....	10
- 1.6 Justificación de este trabajo .....	11
<b>Capítulo II. Trastornos Músculo Esqueléticos</b> .....	12
- 2.1 Introducción a la anatomía macroscópica regional .....	13
2.1.1 Términos:.....	14
- 2.2 Sistema Óseo .....	18
2.2.1 Huesos:.....	19
2.2.2 Articulaciones:.....	23
- 2.3 Sistema Muscular.....	24
- 2.4 Trastornos Músculo Esqueléticos (TME) .....	27
2.4.1 Patologías más frecuentes: .....	28
2.4.2 Factores que contribuyen en el desarrollo de TME: .....	30
2.4.3 Prevención: .....	32
<b>Capítulo III. Sistemas de Captura de Movimiento</b> .....	35
- 3.1 Introducción .....	36
- 3.2 Tipos de Sistemas de captura de movimiento.....	39
3.2.1 Mecánico:.....	40
3.2.2 Magnético:.....	41
3.2.3 Acústico: .....	43
3.2.4 Inercial: .....	44
3.2.5 Óptico:.....	45

3.2.6 Otros tipos de sistemas de captura de movimiento:.....	49
- 3.3 Proceso de captura.....	50
<b>Capítulo IV. Metodología</b> .....	<b>52</b>
- 4.1 Introducción .....	53
- 4.3 Modelo en IDEF0.....	56
4.3.1 Diagrama A-0:.....	57
4.3.2 Diagrama A0:.....	58
4.3.3 Diagrama A4:.....	61
4.3.4 Programa de procesamiento:.....	66
4. 4 Antropometría: .....	71
<b>Capítulo V. Resultados</b> .....	<b>73</b>
- 5.1 Primera experimentación:.....	74
- 5.2 Segunda experimentación:.....	77
5.2.1 Antropometría:.....	77
5.2.2 Acelerometría y fotogrametría:.....	78
5.2.3 Entrevistas:.....	86
5.2.4 Relación entre antropometría, aceleración y anomalías físicas.: .....	89
<b>Capítulo VI. Conclusiones</b> .....	<b>92</b>
- 6.1 Conclusiones sobre primera experimentación: .....	93
- 6.2 Conclusiones sobre segunda experimentación: .....	94
- 6.3 Conclusiones finales:.....	95
<b>Apéndice A</b> .....	<b>96</b>
<b>Apéndice B</b> .....	<b>99</b>
<b>Apéndice C</b> .....	<b>117</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>120</b>

## Objetivo

---

Estudiar el movimiento del escardado de forma cinemática mediante acelerometría y fotogrametría secuencial.

## Metas

---

Desarrollar un modelo por medio de IDEF0 para el análisis biomecánico del escardado mediante acelerometría y fotogrametría secuencial.

Describir la técnica del escardado con azadón y/u hoz que realizan los campesinos dedicados a la siembra de hortaliza en la localidad de *Los Reyes de Jurez*, Puebla.

Describir el comportamiento de la aceleración en el movimiento de estudio sobre las zonas del tronco, cuello y cabeza.

Relacionar los resultados cuantitativos con las lesiones y datos antropométricos que presentan los trabajadores de dicha actividad.

**Palabras clave:** Escardado, metodología IDEF0, acelerometría, fotogrametría secuencial, aceleración, técnica.

# Capítulo I. Introducción

---



*“Sin importar que tan urbana sea nuestra vida, nuestros cuerpos viven de la agricultura; nosotros venimos de la Tierra y retornaremos a ella, y es así que existimos en la agricultura tanto como en nuestra propia carne” – Wendell Berry*

## - 1.1 Planteamiento del problema

El cuerpo humano está constantemente sometido a diversas cargas físicas (esfuerzos provocados por posiciones articulares, movimientos con carga, vibraciones, etc.), las cuales al superar el límite de la tolerancia de un individuo, generan fatiga muscular; es decir, una disminución de la capacidad física. Si la persona no se recupera, puede entrar en un estado de fatiga crónica o patológica, tal estado conlleva a alteraciones graves en la salud tales como los TME (trastornos músculo esqueléticos) [1].

Y entre los campos laborales con mayor carga física se encuentra la agricultura [2]. Donde una de sus tareas fundamentales es el escardado, esta actividad es definida como la acción de arrancar y sacar las hierbas nocivas de los sembrados [3, 4]; esta acción se requiere para que las plantas se desarrollen adecuadamente, permitiendo mantener limpio el cultivo e impidiendo que el sembrado sea invadido por hierbas. El escardado se caracteriza por posturas de trabajo constantes en largos periodos de tiempo y sometimiento a cargas elevadas de esfuerzo muscular, (principalmente en las rodillas y espalda).

La técnica del escardado no ha sido estudiada de manera cinemática, por lo que se desconoce el comportamiento de la aceleración en las articulaciones del cuerpo humano mientras se ejecuta el movimiento; la aceleración está íntimamente involucrada con la fuerza y puede ser relacionada con la fatiga que siente el agricultor.

Siendo así la evaluación de la fatiga muscular en el escardado respaldada por el análisis biomecánico, se puede llevar a la optimización del movimiento o el diseño de nuevas herramientas que disminuyan la fatiga física en los trabajadores.

## - 1.2 Agricultura

La agricultura se define como el conjunto de actividades económicas sobre el medio natural que tienen como objetivo la producción de plantas con que satisfacer las necesidades de alimento, vestido, etc. [5], estas labores pueden incluir una o varias de los siguientes trabajos [6]:

- Arado de la tierra, cultivo y cosecha.
- Cría de ganado.
- Cría de otros animales (avicultura, piscicultura, apicultura).
- Manufactura de productos derivados de animales.
- Producción de semillas y plantas de vivero.
- Trabajo forestal y mantenimiento de los bosques.
- Procesamiento primario de los productos agrícolas.



La agricultura nace desde la última etapa de la edad de piedra, donde el cambio tecnológico “disparador” fue el aprendizaje de las siembras en los grupos humanos que venían de ser predominantemente recolectores. Se afirma que la idea de sembrar surgió cuando las tribus recolectoras en sus recorridos de ciclo estacional percibieron que las plantas cuyos frutos comían coincidían con los lugares donde habían acampado años anteriores, consumiendo los frutos y abandonando las semillas en el lugar. De la imitación del proceso natural, conservando las semillas y plantándolas de modos cada vez más ordenados, surgieron los cultivos. Las siembras implicaron pasar del nomadismo de recolección, al progresivo sedentarismo de la siembra y protección de los cultivos en aldeas estables. Actualmente, se considera la agricultura moderna a la mecanización de las actividades agropecuarias mediante energía e insumos tecnológicos, tales como combustibles, maquinarias, semillas y agroquímicos; que también dependen de información técnica surgida de organismos de investigación y transmitida por profesionales especializados [7].

La Organización Internacional del Trabajo estimó sobre los países que la conforman (117 países) en el año 2000 un número de trabajadores activos en la producción agrícola de 1,300 millones, lo cual corresponde al 47 % de la mano de obra en todas estas naciones. La fuerza de trabajo dedicada a la agricultura representa menos del 10% de la población económicamente activa en los países industrializados, y alcanza al 59 % en las regiones menos desarrolladas [6].

A continuación se presenta de manera gráfica en la Figura 1.1 la distribución de la población económicamente activa agrícola, y no agrícola, en los países industrializados así como en los países en desarrollo, y en la Figura 1.2 se presenta la distribución mundial de los trabajadores agrícolas.

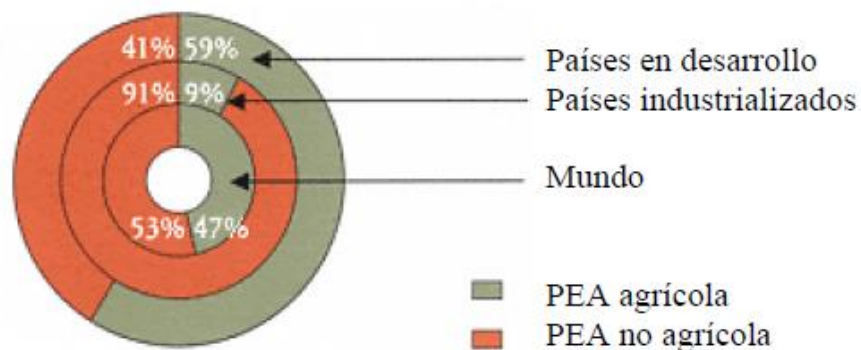


Figura 1. 1 Distribución económicamente activa agrícola en países en desarrollo e industrializados (que conforman la OIT) [6].

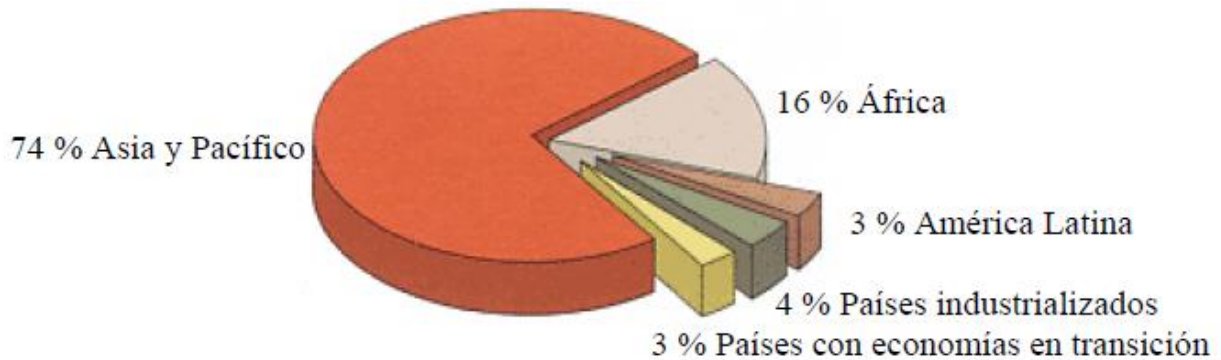


Figura 1. 2 Distribución mundial de trabajadores agrícolas (Que conforman la OIT) [6].

Mientras que en México la agricultura es un sector relativamente pequeño (aproximadamente 4% del PIB), proporciona empleo alrededor del 13% de la fuerza de trabajo, lo que representa unos 3.3 millones de agricultores y 4.6 millones de trabajadores asalariados y familiares no remunerados [8].

De aquí radica la importancia del cuidado de la salud en el agricultor.

### - 1.3 Clasificación del trabajador agrícola

Para desempeñar el análisis se necesita clasificar al trabajador agrícola debido que la técnica que utiliza varía no solo por región geográfica, si no por diversos factores tales como automatización, herramientas, etc.

La facilidad con la que desempeña el agricultor sus labores dependerá de muchos factores, tales como la zona geográfica, el nivel económico, educación, edad, sexo, etc. Más la descripción y la interpretación de los diferentes tipos de agricultores requiere tener en cuenta su entorno o contexto. Por esta razón se presentan algunas clasificaciones del trabajador agrícola a manera de conocer la población de estudio del trabajo presente, cabe destacar que un agricultor puede pertenecer a más de una categoría.

La primera clasificación que se presenta parte en dos principales grupos, los asalariados y los no remunerados [9].

Los trabajadores agrícolas asalariados son aquellos que no poseen la tierra que trabajan, los equipos y en algunas ocasiones las herramientas que utilizan. Lo que al contrario es el grupo de los agricultores no remunerados, que si poseen la tierra, equipo y herramientas [9].

Posteriormente se desprenden las clasificaciones mencionadas en la tabla a continuación (Tabla 1.1).

Tabla 1. 1 Clasificación y sub clasificaciones del trabajador agrícola no remunerado y asalariado [6].	
No remunerados	Asalariados
Pequeños propietarios	Trabajadores temporales y estacionales
Dedicados a la producción de subsistencia	Trabajadores migrantes
Trabajadores familiares	Trabajadores subcontratados
Miembros de cooperativas	Trabajadores sin Tierra
Arrendatarios	

La diferencia de la capacidad productiva entre uno y otro tipo de trabajador según la clasificación mencionada puede variar dependiendo del nivel de producción del lugar [7]. De esta manera la primera clasificación sirve como entrada para conocer los tipos de agricultores según la remuneración que pueden presentar.

Así se da lugar a una nueva clasificación según su nivel tecnológico productivo. (Tabla 1.2).

Tabla 1. 2 La siguiente tabla evalúa la clasificación según el nivel de producción, calidad de producto y la seguridad del trabajador en alto, medio y bajo según corresponda [10].			
Clasificación	Nivel de producción	Calidad de producto	Seguridad del Trabajador
Tipo I	Alto	Bajo	Alto
Tipo II	Bajo	Alto	Bajo
Tipo III	Medio	Medio	Medio

Siendo el trabajador de Tipo II el que destaca por la baja capacidad productiva, mientras que el Tipo I utiliza procesos de producción altamente automatizados y posee una productividad elevada[10].

El trabajador Tipo II posee capacidad productiva baja debido a la falta de herramientas para el desarrollo de su trabajo y la poca o nula automatización, este tipo fue el que se definió como población de estudio por que son los trabajadores con mayor exposición a enfermedades y accidentes laborales.

- 1.4 Estadísticas Internacionales de accidentes y enfermedades

Para visualizar mejor el problema, se presenta a continuación datos sobre accidentes y enfermedades del sector agrícola como de todo el campo laboral en general, a nivel mundial y nacional; más cabe destacar que la fatiga crónica antes mencionada es la principal causa de los trastornos músculo esqueléticos (procesos que afectan principalmente a las partes blandas del aparato locomotor: músculos, tendones, nervios y otras estructuras próximas a las articulaciones [11],[12]).

La agricultura supone escenarios de trabajo múltiples que se caracterizan por [13]:

- La exposición de los trabajadores a las condiciones climáticas, dado que la mayoría de las tareas se realizan al aire libre.
- Trabajo de carácter estacional y urgencia de la ejecución en ciertas labores por períodos definidos.
- La diversidad de las tareas realizadas por una misma persona.
- Las posturas de trabajo y la duración de las actividades que se realizan.
- El contacto con animales y plantas, que exponen a los trabajadores a mordeduras, envenenamientos, infecciones, enfermedades parasitarias, alergias, intoxicaciones y otros problemas de salud.
- La utilización de productos químicos y biológicos.
- Las distancias considerables entre los lugares en que viven los trabajadores y los lugares de trabajo.

Por estos rasgos de labor agrícola la tasa de accidentes mortales en varios países es el doble del promedio de todas las demás industrias. Según estimaciones de la OIT, de un total de 335,000 accidentes laborales mortales anuales, unos 170,000 ocurren en el sector agrícola [6].

El cuadro siguiente (Tabla 1.3) muestra la tasa de incidencia registradas a nivel internacional para algunas de las principales enfermedades en la agricultura de 1976 a 1996:

Tabla 1. 3 Enfermedades del trabajo principales capturadas en algunos países (aproximadamente un tercio) que componen la OIT [14].		
Enfermedades profesionales	Núm. De casos	Tasa de incidencia por 100,000 trabajadores
<i>Trastorno articular</i>	837	81.3
Eczema alérgico	59	5.7
Alergias Respiratorias	61	5.9
<i>Lesiones debidas a vibración y al choque</i>	22	2.1
Leptospirosis	15	2.1
Brucelosis	22	2.1
Lesiones debidas al ruido	22	2.1
Intoxicación por plaguicidas	22	5.6
Otras enfermedades profesionales	58	-
<b>TOTAL DE ENFERMEDADES PROF.</b>	<b>1158</b>	

Se resalta los trastornos articulares y las lesiones debidas a vibración y al choque ya que afectan al sistema músculo esquelético, y estos a su vez pueden ser originados por una carga física debida a la aceleración de la articulación en algún movimiento de las tareas agrícolas.

Los trastornos articulares son la principal enfermedad que padecen en la agricultura, teniendo un 81.3% de probabilidad de padecer la anomalía según la Tabla 1.3.

Para el 2015 los trastornos músculo esqueléticos, representan el 95% de las enfermedades profesionales de los empleados según datos de la Asociación de Accidentes de la Vida, Francia [15].

## - 1.5 Estadísticas Nacionales de accidentes y enfermedades

### 1.5.1 México:

En México, el trabajador no está exento de lesiones, siendo los traumatismos superficiales como accidente y las hipoacusias como enfermedad (pérdida de audición) las principales dolencias del trabajador (Tabla 1.4, Tabla 1.5). Cabe destacar que el número de accidentes y enfermedades en el trabajo ha ido incrementando cada año,

pasando de 289,887 en el 2004 a 422,024 en el 2013, casi duplicándose en diez años [16].

Tabla 1. 4 Tabla a nivel nacional sobre las principales enfermedades laborales del 2011 al 2013 (casos registrados IMSS) [16].

Naturaleza de lesión	2011		2012		2013	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Hipoacusias	1341	47	1312	49	1431	58
Neumoconiosis	774	18	740	28	877	37
Dorsopatías	110	14	168	31	370	54
Entesopatías	86	191	128	375	96	273
<i>Síndrome de túnel carpiano</i>	<i>24</i>	<i>135</i>	<i>29</i>	<i>204</i>	<i>58</i>	<i>278</i>
Infecciones y parásitos	--	--	--	--	169	114
<i>Lesiones de Hombro</i>	<i>--</i>	<i>--</i>	<i>--</i>	<i>--</i>	<i>102</i>	<i>179</i>
Teno sinovitis de Estiloides radial	--	--	--	--	40	216
Sinovitis, Teno sinovitis y bursitis	62	219	69	361	62	165
Afecciones respiratorias por gases inhalados	211	28	169	26	174	27
Otros	576	269	547	362	953	631

Tabla 1. 5 Tabla a nivel nacional sobre las principales lesiones por accidente laboral del 2011 al 2013 (casos registrados IMSS) [16].

Tipo de Lesión	2011		2012		2013	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Traumatismos superficiales	71,643	35,282	82,524	40,972	77,377	39,893
<i>Luxaciones, esguinces y desgarros</i>	<i>63,004</i>	<i>35,096</i>	<i>64,642</i>	<i>37,224</i>	<i>61,222</i>	<i>36,002</i>
Heridas	63,083	16,174	65,173	16,554	60,597	15,687
Fracturas	30,647	5,896	31,914	6,315	31,587	6,285
<i>Traumatismos</i>	<i>12,208</i>	<i>3,580</i>	<i>11,813</i>	<i>3,499</i>	<i>11,747</i>	<i>3,409</i>
Quemaduras y corrosiones	7,094	2,731	7,155	2,853	6,755	2,826
Cuerpo extraño	4,353	487	3,985	441	3,360	390
Amputaciones	2,993	478	3,073	475	3,243	472
Intoxicaciones	756	330	744	309	643	333
Varios de frecuencia menor	44,239	17,469	37,846	14,584	38,178	15,654

Se destacan en la Tabla 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7 las anomalías físicas involucradas en los TME que pueden ser ocasionados por la aceleración.

### 1.5.2 Puebla:

La población que se estudia reside en Puebla, (más adelante se profundizará en la descripción de la población), por lo que se presenta los siguientes datos característicos del estado en la Tabla 1.6 y Tabla 1.7.

Con un incremento en accidentes y enfermedades de 7,446 en el 2004 a 12,650 en el 2013. Y 425 accidentes y enfermedades registrados para el 2013, en el área del abdomen, lumbosacra, columna y pelvis [17].

Tabla 1. 6 Tabla a nivel estatal de Puebla sobre las principales enfermedades laborales del 2011 al 2013 (casos registrados IMSS) [17].

Naturaleza de lesión	2011		2012		2013	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
<i>Síndrome de túnel carpiano</i>	2	4	3	3	2	8
Teno sinovitis de Estiloides radial	0	0	0	0	1	8
Hipoacusias	0	0	7	0	6	0
Sinovitis, Teno sinovitis y bursitis	0	7	2	14	2	2
Dorsopatías	0	0	0	0	2	0
Entesopatías	1	2	1	2	0	2
Infecciones y parásitos	0	0	0	0	1	0
<i>Lesiones de Hombro</i>	0	0	0	0	1	0
Afecciones respiratorias por gases inhalados	0	1	0	0	0	0
Otros	9	10	5	6	12	12

Tabla 1. 7 Tabla a nivel estatal de Puebla sobre las principales lesiones por accidente laboral del 2011 al 2013 (casos registrados IMSS)[17].

Tipo de Lesión	2011		2012		2013	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Traumatismos superficiales	2,329	1,106	2,895	1,331	2,723	1,218
<i>Luxaciones, esguinces y desgarros</i>	<i>2,093</i>	<i>1,095</i>	<i>2,131</i>	<i>1,181</i>	<i>1,944</i>	<i>1,071</i>
Heridas	1,901	567	1,851	553	1,740	519
Fracturas	786	153	839	178	814	176
<i>Traumatismos</i>	<i>563</i>	<i>223</i>	<i>586</i>	<i>235</i>	<i>499</i>	<i>182</i>
Quemaduras y corrosiones	188	70	191	86	189	56
Cuerpo extraño	240	42	231	35	182	22
Amputaciones	86	13	74	8	85	14
Intoxicaciones	34	11	25	8	23	11
Varios de frecuencia menor	919	410	557	212	764	359

#### - 1.6 Justificación de este trabajo

La agricultura es considerada como una de las actividades económicas, sociales y ambientales más necesarias para el ser humano; nos provee de bienes naturales en forma de alimento o de materias primas para la industria textil. De allí la importancia del agricultor, que debido a las condiciones de trabajo a las que está sometido, es propenso a diversas enfermedades y accidentes.

Las enfermedades y los accidentes laborales son el principal factor que influye en el absentismo laboral, lo cual tiene implicaciones en la productividad de una empresa, provoca problemas organizativos, genera altos costos y la calidad de vida del trabajador se ve disminuida.

Por ello, mediante los estudios que se realizarán se pretende encontrar si el movimiento del trabajador al efectuar el escardado tiene algún efecto dañino en su salud, si existe un patrón común transmitido entre los trabajadores que podemos definir como técnica, y si la actividad puede ser susceptible de evaluación cuantitativa para generar información con la cual definir numéricamente lo anterior mencionado, la técnica (si la hay) y los efectos sobre la salud.

Estos valores cuantitativos pueden ayudar a la evaluación de una correcta técnica del escardado con aro y/u hoz y al diseño de nuevas herramientas que faciliten la labor.



## Capítulo II. Trastornos Músculo Esqueléticos

---



*“Si alguien busca la salud, pregúntale si está dispuesto a evitar en el futuro las causas de la enfermedad; en caso contrario, abstente de ayudarlo” -- Sócrates*

- 2.1 Introducción a la anatomía macroscópica regional

Como se redactó en el primer capítulo, los TME (trastornos musculo esqueléticos) son una de las enfermedades y accidentes que más sufren los trabajadores agrícolas y parten de la fatiga muscular crónica; para poder entenderlo mejor se dedica el segundo capítulo a describir estas anomalías físicas por medio de la anatomía macroscópica regional la cual se define como:

Anatomía macroscópica: Estudio de las partes del cuerpo que pueden observarse sin la ayuda de un microscopio [18, 19],

Anatomía regional: Corresponde a la topografía que considera la organización del cuerpo humano en función de sus partes o segmentos principales [18], Figura 2.1.

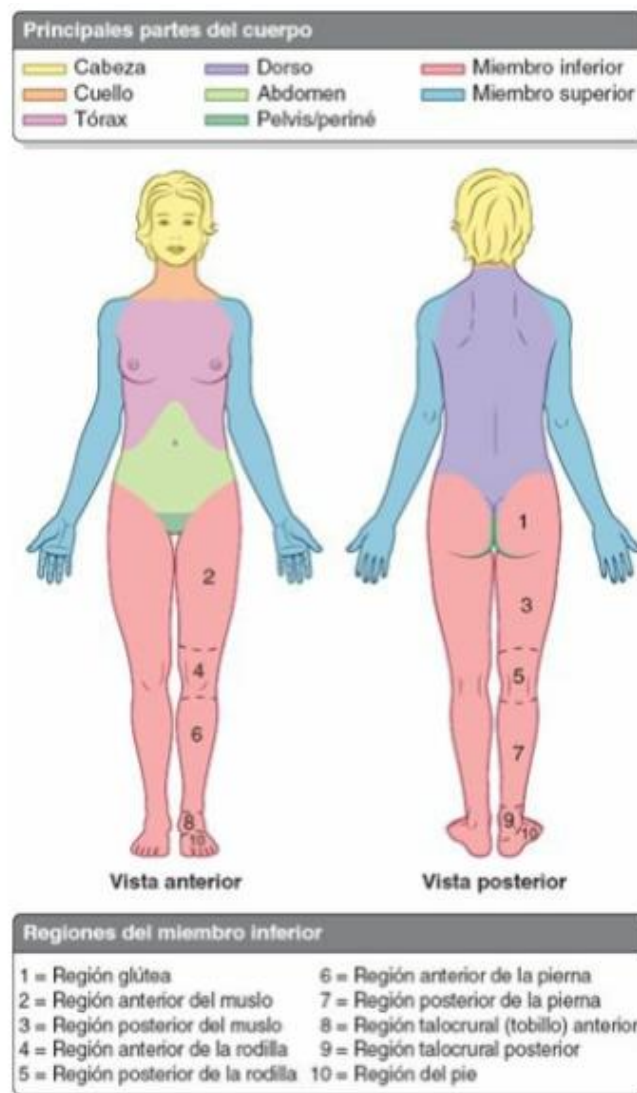


Figura 2. 1 Segmentos principales de la anatomía regional [18].

El enfoque será principalmente en el dorso y cabeza ya que son los puntos de análisis experimental.

### 2.1.1 Términos:

A manera de comprender mejor la descripción anatómica es necesario presentar cierta terminología médica, la cual se presenta a continuación.

Posición anatómica: Las descripciones anatómicas se expresan en relación con una posición constante para garantizar que no haya ambigüedad. La posición (Figura 2.2) se refiere a la posición del cuerpo con el individuo de pie mediante:

- La cabeza, la mirada (ojos) y los dedos de los pies dirigidos hacia adelante.
- Los brazos adosados a los lados del cuerpo con las palmas hacia adelante.
- Los miembros inferiores juntos, con los pies paralelos.

Esta posición se adopta globalmente en las descripciones anatómicas y médicas [18]. Al utilizar esta perspectiva y la terminología médica apropiada, se puede relacionar con exactitud alguna parte del cuerpo con cualquier otra.



Figura 2. 2 Posición anatómica [19].

Planos anatómicos:

Las descripciones anatómicas se basan en cuatro planos imaginarios (medio, sagital, frontal y transversal) que cruzan el organismo en la posición anatómica, tal como se muestra en la Figura 2.3 [18-20].

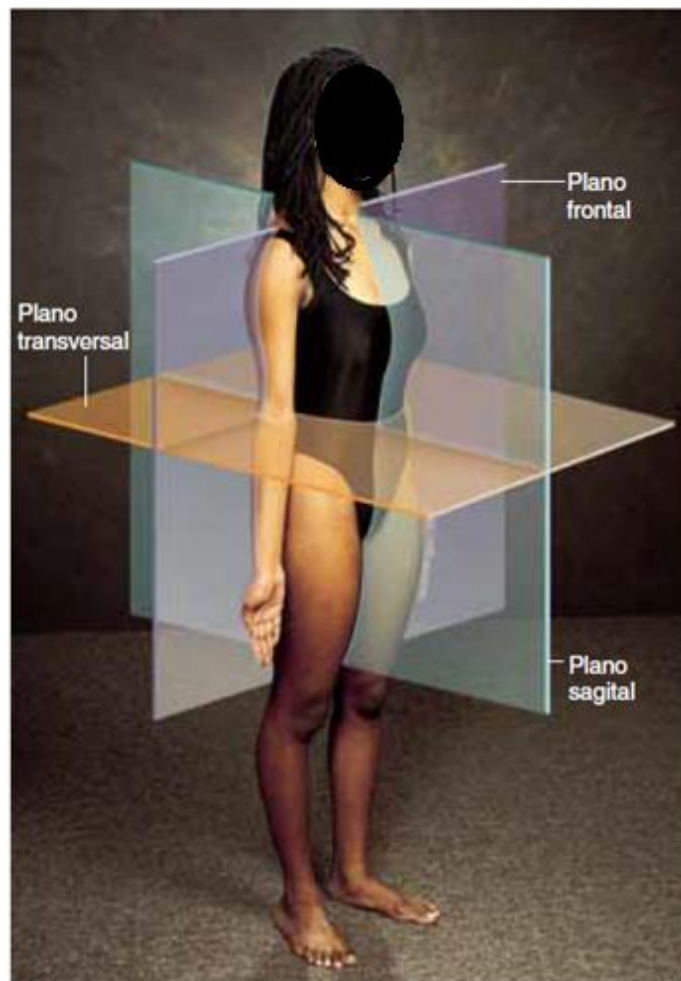


Figura 2. 3 Planos anatómicos principales [19].

Direcciones anatómicas:

Descripción de la posición de una estructura respecto a otra del cuerpo (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1 Direcciones anatómicas humanas [19].	
Término	Significado
Ventral	hacia el frente o vientre
Dorsal	hacia atrás o columna
anterior	hacia el dorso
posterior	alejado del suelo o dorso
cefálico	hacia cabeza o la parte superior
rostral	hacia la frente o nariz
caudal	hacia la parte inferior
superior	Arriba
inferior	Abajo
medial	hacia el plano medio
lateral	lejos del plano medio
proximal	más cerca del punto de unión u origen
Distal	más lejos del punto de unión u origen
ipsilateral	en el mismo lado del cuerpo
contralateral	en lados opuestos del cuerpo
superficial	más cerca de la superficie del cuerpo
profundo	mas lejos de la superficie del cuerpo

Movimientos del cuerpo humano:

La mayoría de los movimientos se definen con respecto a la posición anatómica; ocurren dentro de y en torno a los ejes alineados con planos anatómicos específicos. Aunque la mayoría de estos se producen en lugares donde dos o más huesos se unen con cartílagos entre sí, diversas estructuras no esqueléticas presentan movimientos (por ej., la lengua, los labios, los párpados) [18].

Estos movimientos son [20]:

- Flexión: Reducción del ángulo articular formado por dos partes del cuerpo.
- Extensión: Aumento del ángulo articular entre dos partes del cuerpo.

- Hiperextensión: Extensión de un segmento de miembro, mayor a los límites normales.
- Abducción: Alargamiento de alguna parte del cuerpo respecto a su eje.
- Aducción: Acercamiento de alguna parte del cuerpo respecto a su eje.
- Circunducción: Es la mezcla de los movimientos de flexión/extensión, abducción/aducción y rotación excéntrica, que realizamos en el segmento libre de una articulación para provocar un movimiento circular.
- Rotación Medial: Giro hacia el eje medio del cuerpo.
- Rotación lateral: Giro en dirección contraria al eje medio del cuerpo.
- Pronación: Giro del antebrazo para que la palma de la mano quede hacia abajo.
- Supinación: Giro del antebrazo para que la palma de la mano quede hacia arriba.
- Inversión: Giro del pie para que la planta del pie quede hacia dentro.
- Eversión: Giro del pie para que la planta del pie quede hacia fuera.

A continuación se ejemplifica mediante imágenes algunos de estos movimientos (Imagen 2.4 – 2.6).

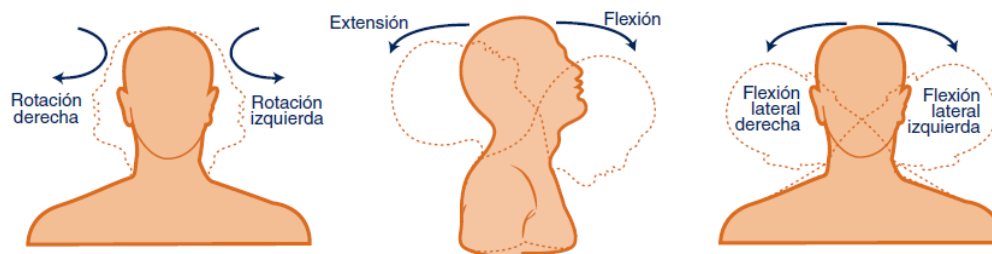


Figura 2. 4 Movimientos del cuello [21].

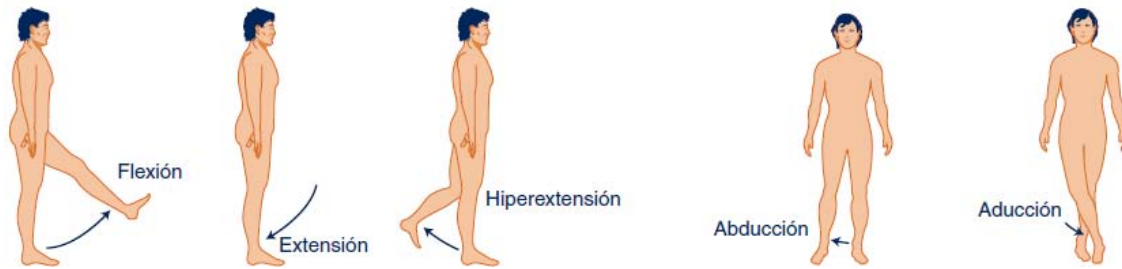


Figura 2. 5 Movimientos de los miembros inferiores [21]

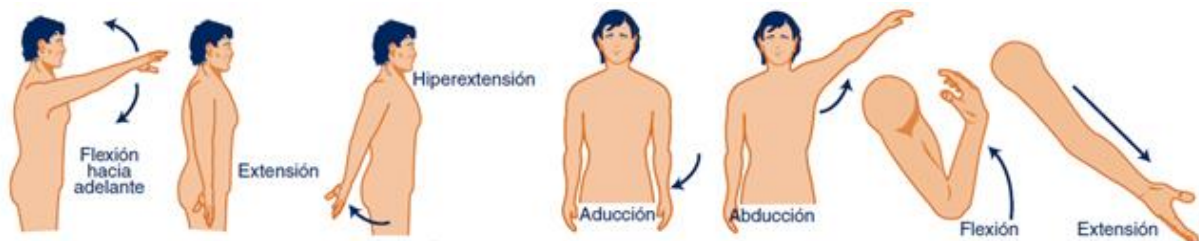


Figura 2. 6 Movimiento de los miembros superiores [21]

## - 2.2 Sistema Óseo

El sistema Óseo o Esquelético es el conjunto de cartílagos y huesos que cumplen con la función de [22]:

- Sostén del organismo.
- Palanca de los músculos que se insertan en los huesos a través de tendones.
- Protección de órganos internos.
- Metabolismo del calcio y fósforo.
- Hematopoyesis (Proceso de generación de las células que integran la sangre, es decir glóbulos rojos o eritrocitos, glóbulos blancos o leucocitos y plaquetas).

Este sistema se divide en dos partes, esqueleto axial (huesos y cartílagos de la cabeza, cuello, tórax y dorso) y esqueleto apendicular (huesos y cartílagos de los miembros superiores e inferiores, esto según la anatomía macroscópica regional) [18].

### 2.2.1 Huesos:

Como se mencionó, el sistema Óseo está compuesto por cartílagos y huesos. El cartílago es un tipo de tejido conectivo semirrígido que forma las partes del esqueleto donde se requiere más flexibilidad; por ejemplo, donde los cartílagos costales unen las costillas al esternón (Figura 2.7).

La proporción de cartílago y hueso en el esqueleto cambia a medida que la persona crece; cuanto más joven, más cantidad de cartílago posee. El recién nacido tiene casi 270 huesos, estos son blandos y flexibles porque están compuestos principalmente por cartílago. Mientras que para el adulto, posee 206 huesos [19].

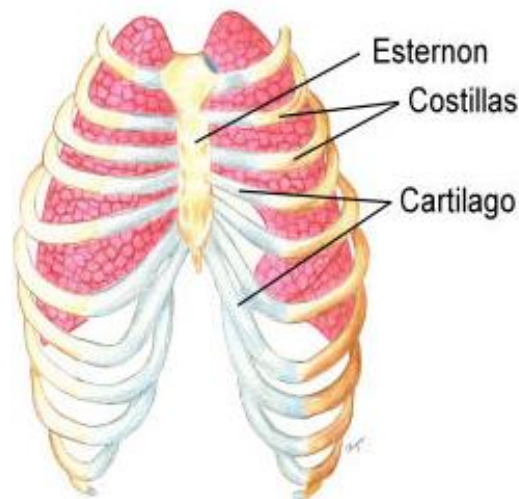


Figura 2. 7 Ilustración del cartílago entre las costillas y el esternón (vista anterior de los huesos y articulaciones del tórax) [23].

El hueso por otro lado, es un tipo de tejido conectivo duro altamente especializado, que compone la mayor parte del esqueleto.

Existen dos tipos de hueso, el hueso compacto y el hueso trabecular (esponjoso). Se diferencian por la cantidad relativa de materia sólida y por el número y el tamaño de los espacios que contienen. Todos los huesos poseen una delgada capa superficial de hueso compacto en torno a una masa central de hueso esponjoso, excepto donde este último queda reemplazado por la cavidad medular. Dentro de la cavidad medular de los huesos del adulto, y entre las trabéculas del hueso esponjoso, hay médula ósea amarilla (grasa) o roja (que forma las células sanguíneas y las plaquetas), o una combinación de ambas. La arquitectura y la proporción de hueso compacto y esponjoso



varían según la función. El hueso compacto aporta fuerza para soportar el peso en los huesos largos, que están diseñados para ser rígidos y proporcionar inserción a los músculos y ligamentos, la cantidad de hueso compacto es mayor cerca de la mitad de la diáfisis o cuerpo, donde los huesos son más propensos a arquearse. Además, los huesos largos presentan elevaciones (protuberancias, crestas y tubérculos) que sirven de apoyo en el lugar de inserción de los músculos grandes. El hueso en el sujeto vivo posee cierta elasticidad (flexibilidad) y gran rigidez (dureza) (Figura 2.8) [18].

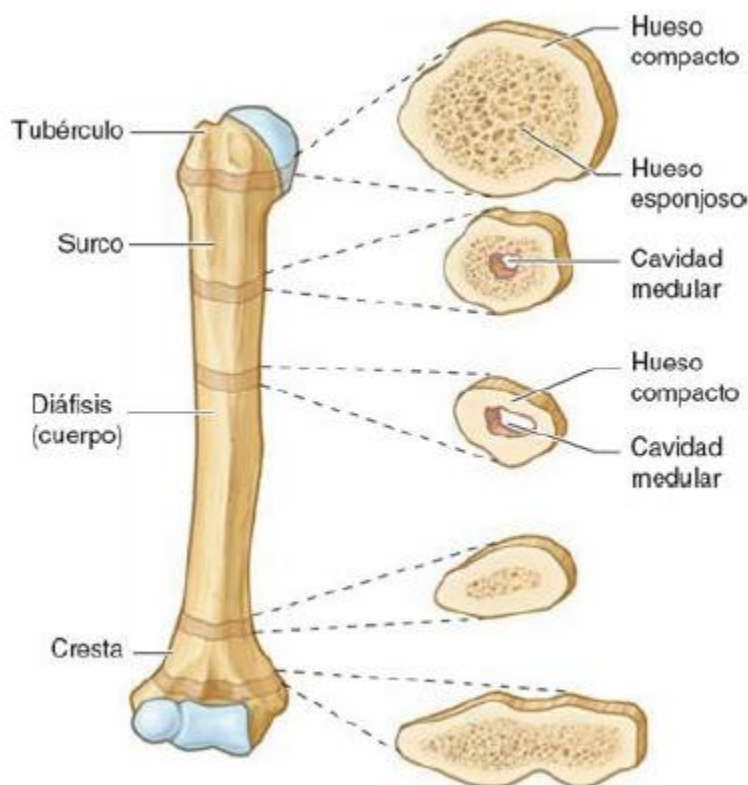


Figura 2. 8 Secciones el hueso largo y tipos de hueso [18].

Los huesos pueden ser clasificados según su forma, en [18, 22]:

- Huesos largos (por ejemplo; el húmero en el brazo, Figura 2.8).
- Huesos cortos, se hallan sólo en el tarso (tobillo) y el carpo (muñeca).
- Huesos planos, que cumplen habitualmente una función protectora (huesos del cráneo).
- Huesos irregulares, que son aquellos que tienen formas diferentes a las de los huesos largos, cortos y planos (los huesos de la cara).
- Huesos sesamoideos, que se desarrollan en ciertos tendones y se hallan donde éstos cruzan los extremos de los huesos largos de los miembros; protegen los

tendones frente a un excesivo desgaste, y a menudo modifican el ángulo de inserción tendinosa (la rótula de la rodilla).

En la Figura 2.9 se pueden visualizar los ejemplos mencionados de la clasificación según la forma del hueso.

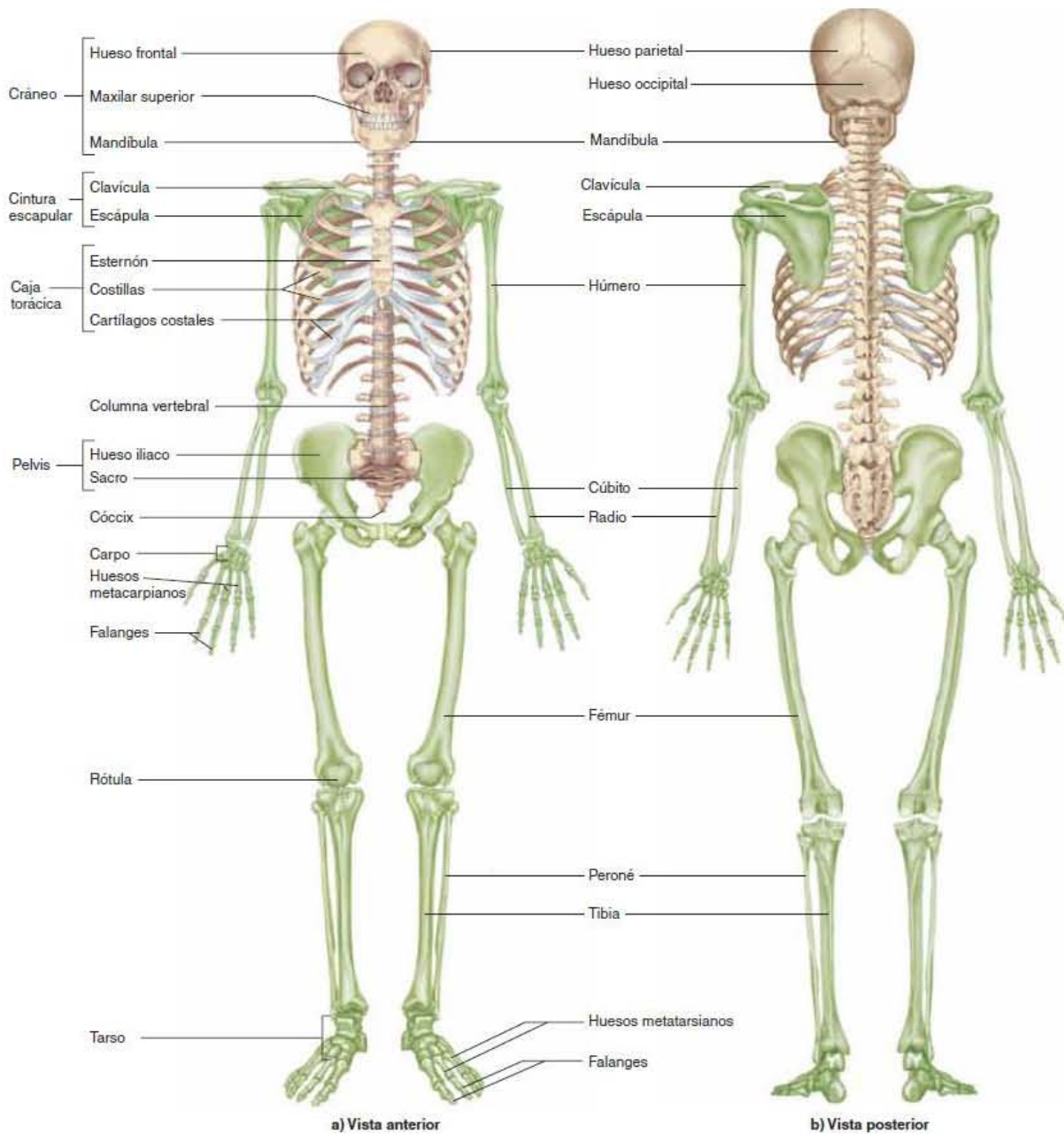


Figura 2.9 Huesos del esqueleto adulto, vista anterior y posterior. Los huesos apendiculares se encuentran en pigmento verde [19].

La columna vertebral da soporte al cráneo y el tronco, permite su movimiento, protege la médula espinal y absorbe tensiones producidas por caminar, correr y levantar objetos. También proporciona unión para las extremidades, la caja torácica y los músculos posturales. Consta de 33 vértebras que tienen discos intervertebrales de fibrocartílago entre la mayor parte de ellas (Figura 2.10 y Figura 2.11).

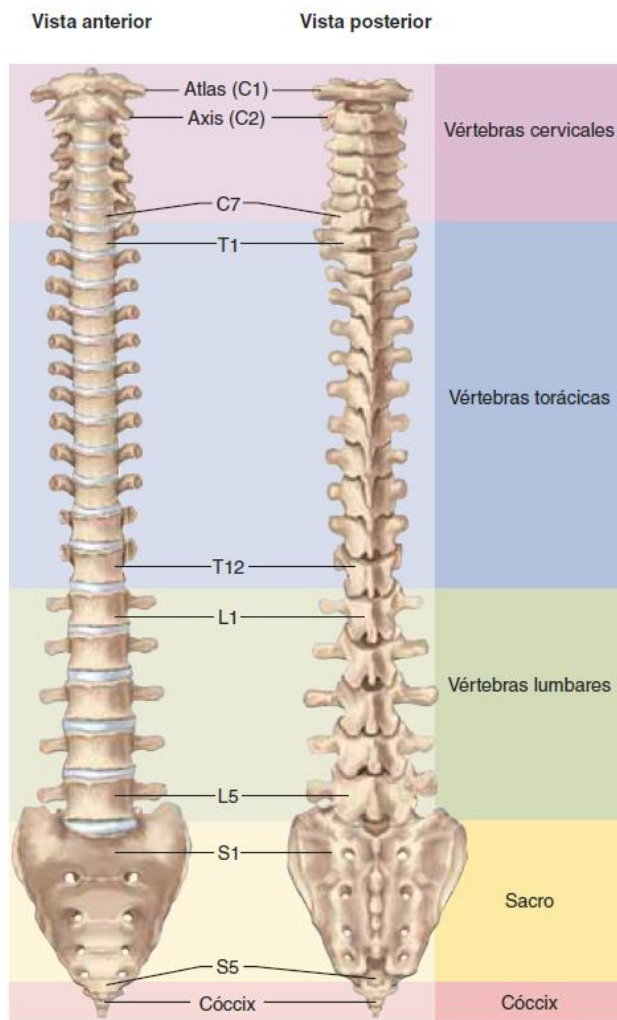


Figura 2. 10 Huesos de la columna vertebral vista anterior y posterior [19].

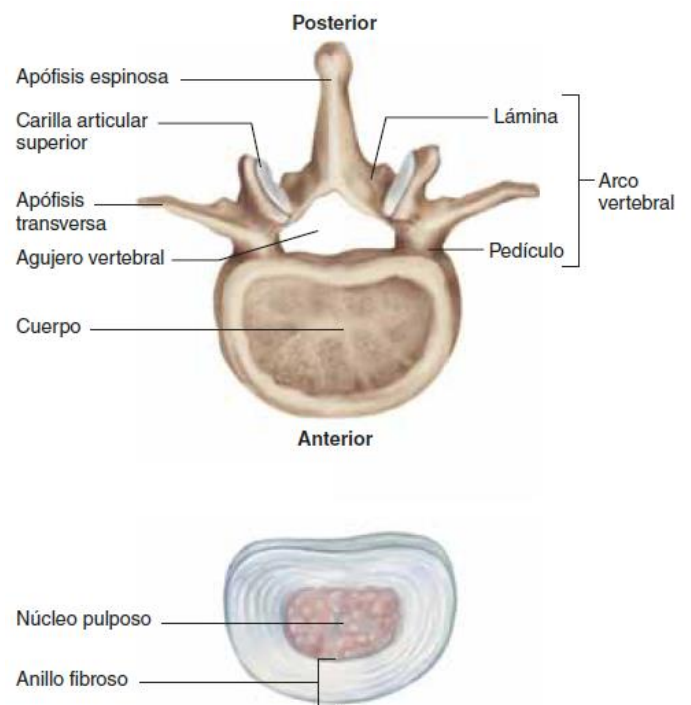


Figura 2. 11 Segunda vértebra lumbar L2 (arriba) y disco intervertebral (abajo). Vista superior en el plano transverso [19].

2.2.2 Articulaciones:

Una articulación es la unión entre dos o más huesos. Se distinguen tres clases de articulaciones según su movimiento y estructura: fibrosas, cartilaginosas y sinoviales. Estos tipos se desglosan como se indica en la Figura 2.12 [18, 19, 22].

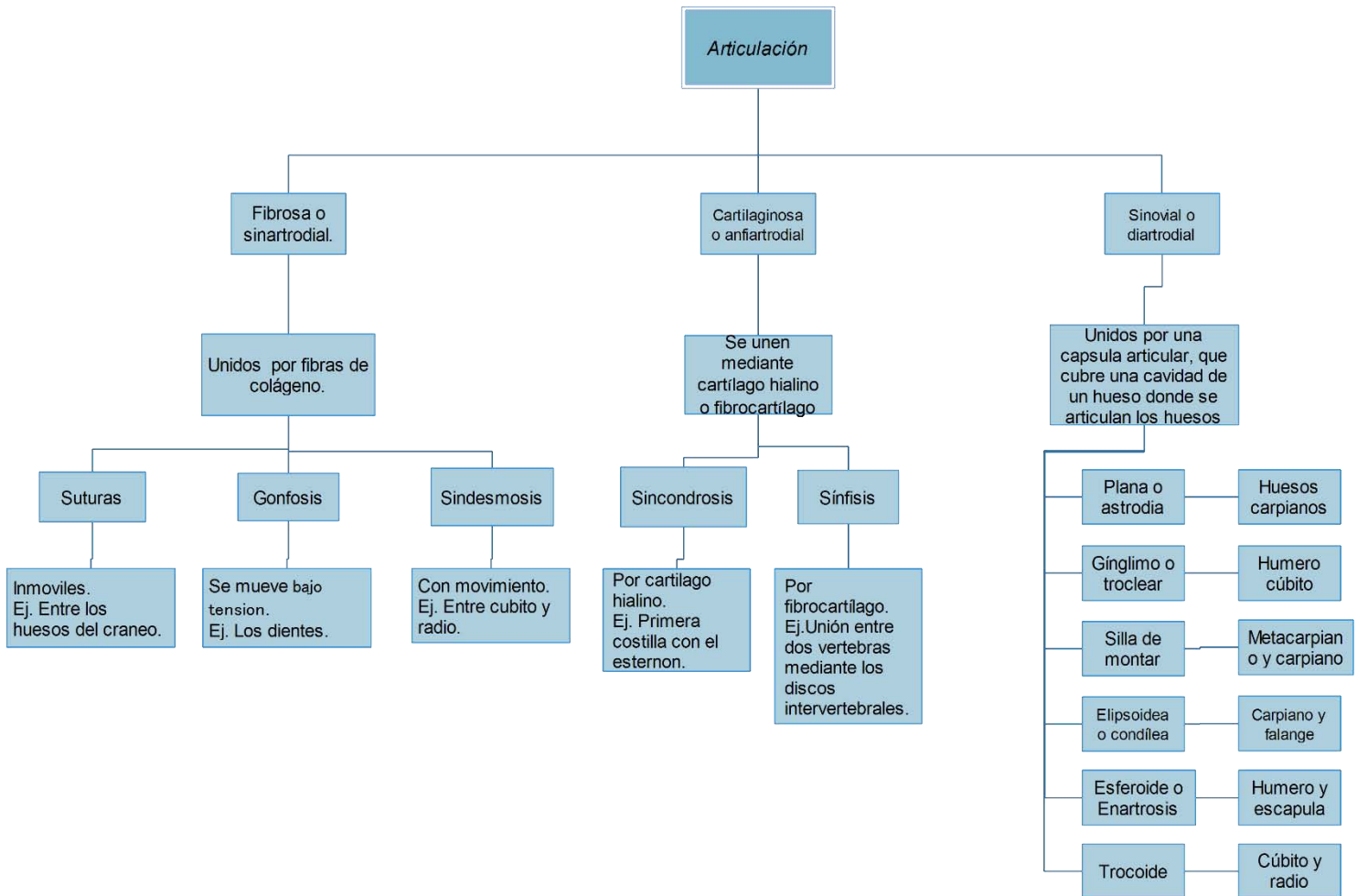


Figura 2. 12 Mapa conceptual de la clasificación de las articulaciones [18, 19].

Las articulaciones sinoviales se clasifican y ejemplifican a continuación en la Figura 2.13.

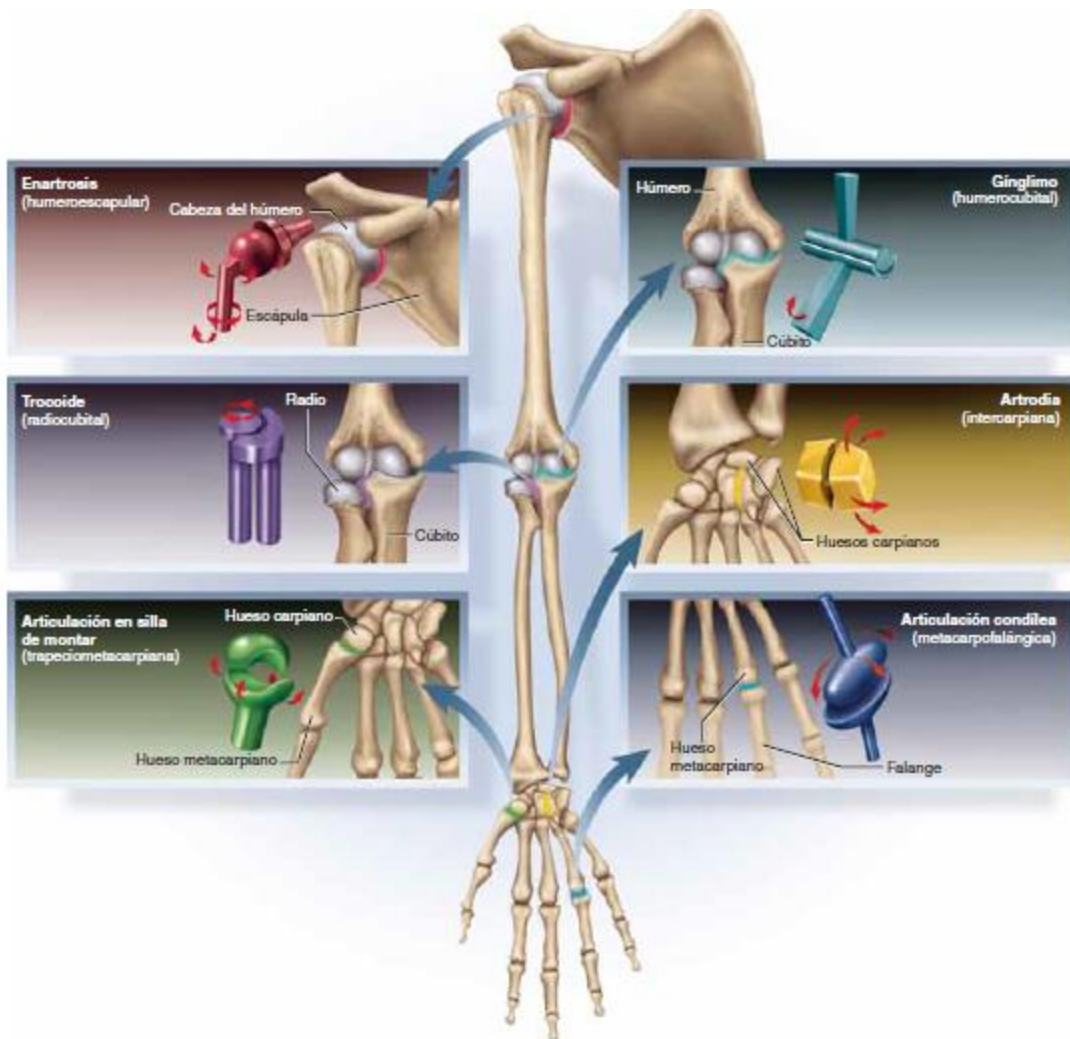


Figura 2. 13 Articulaciones sinoviales [19].

### - 2.3 Sistema Muscular

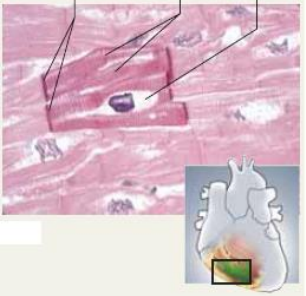
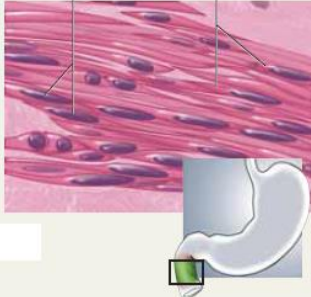
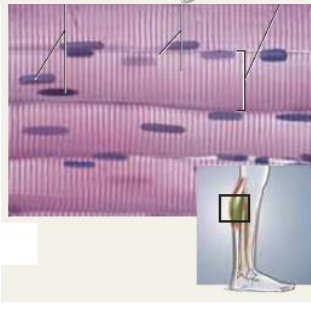
El sistema muscular es aquel compuesto por todos los músculos del cuerpo; en el ser humano son cerca de 800 músculos.

Mientras que la palabra músculo significa “pequeño ratón”, al parecer en alusión al aspecto ondulado de los músculos bajo la piel [18, 19].

El sistema muscular cumple con las siguientes funciones [19]:

- **Movimiento.** Los músculos permiten mover partes individuales del cuerpo.
- **Estabilidad.** Los músculos mantienen la postura al evitar movimientos no deseados. Algunos se denominan músculos anti gravitacionales porque resisten la atracción gravitatoria y evitan caídas o resbalones. Muchos músculos también estabilizan las articulaciones al mantener la tensión en tendones y huesos.
- **Controles de aperturas y pasajes corporales.** Tales como los que rodean la boca que sirven para hablar, ingerir alimentos y retenerlos mientras se mastica. En los párpados y las pupilas regulan la admisión de luz al ojo. Etc.
- **Producción de calor.** Los músculos estriados producen hasta 85% del calor corporal, que es vital para el funcionamiento de enzimas y, por tanto, para todo el metabolismo.
- **Control glucémico.** Los músculos ayudan a regular la concentración de glucosa en la sangre.

Existen tres tipos de tejido muscular en el cuerpo humano: cardíaco, liso y estriado; sin embargo, todos los tipos están especializados para llevar a cabo un propósito fundamental: convertir la energía química del ATP (Trifosfato de adenosina) en la energía mecánica del movimiento. A su vez, las células musculares ejercen una fuerza útil en otros tejidos y órganos, ya sea para producir movimientos deseables o para evitar los indeseables (Tabla 2.2).

Tabla 2. 2 Tipos de músculo [18, 19].		
Tipo de músculo	Localización	Tipo de actividad
<p><b>Cardiaco</b></p> 	<p>Músculo del corazón y porciones adyacentes a los grandes vasos (aorta y vena cava)</p>	<p>Contracción rítmica y continua que bombea la sangre desde el corazón. Involuntario</p>
<p><b>Liso</b></p> 	<p>Paredes de las vísceras huecas y vasos sanguíneos, iris y cuerpo ciliar del ojo</p>	<p>Contracción lenta y rítmica que actúa para impulsar sustancias y restringir la corriente, Involuntario en su mayoría</p>
<p><b>Estriado</b></p> 	<p>Forma la mayor parte de los músculos unidos al esqueleto y/o a las fascias de los miembros</p>	<p>Contracción intermitente y voluntaria; produce movimiento mediante un acortamiento (contracción concéntrica) o relajación (contracción excéntrica), o mantiene la posición contra la gravedad</p>

El músculo estriado se compone de varios tejidos, los cuales se representan de forma muy general en la Figura 2.14.

La orientación de los fascículos (Figura 2.15) determina la fuerza de un músculo y la dirección en la que se ejerce

## - 2.4 Trastornos Músculo Esqueléticos (TME)

Son anomalías en la salud causados por cargas físicas que afectan principalmente a las partes blandas del aparato locomotor: músculos, tendones, nervios y otras estructuras próximas a las articulaciones [11, 12].

Estos problemas de salud aparecen en forma de fatiga física, la cual se define como la disminución de la capacidad física del individuo cuando el esfuerzo mecánico es superior a la capacidad de la carga de los componentes del aparato locomotor (sistema óseo y sistema muscular). Si la persona no se recupera, puede entrar en un estado de fatiga crónica o patológica, tal estado conlleva alteraciones graves en la salud [1, 12].

El riesgo de los TME está dado por la carga, a mayor sea esta, mayor será el riesgo a una lesión musculoesquelética. (Figura 2.18)



Figura 2. 14 Riesgo de lesión [12].

Hay dos tipos de TME según el tipo de fatiga [1]:

- Fatiga física: con recuperación a corto plazo (ej. dorsalgia, lumbalgia, algias cervicales)
- Fatiga crónica: Cuando la persona no se recupera de la fatiga física (ej. Degeneración crónica de las articulaciones, hernias, etc.)



Y dos más según la naturaleza de la lesión [12]:

- Aguda y dolorosa: Causadas por esfuerzo intenso y breve que ocasiona un fallo estructural y funcional (ej. desgarre muscular al levantar mucho peso, la fractura de un hueso por una caída).
- Crónica y duradera: Consecuencia de un esfuerzo permanente que produce un dolor y una disfunción creciente (ej. Teno sinovitis, espasmos musculares o rigidez).

#### 2.4.1 Patologías más frecuentes:

En huesos [21]:

- Osteoporosis: Desequilibrio entre la destrucción y formación de hueso, siendo mayor la destrucción. Localizada en el esqueleto óseo puede ser de origen desconocido o por enfermedades metabólicas.  
Cursa con dolores difusos en la espalda, deformaciones de la columna vertebral, y fracturas en zonas frágiles, tales como vertebras, cubito, radio, fémur y pelvis.
- Osteoesclerosis: Aumento de trabéculas y estructuras óseas.  
Cursa con dolores óseos y articulares, adelgazamiento y alteraciones neurológicas debido a un estrechamiento de los agujeros de conjunción.
- Osteomielitis: Inflamación del hueso debido a una infección. Los síntomas son fiebre, dolor, espasmos musculares e hipersensibilidad local.
- Osteomalacia: Disminución de la cantidad de calcio en los huesos, pero que conserva una masa esquelética normal. Cursa dolores de miembros y espalda.
- Neoplasias: Son tumoraciones que afectan a los huesos que pueden ser benignos (crecimiento lento y escasos síntomas) o malignos (aumento progresivo con dolor y síntomas generales).

En articulaciones [21]:

- Artritis: Inflamación de las articulaciones, puede ser de carácter agudo o de carácter crónico. Generalmente se asocian con dolor articular, aumento de volumen de la articulación, enrojecimiento, y con todo ello impotencia funcional de las articulaciones afectadas.
- Hernia de disco: Es la profusión (abundancia excesiva, superfluidad) del núcleo gelatinoso o del anillo fibroso del disco intervertebral, que puede llegar a comprimir raíces nerviosas.

Según el grado de desplazamiento del núcleo se habla de tres variedades de hernia discal:

- Prolapso: rotura parcial del anillo fibroso.
- Extrusión: rotura total del anillo fibroso, pero el núcleo está retenido.
- Secuestro: el núcleo atraviesa el anillo y los ligamentos que lo envuelven, quedando libre en el canal vertebral.

Se producen con mayor frecuencia en la región lumbar. Cursa con dolor localizado en la zona de la inervación que se extiende a lo largo de todo el trayecto del nervio afectado, entumecimiento, alteración de la movilidad y de la sensibilidad. (Figura 2.19)

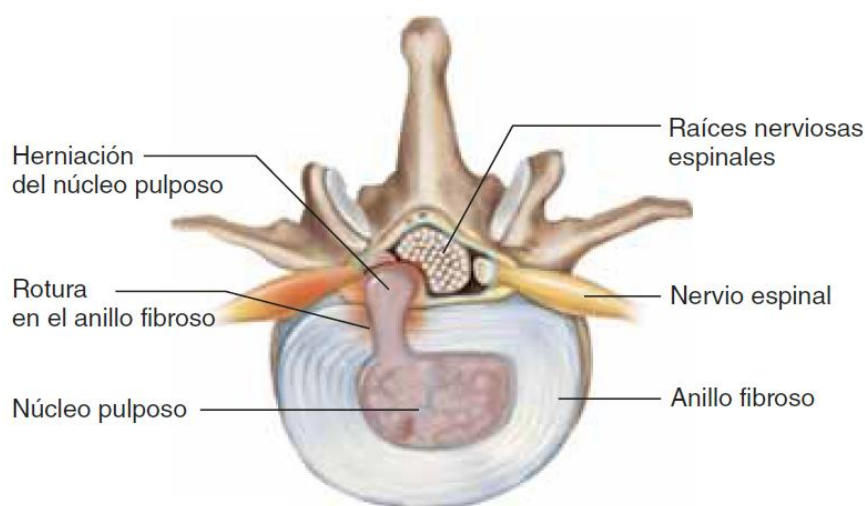


Figura 2. 15 Vértebra herniada vista superior plano transverso [19].

- Artrosis: Enfermedad degenerativa articular no inflamatoria, caracterizada por producir un pinzamiento del cartílago hialino, remodelación ósea y sinovitis secundaria. Cursa con dolor al movimiento, rigidez articular, aumento de sensibilidad a la presión, ligera hinchazón y ligero aumento de la temperatura.

En músculos [21]:

Las miopatías, o enfermedades musculares, constituyen un grupo de afecciones de carácter heterogéneo, que tienen en común la afectación global de los músculos esqueléticos.

- Distrofias: Caracterizado por una atrofia progresiva de los músculos sin que exista lesión aparente de la médula espinal. Generalmente son de carácter hereditario y progresivo. Cursan con debilidad muscular.

- Miopatías metabólicas: Trastornos musculares desencadenados por la alteración en la utilización por el músculo de la glucosa y ácidos grasos como fuente de energía. Se acompaña de debilidad muscular crónica y progresiva. Pueden dar lugar a la aparición de calambres.
- Miastenia grave: Trastorno autoinmune que altera la conducción del impulso nervioso hacia las fibras musculares. Puede ser de carácter generalizado o afectar, de forma selectiva, a los músculos oculares. Cursa con ptosis palpebral, diplopía, alteración de la expresión facial e incluso fatigabilidad muscular, si afecta a los músculos de los miembros.

Haciendo referencia a las tablas 1.4 a 1.7 del capítulo anterior. Las anomalías más frecuentes de TME capturados son:

- A nivel de la OIT (1976 a 1996):

Trastornos articulares. Con 81.3% de la población capturada.

Lesiones debidas a vibración y choque. Con 2.1% de la población capturada.

- A nivel nacional (2013 de hombres y mujeres):

Luxaciones, esguinces y desgarros. 97,224 casos capturados

Traumatismos. 15,156 casos capturados.

- A nivel específico de la zona de estudio (Puebla, 2013 de hombres y mujeres):

Luxaciones, esguinces y desgarros. 3,015 casos capturados.

Traumatismos. 681 casos capturados.

#### 2.4.2 Factores que contribuyen en el desarrollo de TME:

Los factores que favorecen al desarrollo de los TME dependen tanto de los elementos relativos a la tarea y las condiciones en que se realiza, como de las características individuales de la persona, es decir, la edad, el sexo, el entrenamiento, la dieta etc.[1]

Más como se ha mencionado, principalmente es una relación causal entre los TME y el esfuerzo físico realizado durante la actividad laboral. Las dolencias o lesiones que afectan a músculos, tendones, articulaciones, ligamentos y huesos son producidas por un esfuerzo mecánico excesivo de estas estructuras biológicas. Consiguiendo de esta manera dividirlo en dos tipos según las causas del esfuerzo [24]:

Causas físicas

- Cargas.
- Malas posturas y movimientos forzados.
- Movimientos muy repetitivos.
- Golpes fuertes con la mano.
- Presión mecánica directa sobre tejidos corporales.
- Vibraciones.
- Ambientes de trabajo fríos.

Causas atribuidas a la organización del trabajo

- Ritmo de trabajo.
- Tarea repetitiva.
- Ordenación del tiempo de trabajo.
- Sistemas de retribución.
- Trabajo monótono.
- Factores de trabajo psicosociales.

A continuación se presenta en la Tabla 2.3 las causas con su posible consecuencia, y algunos ejemplos.

Tabla 2. 3 Principales factores que contribuyen a los TME [12].		
Factor	Consecuencia	Ejemplo
Ejercer mucha fuerza	Esfuerzo excesivo de los tejidos afectados	Levantar, empujar o jalar objetos pesados
Manipulación manual de cargas durante largos periodos	Actividad muscular duradera y posible sobrecarga	Trabajar con los brazos en alto
Manipular objetos repetidamente	Fatiga y esfuerzo excesivo de las estructuras musculares	Trabajos de montaje, tecleo prolongado
Posturas perjudiciales	Esfuerzo excesivo de los elementos óseos y musculares	Trabajar con el tronco encorvado, con los brazos por encima de los hombros
Inactividad muscular	Pérdida de la capacidad funcional de músculos, huesos y tendones	Estar largos periodos de tiempo sentado
Movimientos repetitivos	Dolencias en las extremidades	Usar repetidamente los mismos músculos sin descanso
Vibraciones	Disfunción de los nervios, reducción del flujo sanguíneo y trastornos degenerativos	Herramientas manuales que vibran
Factores ambientales y riesgos físicos	Afectan el esfuerzo mecánico y agravan los riesgos	Utilizar herramientas manuales a bajas temperaturas
Factores psicosociales	Aumento de esfuerzo físico, mayor ausentismo laboral	Situaciones de apremio, escaso margen de decisión laboral, escaso apoyo social

### 2.4.3 Prevención:

Las medidas preventivas de los TME deben ir encaminadas a mejorar las condiciones de la actividad que se realiza, así como los movimientos mediante el entrenamiento adecuado, la dieta etc.

Para conocer el riesgo en una actividad es necesario una evaluación; esta valoración de riesgo se basa en un proceso dirigido a estimar la magnitud de condiciones y/o actividades de riesgo. Con esta información se pueden tomar medidas preventivas de una manera más precisa.

Dentro del análisis de riesgo, se consideran las fases siguientes [20]:

- Identificación del peligro.
- Estimación del riesgo, valorando conjuntamente la probabilidad y las consecuencias de que se materialice el peligro.
- Orden de magnitud del riesgo.
- Valoración del riesgo, con el valor del riesgo obtenido y comparándolo con el valor del riesgo tolerable, se emite un juicio sobre la tolerabilidad del riesgo en cuestión.

Hay diversos métodos de evaluación de riesgo, por mencionar algunos ejemplos están [1, 20]:

- Método RULA
- Método AFNOR
- Estimación del metabolismo indirecta
- Valoración del consumo de oxígeno
- Estimación de frecuencia cardíaca
- Análisis dinámico y estático.
- Análisis cinemático.

No se profundizará en los métodos de evaluación de riesgo, más se mencionan a continuación ciertos factores a tener en cuenta para la prevención de estos trastornos de salud.

- Equilibrio:

Para poder mantener y favorecer la salud es necesario que haya un equilibrio entre la actividad y el descanso. Los descansos son imprescindibles para poder recuperarse de los esfuerzos laborales y para evitar que se acumule la fatiga. El movimiento será preferible a las actitudes estáticas y se procurará compaginar los periodos de actividad con periodos inactivos de relajación. La carga de trabajo "favorable" será distinta según las personas en función de las aptitudes y recursos de cada uno. Se evitará tanto el esfuerzo excesivo como la inactividad. Un nivel de esfuerzo apropiado va acostumbrando a los músculos hasta que éstos se adaptan, con lo que aumenta la capacidad tanto de los músculos como de los tendones y de los huesos [12].

- Principio ergonómico

Cuando hay una desproporción entre el esfuerzo y la capacidad funcional del sujeto existe el riesgo de dañar el aparato locomotor. El principio básico de la ergonomía consiste en crear un equilibrio apropiado entre las actividades y la capacidad del trabajador, ya sea planificando las funciones para que las labores se adapten a la persona, o bien se desarrolle su capacidad, es decir, se forme a la persona adaptando sus aptitudes profesionales.

El objetivo principal ha de ser adaptar las condiciones de trabajo a las posibilidades del trabajador, para lo cual es importante tener en cuenta que la capacidad de cada persona depende de su edad y de su género. No debe optarse por una adaptación de las personas al trabajo porque éste no puede ser desempeñado por cualquier persona, sino por las que hayan recibido la formación apropiada para ello [12].

- Estrategias para el desempeño de la actividad laboral

El método empleado por el trabajador en el desempeño de sus funciones puede entrañar un riesgo de esfuerzo para su aparato locomotor. Algunas estrategias ocupacionales pueden implicar un menor riesgo que otras. Por ejemplo, en los casos en que al manipular cargas pesadas el centro de gravedad se mantiene cerca del cuerpo, para lo cual el objeto debe levantarse, siempre que sea posible, doblando las rodillas en lugar de curvar la espalda. Otras precauciones para reducir el riesgo de

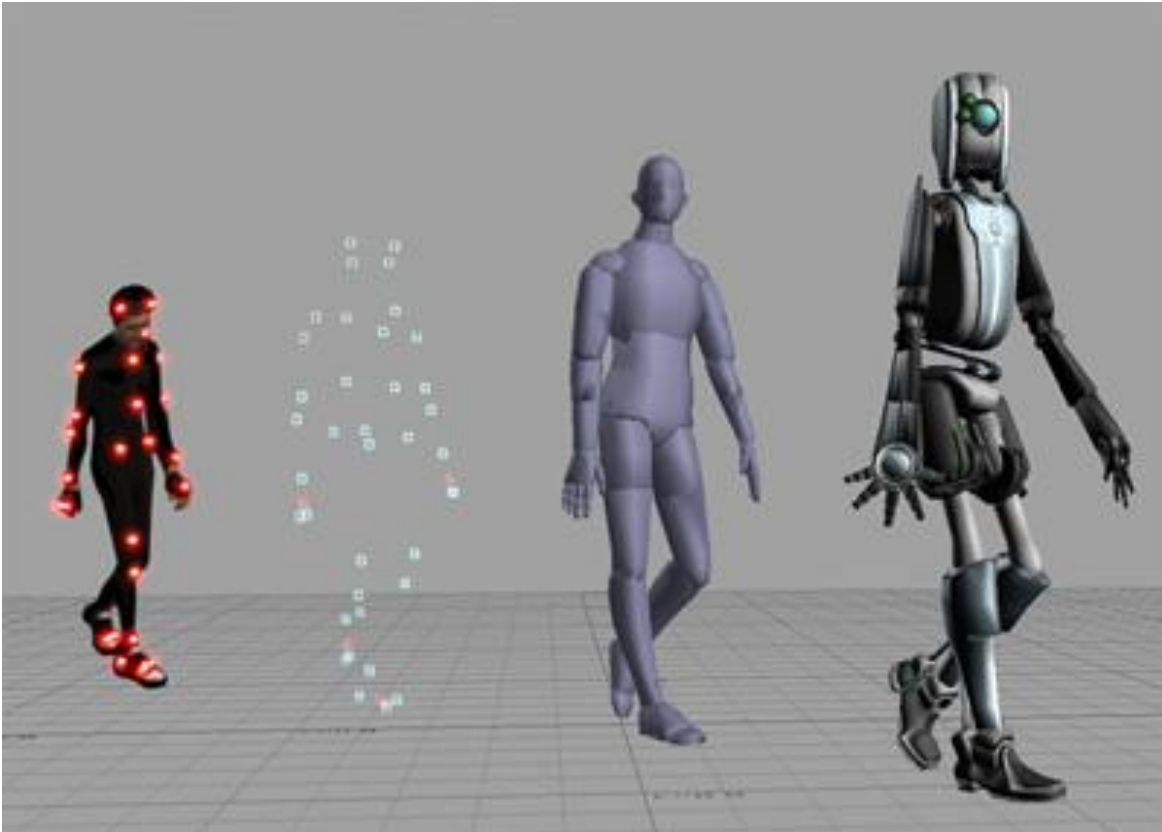
esfuerzo excesivo consisten en evitar las torsiones y las inclinaciones laterales del cuerpo, y mantener un ritmo de actividad moderado, en lugar de trabajar con prisa y sin continuidad [1, 12].

- Evitar accidentes y lesiones

Hay situaciones que pueden entrañar un peligro. Por ejemplo, el riesgo de una caída puede reducirse permaneciendo firme para no perder el equilibrio y estabilizando la estructura sobre la que se vaya a trabajar, o el equipo como guantes, visores, cascos puede evitar accidentes con maquinaria [12].

## Capítulo III. Sistemas de Captura de Movimiento

---



*"El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos." -- Henry Ford*



### - 3.1 Introducción

El análisis biomecánico de este trabajo es por medio de la captura del movimiento del escardado con un sistema de captura inercial y óptico. Por eso en el capítulo presente se describe los sistemas de captura de movimiento más comunes y se enfatiza sobre los utilizados para las pruebas en este estudio.

La captura de movimiento, también conocida por su equivalente en inglés motion capture o su abreviatura mocap, comenzó como una herramienta para el estudio de la biomecánica y puede ser definida como “el almacenaje digital del movimiento, que mediante puntos de referencia sobre un cuerpo actuando se almacena sus acciones en forma de vectores y tiempo, lo que permite que éste se visualice como wireframe (imagen generada por computadora) o se aplique a una tercera geometría” según Andrew Chong, especialista en animación [25].

El estudio y captura del movimiento como concepto no es nada nuevo, ya que este se inició desde la antigua Grecia. Sin embargo, en los últimos tiempos el término se ha especializado, refiriéndose actualmente a toda tecnología de captura y almacenamiento digital del movimiento [26, 27].

La captura de movimiento se ha vuelto cada vez más importante como fuente de datos, por lo que actualmente tiene varias aplicaciones, las cuales son [25-27]:

- Animación: Se utiliza para crear personajes con movimientos y expresiones corporales más cercanos al mundo real en películas, videojuegos, etc. Por ejemplo Happy Feet, Avatar, etc. así como herramientas de juegos de video como Kinect y Play Station Move.
- Militar: Se usa para permitir a los militares agilizar las maniobras en combate, las cuales requieren velocidad y destreza. Un ejemplo en uso es en la aviación, donde los cascos que capturan el movimiento permiten interactuar con dispositivos de realidad aumentada (HMD, Helmet Mounted Display). Por ejemplo, el casco Cobra para los cazas Gripen incluye un proyector que permite que el piloto vea diferentes datos sin necesidad de mirar a una pantalla o dispositivos del avión, facilitando el pilotaje en situaciones de combate.
- Deporte: La información recopilada se emplea en el estudio y posterior mejora de los movimientos que realizan las extremidades del deportista durante la actividad física, para analizar y comprender el movimiento del oponente y así crear la estrategia de juego. Por ejemplo para la creación de estrategias en el cricket y fútbol americano, para la verificación de la acción de los jugadores de bolos, etc.
- Medicina: Se utiliza para obtener la información necesaria para el diseño de prótesis y el análisis de la locomoción la cual permite detectar con precisión algún error para después investigar alguna solución.

En la imagen 3.1 se ejemplifica el uso de un sistema de captura de movimiento óptico usado para la animación de una película o videojuego.



Figura 3. 1 Animación por Sistema de Captura de movimiento óptico sin marcadores [27].

El análisis del movimiento comenzó en la antigua Grecia, donde Aristóteles escribió *De Motu Animalium* (Sobre el movimiento de los animales), en la cual comparó los cuerpos de los animales con sistemas mecánicos.

Casi dos mil años después, Leonardo da Vinci describió algunos mecanismos que utiliza el cuerpo humano a la hora de moverse: el mantenernos de pie, saltar, como nos levantamos tras estar sentados y el caminar en pendientes.

Cien años después, Galileo tratará de analizar la fisiología humana desde un punto de vista matemático. Con la ayuda del trabajo de Galileo, Borelli calculó las fuerzas necesarias para mantener el equilibrio en varias articulaciones del cuerpo, determinó el centro de gravedad del ser humano, calculó los volúmenes de aire que inspiraba y expiraba el ser humano y demostró que la respiración era debida a la elasticidad de los tejidos. Estos trabajos del campo de la biomecánica fueron seguidos por Newton, Bernuolli, Euler, Poiseuille, Young y otros científicos reconocidos [26].

Más la digitalización del movimiento dio sus primeros pasos en el siglo 20, cuando en 1911, el dibujante Winsor McCay dibujó un personaje en varias hojas de papel con ligeros cambios entre estos y luego los muestreaba a una tasa constante para crear la ilusión de movimiento.

Después de esto, en 1915 se inventó el rotoscopio (dispositivo que permite diseñar imágenes para animación) por Max Fleischer, esto se considera como el inicio de la captura de movimiento [27].

Otro más de los pioneros en la captura de movimiento fue Eadweard Muybridge que en 1872, Leland Stanford, exgobernador del Estado y presidente de Central Pacific Railway, y un grupo de amigos sostenían que durante en el trote largo o el galope de

un caballo había un instante en el que el animal no apoyaba ningún casco en el suelo. Otro grupo, del que formaba parte James Keene, presidente de la Bolsa de Valores de San Francisco, afirmaba lo contrario.

Stanford encargó este trabajo a Muybridge y éste, sin mucha confianza en el resultado, fotografió al caballo trotando aunque finalmente, el experimento no tuvo el éxito esperado ya que el proceso del colodión húmedo (proceso de captura fotográfica) exigía varios segundos para obtener un buen resultado.

En 1873 Muybridge logró producir unos negativos en los que fue posible reconocer la silueta de un caballo y además, inventó un obturador mecánico (consiste en dos pares de hojas de madera que se deslizaban verticalmente por las ranuras de un marco y dejaban al descubierto una abertura de 20 centímetros por la que pasaba la luz. Con este sistema se lograba un tiempo de exposición récord de 1/500 de segundo.), pues sus primeros intentos fallaron porque el obturador manual era demasiado lento como para lograr un tiempo de exposición tan breve como precisaba. Gracias a estas aportaciones, pudo demostrar a Stanford cómo el caballo podía tener las cuatro patas en el aire al mismo tiempo [25].

Para principio de los ochentas, comienzan a salir los primeros sistemas de seguimiento visual como el Op-Eye y el Sel Spot.

En 1988, la empresa deGraf/Wahrman desarrolló Mike the Talking Head para Silicon Graphics a manera de mostrar las capacidades en tiempo real de sus nuevas máquinas 4D. Mike era dirigido por un controlador específicamente hecho para él que permitía a un usuario manejar varios parámetros de la cara del personaje, incluyendo boca, ojos, expresión y posición de la cabeza. El hardware de Silicon Graphics proporcionaba una interpolación en tiempo real entre las expresiones faciales y geometría de la cabeza del personaje y del usuario [25, 26].

Alrededor de 1992 desarrollaron un sistema de rastreo facial llamado Face Waldo usando sensores mecánicos adheridos a la barbilla, labios, mejillas y cejas, y utilizando sensores electromagnéticos en la estructura del casco, consiguieron capturar la mayor parte de los movimientos de la cara y mapearlos para aplicarlos a un modelo virtual en tiempo real. La importancia de este sistema fue que un actor podía manipular todas las expresiones faciales de un personaje sólo mimetizando lo que quería que hiciese, lo cual supone una interfaz completamente natural.

En SIGGRAPH, en 1993, Acclaim entusiasmó al público con una animación realista y compleja de dos personajes hecha completamente con mocap. Durante los años

anteriores, Acclaim había desarrollado en secreto un sistema de rastreo óptico de alta definición, superior a los anteriormente citados, capaz de seguir 100 marcadores simultáneamente en tiempo real. Acclaim usa el sistema principalmente para generar secuencias de movimiento de personajes para videojuegos. [28] Para final del siglo y comienzo del milenio se han seguido perfeccionando las técnicas de mocap, incluyendo nuevo hardware con mayores posibilidades y nuevo software que permita utilizar los dispositivos.

Posterior se hicieron un hueco empresas como Autodesk (conocida por su 3D Studio Max), Kaydara (conocida por FilmBox y MotionBuilder, y absorbida por Alias) o Alias (conocida por Maya, y actualmente absorbida por Autodesk), cuyos programas son usados intensivamente en los sistemas de captura [26].

### - 3.2 Tipos de Sistemas de captura de movimiento

Los principales tipos de sistemas de movimiento de captura o mocap se clasifican según el tipo de tecnología como se muestra en la Figura 3.2.

Aunque al final de este subcapítulo se mencionarán otros sistemas que no tienen tanto auge, tales como la fibra óptica y los acuáticos.

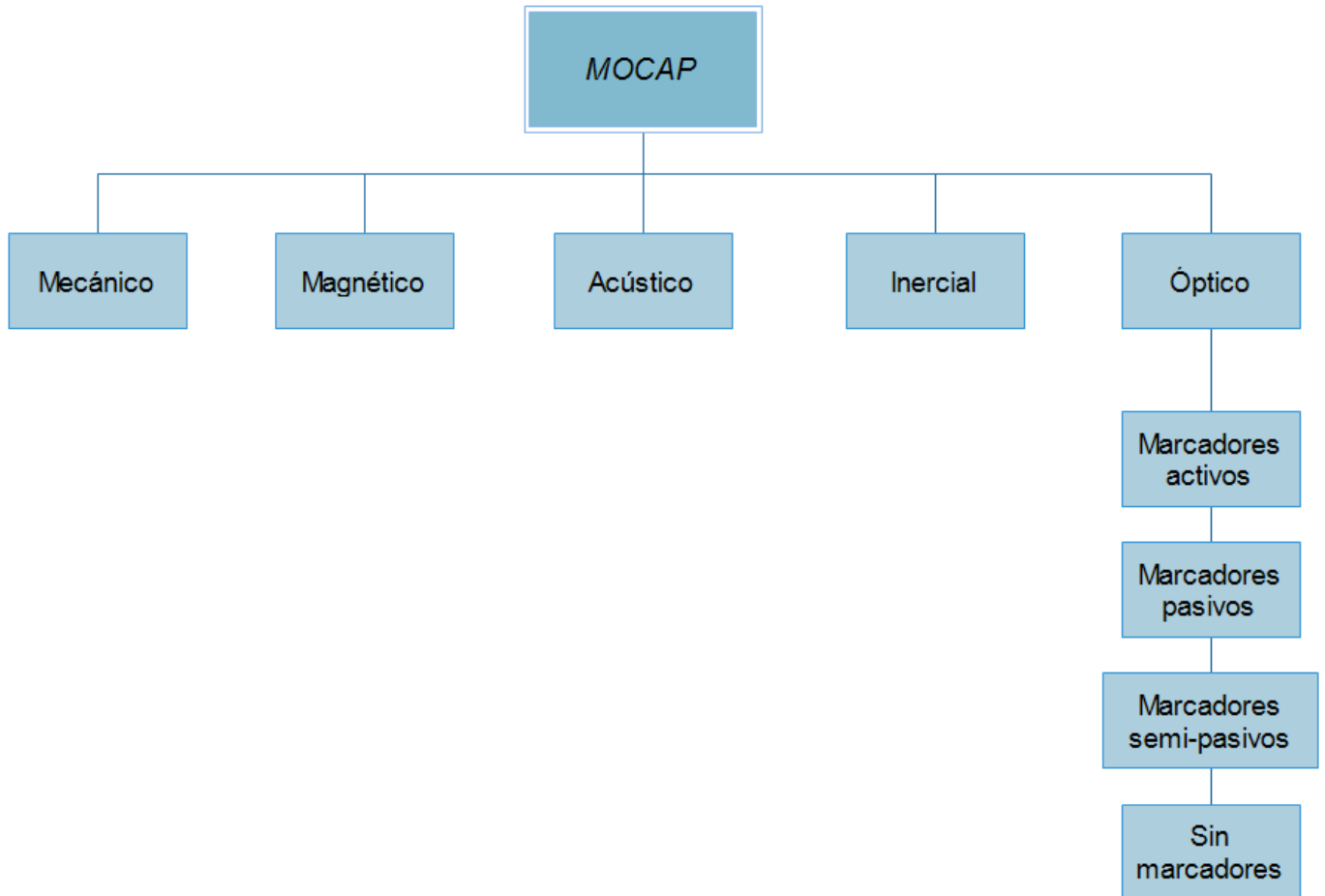


Figura 3. 2 Tipos de sistemas de captura de movimiento [26, 27, 29].

### 3.2.1 Mecánico:

Estos sistemas están hechos de potenciómetros colocados en estructuras rígidas de metal o plástico que se colocan en las articulaciones. Al moverse el traje, los potenciómetros recogen datos sobre el grado de apertura de las articulaciones y permiten mediante un proceso gráfico la visualización de sus posiciones.

Los potenciómetros constan de un elemento deslizante acoplado a una resistencia, que produce una variación de tensión que puede medirse para conocer el grado de apertura de la articulación a la que está acoplado. A veces, a estos sensores se les denomina sensores angulares digitales o analógicos. Los sensores angulares pueden enviar la información mediante cables, pero lo más frecuente es que lo hagan mediante radiofrecuencia [25-27, 29]. En la Tabla 3.1 se observan las ventajas y desventajas de este sistema.

Tabla 3. 1 Ventajas y desventajas del mocap mecánico [25].	
Ventajas	Desventajas
En tiempo real	Estructura del traje frágil
Relativamente barato	No mide posición en el espacio
Sin interferencias	Las posiciones absolutas se calculan a partir de rotaciones
Fácil de transportar	Configuración fija
Gran rango de captura	Frecuencia de muestreo baja
	Calibración frecuente

A continuación en la Figura 3.3 se muestra el hombro de un exoesqueleto de un sistema de captura de movimiento mecánico.



Figura 3. 3 Hombro de exoesqueleto METAMOTION Gypsy's [30].

### 3.2.2 Magnético:

Para los mocap magnéticos se dispone de una colección de sensores electromagnéticos que miden la relación espacial con respecto a un transmisor cercano. Los sensores se colocan en las articulaciones del cuerpo de estudio y se conectan a una unidad electrónica central, casi siempre mediante cables. Están constituidos por tres espiras ortogonales que miden el flujo magnético, determinando tanto la posición como la orientación del sensor. Un sistema magnético típico consta de un transmisor, sensores, una unidad de control electrónica y un software propietario para el procesamiento. Un rastreador magnético

de última generación puede tener hasta 90 sensores y es capaz de capturar hasta 144 muestras por segundo, si bien este valor puede depender del número de sensores.

El transmisor genera un campo electromagnético de baja frecuencia que los receptores detectan y transmiten a la unidad electrónica de control, donde se filtra y amplifica. Después se envía a un ordenador central, donde se infiere la posición de todos los sensores en el espacio así como su orientación. El proceso de captura completo no es en tiempo real, pero se le aproxima bastante, dependiendo mucho de la cantidad de ampliación, filtrado y procesado de datos que se realice, así como del tiempo de respuesta de la conexión entre la unidad de control y el ordenador. La latencia de un rastreador magnético es el tiempo que transcurre entre la recogida de datos y la observación del resultado. Este valor puede variar desde varios milisegundos a unos pocos segundos. Dado que todos los datos que se recolectan están en relación con la posición del emisor.

Existen dos tipos de rastreadores electromagnéticos: los que usan pulsos magnéticos cuadrados (como Flock of Birds de Ascension Technology Corporation) y los que usan campos magnéticos sinusoidales (como el Patriot de Polhemus). En la Tabla 3.2 se esboza las ventajas y desventajas de este sistema.

Tabla 3. 2 Ventajas y desventajas del mocap magnético [25].	
Ventajas	Desventajas
Posición y orientación disponibles sin necesidad del pos procesamiento	Los sensores de rastreo son propensos a las interferencias magnéticas y eléctricas
La posibilidad del tiempo real	Los cables y baterías para los sensores de seguimiento pueden limitar el movimiento
Los sensores de seguimiento no son ocluidos por objetos metálicos	Los sensores magnéticos tienen una menor tasa de muestreo que muchos sistemas ópticos
Múltiples actuaciones pueden ser capturadas simultáneamente con múltiples configuraciones	La configuración de los sensores es difícil de cambiar
Son más baratos que los sistemas ópticos	El volumen de captura es normalmente menor que los sistemas ópticos
	La información tiende a tener ruido

En la Figura 3.4 se presenta del lado izquierdo un actor usando un mocap magnético y del lado derecho un acercamiento del sistema.



Figura 3. 4 Mocap magnético [29].

### 3.2.3 Acústico:

Generalmente para el mocap acústico se utilizan emisores que generan pulsos ultrasónicos (imperceptibles por los seres humanos) que son capturados por uno o varios receptores situados en posiciones conocidas, permitiendo averiguar la posición del emisor en el espacio, e incluso su orientación en algunos casos. Los transmisores se colocan en las articulaciones del cuerpo de estudio, mientras que tres receptores se colocan en el sitio de captura.

El cálculo de la posición de cada transmisor es el siguiente: Utilizando como datos el intervalo de tiempo entre el emisor de ruido, la recepción de éste por el receptor y la velocidad de desplazamiento del sonido en el medio ambiente, se puede calcular la distancia recorrida por el ruido. Para determinar la posición 3D de cada transmisor, una triangulación de las distancias entre el emisor y cada una de los receptores se calcula [25-27, 29]. En la Tabla 3.3 se plantean las ventajas y desventajas de este sistema de captura de movimiento.

Tabla 3. 3 Ventajas y desventajas mocap acústico [25-27, 29].	
Ventajas	Desventajas
Barato relativamente	Dificultad de obtener una descripción correcta de los datos en un cierto instante
No sufre interferencia de oclusión	Restricción de la libertad de movimiento
No sufren de interferencia magnética	Cantidad de transmisores limitado
	Susceptibles a reflexiones de ruido externo



**3.2.4 Inercial:**

Este es el sistema con el que se captura la aceleración de las articulaciones en movimiento del escardado. Consiste en emplear sensores que recogen datos de aceleración, en algunos casos velocidad y de velocidad angular. Estos sensores normalmente son acelerómetros y giroscopios.

Para el estudio se utilizaron acelerómetros triaxiales, es decir que capturan la aceleración en tres ejes relativos a la calibración que se les provea.

Conociendo la posición y la velocidad angular inicial e integrando la información que recogen los sensores, es posible determinar la posición, eje de giro y velocidad angular de cualquier sensor. Los datos recogidos por los sensores inerciales se transmiten a un ordenador, donde se puede observar sobre una figura animada el movimiento completo registrado.

Uno de los sistemas más conocidos de este tipo son los mandos inalámbricos de la Wii de Nintendo (Wii remote), si bien para captura de movimiento se emplean otros sensores mucho más precisos y con mayor frecuencia de captura, generalmente acoplados a unos trajes especiales con varios sensores [25, 26].

En la tabla 3.4 se plantean las ventajas y desventajas del sistema de captura de movimiento inercial.

Tabla 3. 4 Ventajas y desventajas del mocap inercial [25, 26].	
Ventajas	Desventajas
No sufre de interferencia de oclusión	Puede haber error de captura
No sufre interferencia magnética	Puede existir error de procesamiento (arrastre de error de cálculo)
Procesamiento en tiempo real	
Gran rango de captura	
Sin mecanismos externos	
Fácil de transportar	

En la imagen siguiente se muestra un diagrama de cómo es la captura de datos del sistema inercial (Figura 3.5).

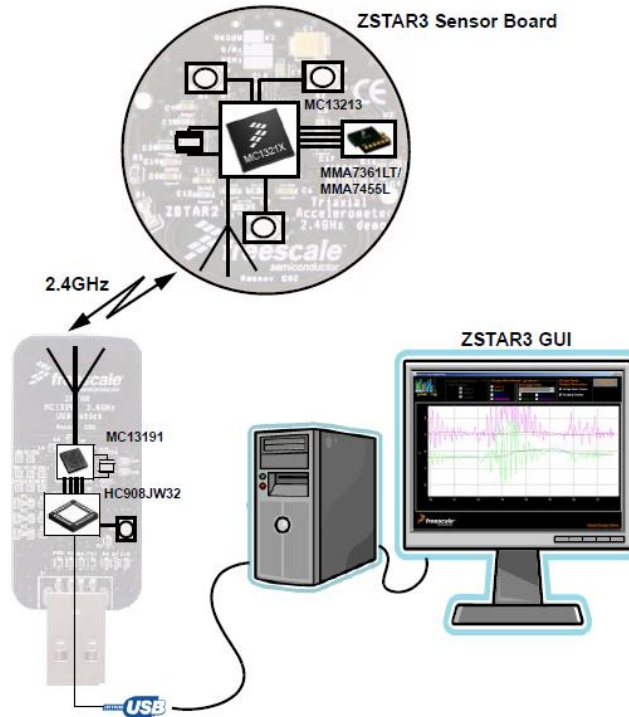


Figura 3. 5 Captura de datos mediante acelerómetro [31].

### 3.2.5 Óptico:

El mocap óptico es utilizado como complemento para la captura de las aceleraciones en el movimiento.

Utilizando una o más cámaras sincronizadas, los sistemas ópticos emplean los datos recogidos por sensores de imagen para deducir la posición de un elemento en el espacio. Es recomendable emplear más de una cámara para obtener la posición desde cualquier indicador, siempre y cuando no haya cámaras innecesarias para no complicar de más el procesamiento.

Las cámaras tienen una velocidad de captura de entre 30 y 1000 fotogramas por segundo, con lo cual permiten rodar objetos a velocidades más altas que otros sistemas de captura.

En los sistemas ópticos, se debe calibrar las cámaras mediante el rastreo de un objeto conocido que el software reconozca, de forma que se calcule la posición de cada cámara con respecto a un punto conocido. Si la cámara se mueve mínimamente, se deberá recalibrar [25-27, 29].

Existen diversos tipos, estos son:

- Indicadores pasivos: Los indicadores pasivos son dispositivos que están recubiertos de un material reflectante y se pegan al sujeto de estudio en puntos estratégicos. La luz que reflejan es recogida por las cámaras. Estas pueden configurarse con un umbral de luz, de tal forma que sólo recojan la luz reflejada por los indicadores, no la luz reflejada por la superficie del sujeto.

No se necesita de la colocación de dispositivos electrónicos en el cuerpo.

Ejemplo del uso de marcadores pasivos se encuentra a continuación en la Figura 3.6.

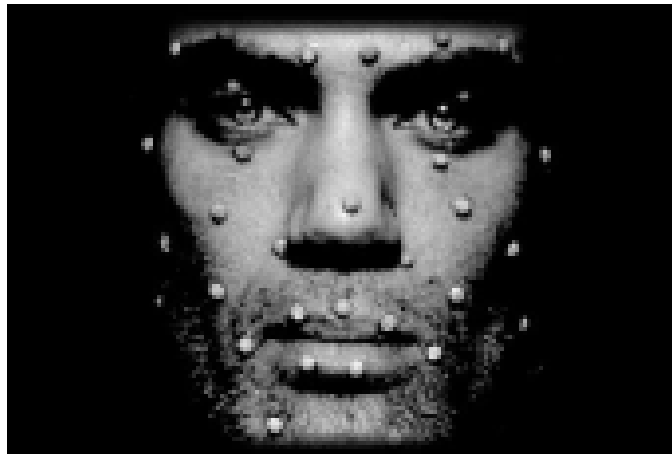


Figura 3. 6 Marcadores pasivos colocados en el rostro de un actor [26, 29].

- Indicadores activos: Los indicadores emiten su propia luz (LEDs), con lo cual se consigue aumentar la distancia a la que se puede desplazar el sujeto. La posición se determina iluminando, de manera sincrónica a las cámaras, uno o varios marcadores en cada instante de tiempo a una frecuencia muy alta. Este método permite observar el resultado en tiempo real, la utilización de un número ilimitado de sensores y permite trabajar bajo la luz natural. El tráfico de datos se reduce considerablemente ya que no se emplean cámaras de alta frecuencia.

A continuación se presenta una imagen de un mocap óptico de indicadores activos. (Figura 3.7)



Figura 3. 7 Traje con indicadores activos [29].

- Indicadores semi-pasivos: Los sistemas ópticos semipasivos utilizan cañones emisores de múltiples LEDs para codificar el espacio mediante la emisión de luz. Los indicadores son etiquetas fotosensibles que determinan no sólo su posición, sino también su orientación e incidencia de la iluminación, y se pueden colocar disimuladamente (por eso se les llama imperceptibles) en la ropa o en otros objetos.

Este sistema permite la captura bajo la luz natural y un número ilimitado de etiquetas indicadoras. Dado que no se utilizan, como en otros sistemas ópticos, cámaras de alta frecuencia, se reduce considerablemente el tráfico de datos generado. Cada indicador procesa su posición y ésta no tiene que calcularse a partir de imágenes. Estos sistemas son ideales para la captura de movimientos en tiempo real.

No requiere de trajes o equipos especiales, si bien en algunos sistemas se utilizan trajes especiales que facilitan la identificación de superficies.

- Sin marcadores: Se emplean algoritmos que permiten identificar las formas humanas mediante el análisis de fuentes de entrada de imágenes. Una desventaja de este sistema es la dificultad de capturar los movimientos sutiles, tales como los realizados con los dedos o la cara.

Con este tipo de sistema se lleva un traje cubierto con reflectores que se colocan en sus principales articulaciones; las cámaras están colocadas estratégicamente para realizar un seguimiento de los reflectores durante el movimiento. Cada cámara captura en 2D para cada reflector; el software del sistema se utiliza para analizar los datos capturados por todas las cámaras a manera de calcular las coordenadas en 3D. Estos sistemas son los más caros en el mercado debido a su naturaleza tecnológica de finales, tales como las cámaras de alta resolución y software propietario sofisticado. Las ventajas de utilizar estos sistemas son principalmente la velocidad de muestreo muy alta, que permite la captura de movimientos rápidos como las artes marciales, acrobacias y gimnasia, entre otros. La frecuencia de muestreo depende generalmente de las cámaras utilizadas, cuanto mayor sea la resolución, mayor será la frecuencia de muestreo. Muestras de hasta 200 fotogramas / segundo son alcanzables. Otra ventaja es la libertad que ofrecen estos sistemas, ya que, a diferencia de otros sistemas, no hay cables o espacio de trabajo limitado y los reflectores no representan restringir o efecto engorroso en el sujeto de estudio. Además, dado que los reflectores no ofrecen resistencia prácticamente no hay límite en el número utilizado en el proceso de captura, el cual permite un muy alto nivel teórico de detalle [25-27, 29].

Las desventajas de este método son la oclusión de algunos transmisores, especialmente en objetos pequeños como las manos o los objetos que interactúan estrechamente, un problema que puede poner en peligro todo el proceso si el dato ocluido es irrecuperable.

Un problema final que podemos encontrar es la falta de interactividad, ya que los datos recogidos deben ser procesados (a veces sufrir el filtrado y la reducción de ruido) antes de que sea utilizable. Esto nos da poca retroalimentación, un inconveniente cuando los costos de producción están involucrados, el estudio está reservado para sólo pocas horas y el tiempo es esencial [25-27, 29].

La figura 3.1 muestra un ejemplo de animación por medio de mocap óptico sin marcadores.

En la Tabla 3.5 se desglosan las ventajas y desventajas del mocap óptico.

Tabla 3. 5 Ventajas y desventajas del mocap óptico [26].	
Ventajas	Desventajas
Precisión	Propenso a interferir con la luz
Múltiples sujetos pueden ser capturados al mismo tiempo	Las rotaciones del cuerpo deben ser calculadas
Libertad relativa de movimiento	Un traje que puede resultar incomodo
La configuración de los marcadores puede cambiarse fácilmente	El hardware suele ser más caro que otros equipos de mocap
Se puede manejar a velocidades muy altas de movimiento	Se requiere de gran procesamiento
Un gran número de sensores pueden ser utilizados	

Este mocap fue utilizado para solo para capturar el movimiento en forma de imágenes y relacionar el inicio y fin del movimiento con los datos numéricos de aceleración.

Por lo que no se obtuvo datos de movimiento, velocidad ni aceleración a partir de este sistema de captura.

### 3.2.6 Otros tipos de sistemas de captura de movimiento:

Aunque el sistema de captura de movimiento mecánica, electromecánica y óptica son los métodos más utilizados en las producciones animadas que emplean esta tecnología, existen otros materiales igual de útiles para conseguir captar los movimientos y que con el paso del tiempo, se están mejorando e implantando progresivamente. A continuación se describe cada uno de ellos:

#### - Captura de movimiento acuático

Se trata de un sistema de captura que permite el seguimiento y registro de los movimientos directamente sin el uso de trajes. Jon Landau, productor de Avatar, afirma que están creando este sistema de captura de movimientos bajo el agua para dotar de mayor realismo a los personajes de la segunda entrega del film, ya que pueden “simular agua (creándola artificialmente por ordenador), pero no podemos simular la experiencia del actor con el agua como resistencia, así que vamos a capturar los movimientos dentro del agua” [25].

#### - Captura de movimiento con fibra óptica

Se emplea fijando sensores de fibra óptica flexibles que consiguen medir las rotaciones de las articulaciones. Estos sensores no miden la posición del actor en el escenario sino que el sistema calcula la posición de las extremidades del elemento que se

capture. En sus inicios, esta técnica se empleó en el diseño de sensores en guantes, pero actualmente se han creado trajes completos para poder capturar movimientos de cualquier parte del cuerpo [25, 26].

### - 3.3 Proceso de captura

El proceso que se utiliza comúnmente para el desarrollo de una base de datos o animación es [29]:

- Pre-producción
  - Preparación del lugar y de las personas, animales u objetos a grabar.
  - Considerar las acciones a realizar y la duración de estas.
  - Determinar los métodos de captura dependiendo de las necesidades y de los recursos.
- Calibración
  - La colocación del equipo en el lugar y en los sujetos de estudio.

Es conveniente poner una gran cantidad de marcadores / sensores para una mayor precisión, especialmente en el caso de los sistemas ópticos o magnéticos ya que en estos es habitual colocar uno a cada lado de la extremidad con el fin de calcular el punto medio como si estuviera el marcador en el interior del cuerpo (la situación ideal, la propia articulación).

En caso de un sistema mecánico es ajustar el esqueleto para el cuerpo del actor [26].

- Calibrar el equipo según los requerimientos de este.
- Captura
  - Se graban los movimientos del sujeto.
- Procesamiento de Datos
  - Solucionar problemas generados por la tecnología utilizada.
  - Retirar los ruidos producidos diferentes tipos (limpieza de datos).

- Post-Procesamiento de Datos

Dependerá del uso que se le dará a la información.

Si es para animación es necesario, aplicar sombras, efectos, etc. en el modelo emocionado. Para esta etapa final se utilizan comúnmente programas como Maya, por dar un ejemplo.

Y para análisis de los datos en forma numérica, se utiliza un procesamiento de la base de datos adquirida que depende del estudio que se desarrolle.

En la Figura 3.8 se observan la captura de datos por medio de un mocap óptico con marcadores pasivos, el procesamiento de datos y su post-procesamiento para animación.

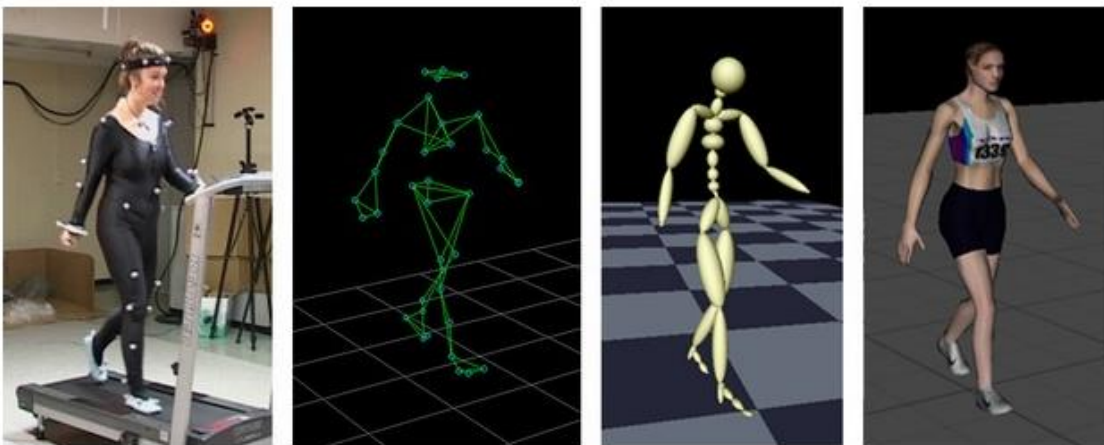
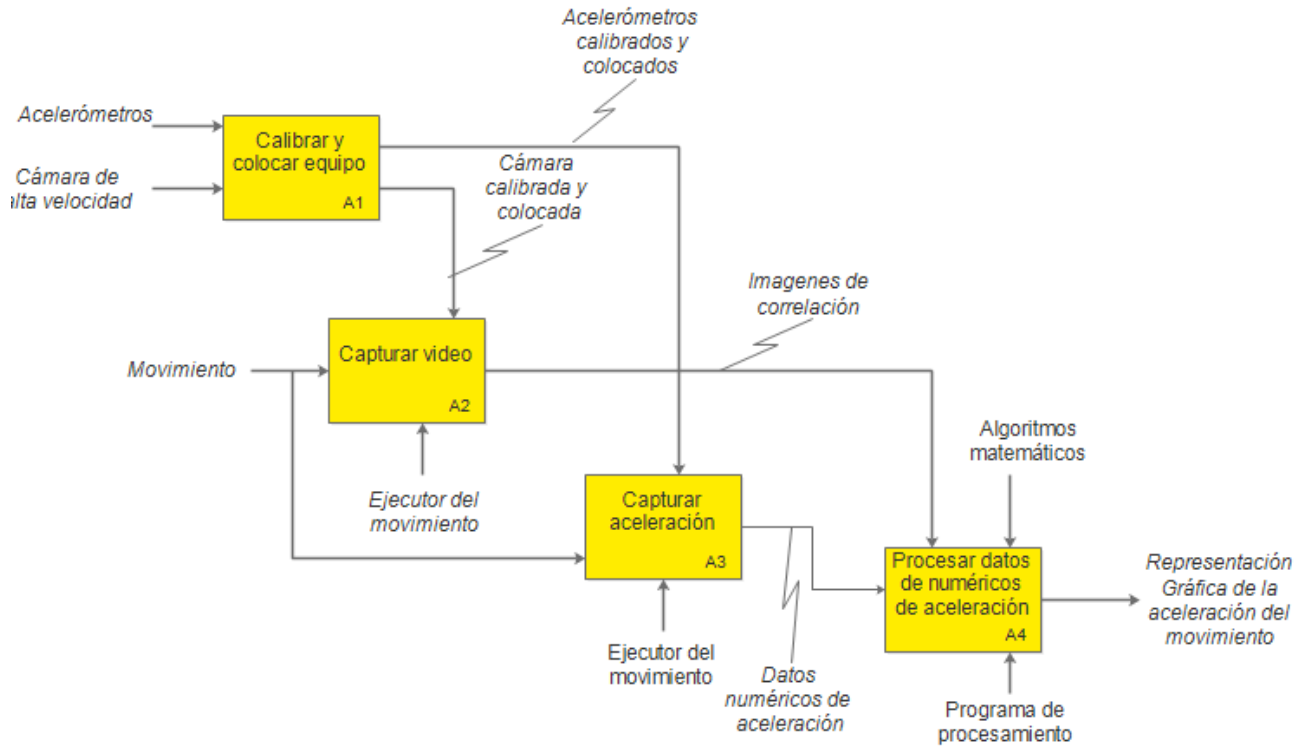


Figura 3. 8 Captura de datos, procesamiento y post-procesamiento [26].

El proceso de captura utilizado para este trabajo se detalla en el siguiente capítulo aunque presenta cierta similitud con el presentado hasta ahora.



# Capítulo IV. Metodología



*“Planear: preocuparse por encontrar el mejor método para lograr un resultado accidental” -- Ambrose Bierce*

## - 4.1 Introducción

En este capítulo se describe el proceso de estudio biomecánico en campesinos ejecutando el movimiento del escardado mediante IDEF0. Para ello se define a continuación.

En década de 1970, la fuerza aérea de los Estados Unidos desarrolló el programa ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) para incrementar la productividad a través de la aplicación sistemática de medios computarizados. ICAM identificó la necesidad de un mejor análisis y técnicas de comunicación para las personas implicadas en la mejora de la productividad [32].

Como resultado, ICAM desarrolló una serie de normas conocidas como IDEF (Integration Definition for Function Modeling o en español como Definición de Integración para la Modelización de Funciones [33]); estas normas consisten en una serie pasos y reglas que definen una metodología particular para la representación o modelado de las funciones organizacionales (actividades, procesos o sistemas) [33].

Esto conlleva a las siguientes variaciones [32]:

1. IDEF0, utilizado para producir un "modelo de función". Un modelo de función es una representación estructurada de las funciones, actividades o procesos dentro del sistema modelado o tema.
2. IDEF1, utilizado para producir un "modelo de información". Un modelo de información representa la estructura y semántica de la información dentro del sistema modelado o área temática.
3. IDEF2, utilizado para producir un "modelo de dinámica". Un modelo de dinámica representa la variable en el tiempo las características de comportamiento del sistema.

IDEF0 está basado en SADT® (Structured Analysis and Design Technique®, análisis estructurado y técnica de diseño), creado por Douglas T. Ross y SofTech; estas normas pueden ser usadas para modelar una gran variedad de procesos, definiendo de manera sistemática los requerimientos y especificaciones de cada función del proceso [32].

Están compuestos por una serie de diagramas jerárquicos que van incrementando el nivel de detalle para describir sus interfaces con el contexto de un sistema.

La técnica permite evaluar la situación con el fin de mejorarlo describiendo el flujo de información necesaria para apoyar a cada actividad.

Los principales objetivos que IDEF0 pretende realizar son [33]:

- Unificar la forma de representar funciones, procesos o sistemas.
- Proporcionar una comprensión completa y consistente de los procesos (actividades, acciones, funciones, operaciones) requeridas por un sistema, las relaciones funcionales y datos (información y objetos) que apoyan la integración de estos procesos.
- Proporcionar una técnica de modelado que es independiente del método o herramienta computacional que se pudiera utilizar. Es una técnica que se puede usar de manera conjunta con otros métodos similares y diversas herramientas.

Se caracteriza por ser [33]:

- Genérica (Para el análisis de sistemas con diferentes propósitos, alcance y complejidad).
- Rigurosa y precisa (Para la construcción de correctos y útiles modelos de negocio).
- Concisa (Para facilitar la comprensión, comunicación, consenso y validación).
- Comprensiva (Para que los diseñadores y dueños del negocio articulen sintéticamente lo que debe hacer el negocio).

Aplicaciones:

- En proyectos que requieren herramientas para el modelado integrado del negocio, para el análisis, desarrollo, reingeniería e integración de sus procesos, para la adquisición o desarrollo de un sistema integrado de información [33].
- En proyectos que requieren incorporar un enfoque de sistema o herramientas de modelamiento empresarial, con el componente de análisis de los procesos de negocio [33].
- Para el modelado de procesos y herramientas requeridas para el diseño y/o manufactura de algún producto [34].

IDEF0 consiste en articular una serie de diagramas jerárquicos junto con textos y referencias cruzadas entre ambos, que se representan mediante rectángulos llamados cajas y flechas (Figura 4.1) [32].

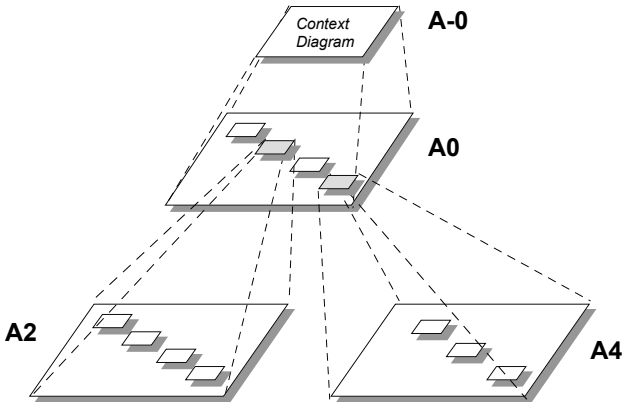


Figura 4. 1 Diagrama IDEF0 y su jerarquía [35].

Finalmente podemos decir que IDEF0 se compone por una sucesión de nodos (cuadros) que relacionados entre sí definen un diagrama del algoritmo a describir. Partiendo de un diagrama simple (Figura 4.2) con la idea principal, a los diagramas de profundización (diagramas padre e hijos sucesivamente) que describen el proceso de una manera más detallada.

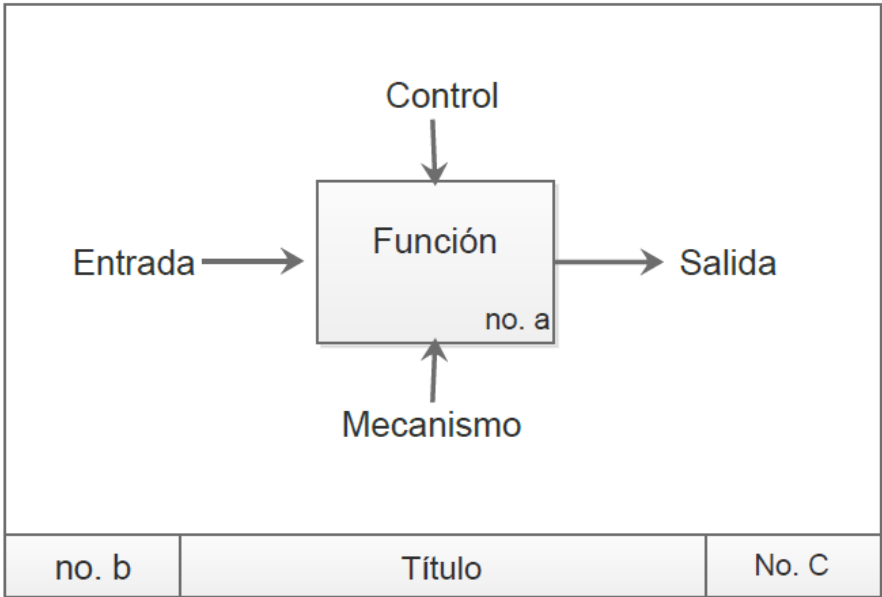


Figura 4. 2 Diagrama básico de IDEF0 [32, 33].

- 4.3 Modelo en IDEF0

Ya definido y descrito IDEF0, así como las bases teóricas en los capítulos anteriores, se procede a definir el estudio objeto de este trabajo.

Se analizaron trabajadores con experiencia en el escardado<sup>1</sup> con azadón y/u hoz, siendo dos capturas por individuo. Todos residen en el municipio de “Los Reyes de Juárez”, Puebla; dónde los trabajos de labranza y cosecha son para producir hortalizas tales como ajo, brócoli, calabaza, cebolla, coliflor, lechuga, pepino, jitomate, tomate, zanahoria, apio, cilantro, haba, espinacas, epazote, manzanilla, etc.

El escardado es una actividad necesaria para la producción de hortalizas y posee una posición que se puede describir visto desde un plano sagital<sup>2</sup> derecha y/o izquierda como (Figura 4.3):

- Flexión<sup>2</sup> de articulación sinovial gínglmo<sup>3</sup> femorotibial [36] derecha e izquierda de aproximadamente 45° a 80° manteniendo siempre una pierna delante de otra con una separación aproximada de 30 cm.
- Flexión de articulación sinovial enartrosis<sup>3</sup> coxofemoral [36] con ligera abducción<sup>1</sup>.
- Flexión de articulaciones gínglmo de los cuerpos vertebrales.
- Extensión<sup>1</sup> de articulación sínfisis<sup>3</sup> atlóidoaxoidea [36] alrededor de 10 a 15°
- Flexión de ambas articulaciones sinoviales enartrosis<sup>3</sup> escapulo humeral [36] derecha e izquierda.
- Flexión de ambas articulaciones sinovial gínglmo<sup>3</sup> humerocubital [36].

1-Cap. 1, Subcap. 1, pág.3

2-Cap. 2, Subcap. 2.1.1, pág.15, 16

3-Cap. 2, Subcap. 2.1.1, pág.15, 16



Figura 4. 2 Postura del movimiento del escardado como aro.

4.3.1 Diagrama A-0:

A continuación se presenta el diagrama padre (Figura 4.4):

En el diagrama A-0 se muestra el proceso general para adquirir las gráficas representativas de la aceleración en el escardado. Cabe destacar que estos diagramas pueden ser aplicados para cada captura de movimiento o en conjunto con todas las capturas; y la representación gráfica del movimiento está dada por cuatro grupos de datos debido a que son el número de acelerómetros colocados en los puntos de interés.

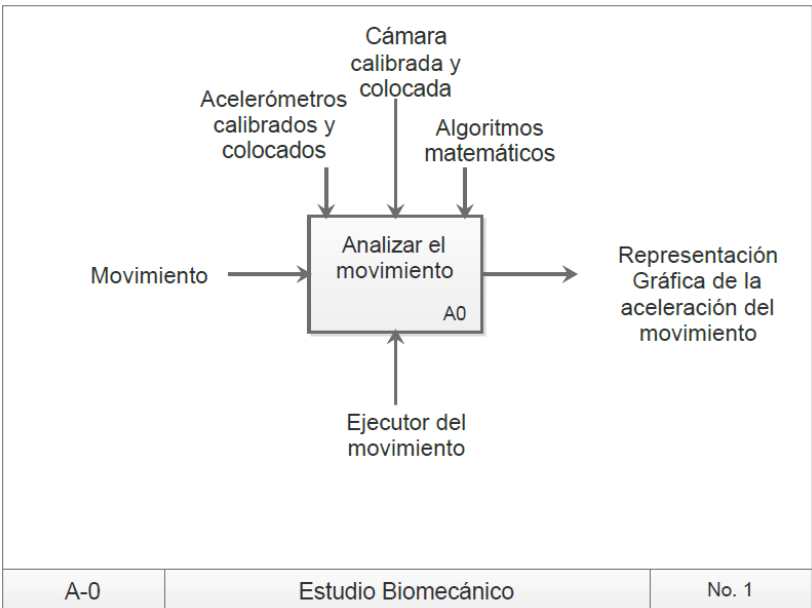


Figura 4. 3 Diagrama A-0 Estudio biomecánico.

4.3.2 Diagrama A0:

En el diagrama No. 2 (Figura 4.5) se desglosa la caja padre A0; este diagrama consiste en la calibración del sistema de captura de movimiento, la captura de datos numéricos e imágenes por medio de acelerómetros<sup>1</sup> y una cámara de alta velocidad mientras se ejecuta el movimiento del escardado. Una vez capturado, los datos numéricos de aceleración son ligados a las imágenes para procesarse a partir de un programa desarrollado en *Wolfram Mathematica 10.0*®[37], y finalmente adquirir la representación gráfica.

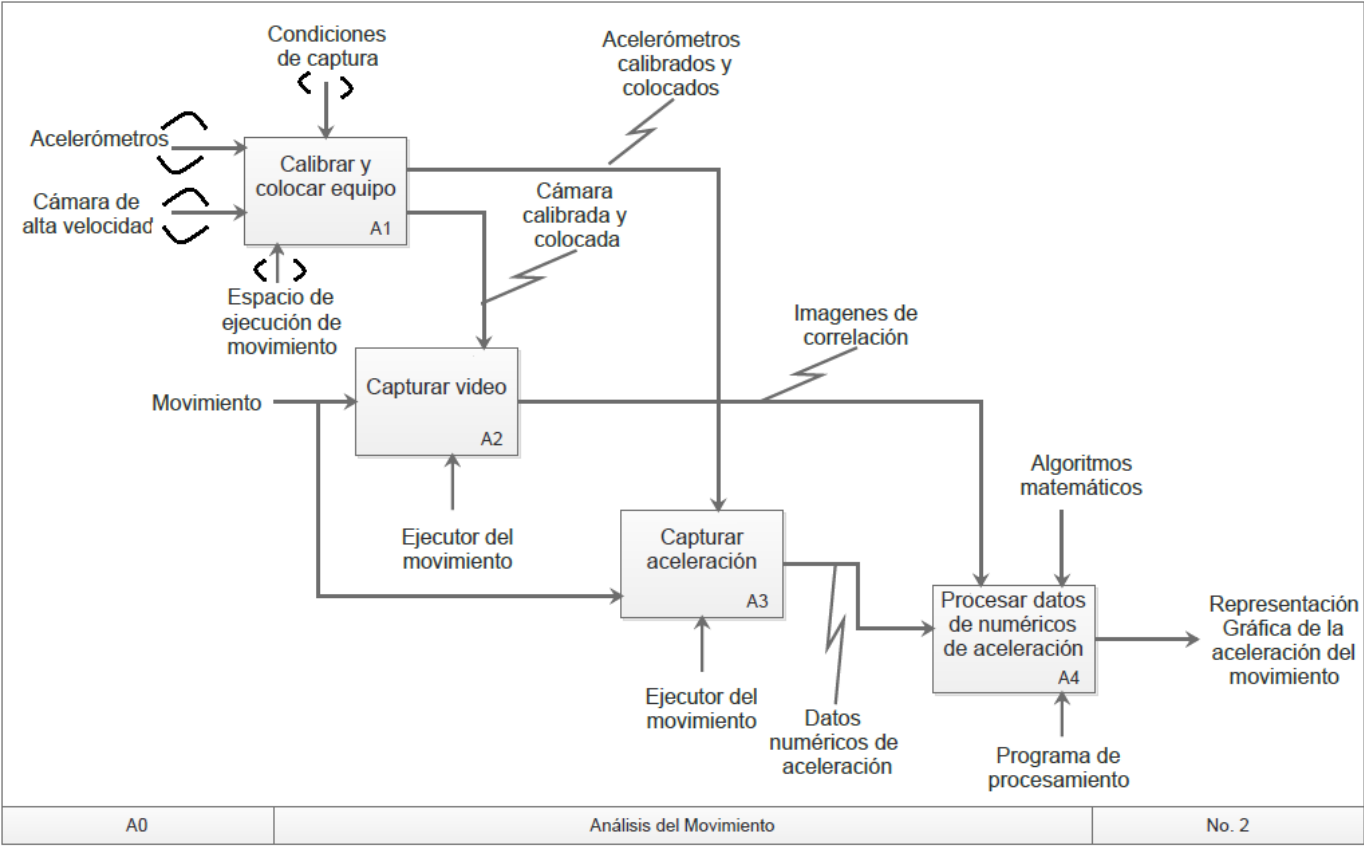


Figura 4. 4 diagrama A0 Análisis del movimiento.

A continuación se explica a detalle cada caja.

- A1 Calibrar y colocar equipo:

Esta función hace referencia a la calibración del sistema de captura de movimiento y su colocación (acelerómetros y cámara de alta velocidad).

El espacio de ejecución es aquel que posee el trabajador para desarrollar el movimiento (2.95 m. de largo por 2 m. de ancho por una altura de 2.5 m). Este espacio se determina por el enfoque que es capaz de dar la cámara y el espacio del surco, captando el cuerpo completo de quien ejecuta el escardado y dando el suficiente espacio para que se desarrolle el posicionamiento de la persona seguido del movimiento cíclico del escardado.

La condición de captura es recorrer 2.95 m. ejecutando el movimiento periódicamente.

Se usaron cuatro acelerómetros triaxiales calibrados a una frecuencia de 60 Hz. y una cobertura de señal máxima de 8 m. colocados en la parte del dorso, cuello y cabeza<sup>1</sup> sobre la dirección anterior, tal como se indica en la Figura 4.6.



Figura 4. 6 Distribución de acelerómetros en plano frontal vista anterior del trabajador agrícola.

- Centro cabeza
- En la cervical 7 (C7)
- En el centro de masa del tronco
- En la región lumbosacra (aproximadamente en la lumbar 5).



Estos puntos fueron elegidos para estudiar el comportamiento de la aceleración en la cabeza, el tronco y la cadera.

Todos los acelerómetros son calibrados en el espacio de ejecución del movimiento respecto a los ejes de la Figura 4.7. Más los acelerómetros obtienen los datos numéricos de aceleración relativamente a la posición (ángulos respecto a los ejes de la Figura 4.7) en la que se encuentren en un instante dado.

Las unidades de aceleración en que se capturan son  $g = 9.81m/s^2$ .

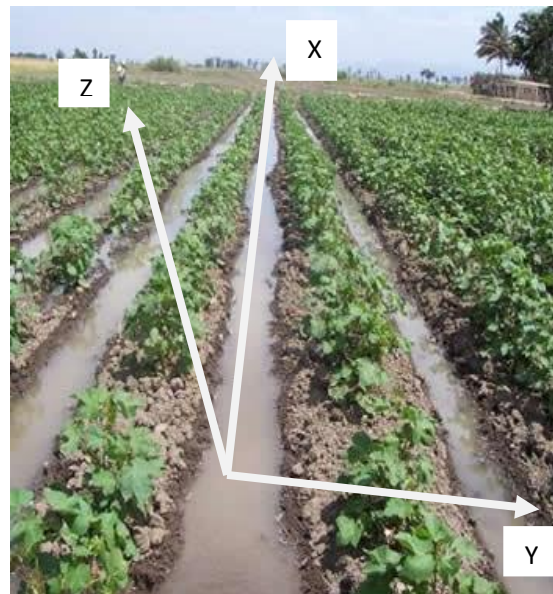


Figura 4. 7 Distribución de acelerómetros en plano frontal vista anterior del trabajador agrícola.

La cámara de alta velocidad utilizada es monocromática y se calibró a una velocidad de 37 FPS (Cuadros por segundo).

- A2 Capturar video:

El video se captura a partir del movimiento realizado por la persona en el espacio definido (Figura 4.8). Obteniendo así imágenes de correlación con los datos numéricos de aceleración obtenidos en la caja A3.

Se correlaciona las imágenes tomadas en un tiempo determinado de grabación con el valor de aceleración presentada en el mismo instante.



Figura 4. 8 Imagen capturada por cámara de alta velocidad monocromática.

- A3 Capturar aceleración:

La aceleración es capturada en el mismo tiempo que el video, con esto se obtiene los datos numéricos de aceleración presentados en tiempo [s]-aceleración [g].

Los cuales se someten al procesamiento para la obtención gráfica del movimiento (Caja A4).

#### 4.3.3 Diagrama A4:

En este diagrama hijo de la caja A4, se explica el procesamiento de datos para obtener la representación gráfica del movimiento escardado con azadón y/u hoz (Figura 4.9).

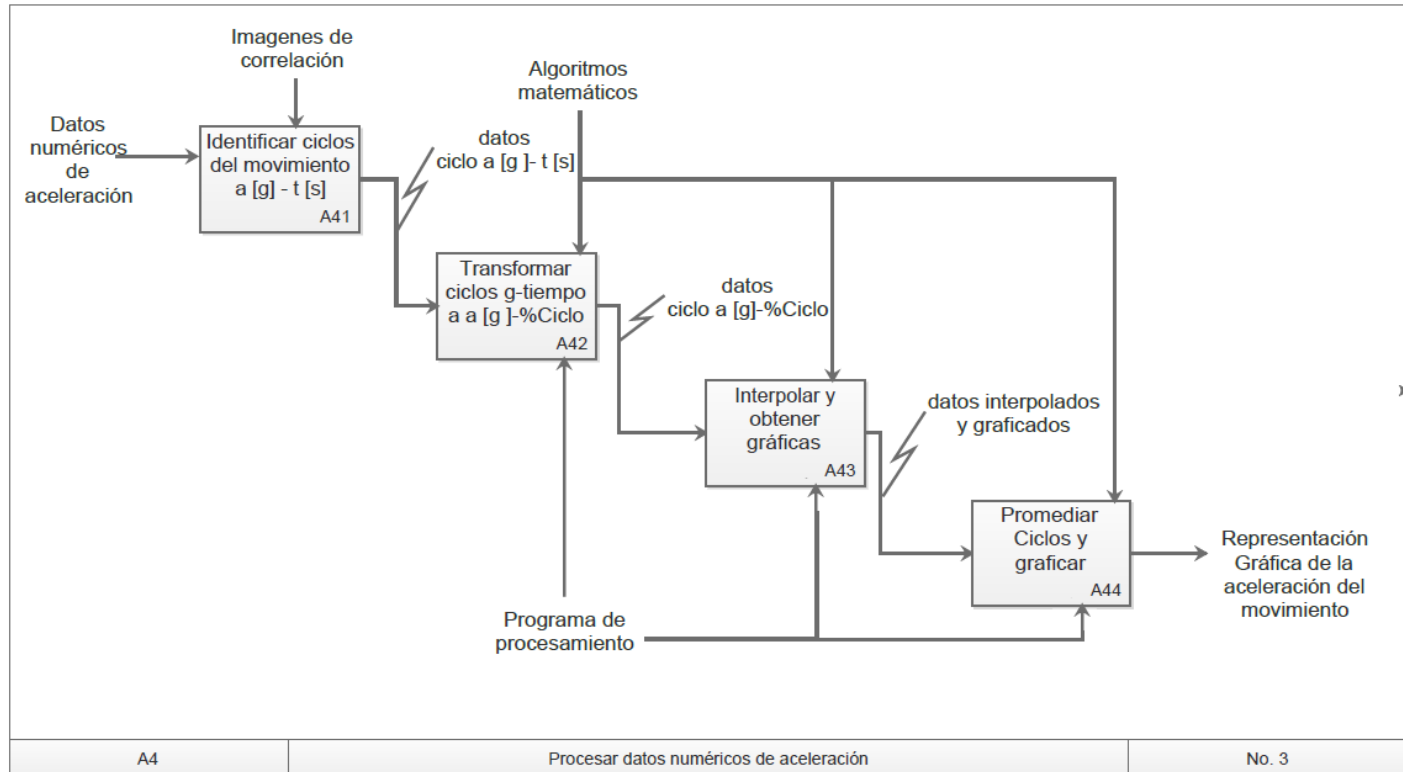


Figura 4. 9 Diagrama A4 Procesamiento de Datos.

- A41 Identificar ciclos del movimiento aceleración [g] – tiempo [s]:

Primeramente de manera visual se define el inicio y el fin de un ciclo para el escardado; este se determinó como (Figura 4.11):

- 1.- Se parte de la posición del escardado (ya descrita anteriormente).
- 2.- Se realizan flexiones y extensiones de las articulaciones vertebrales (variando el número de movimientos según el agricultor).
- 3.- Despegue del pie crecidamente posterior al cuerpo (inicio del paso).
- 4.- Aterrizaje del pie despegado quedando este como el mínimo posterior al cuerpo (fin del paso).

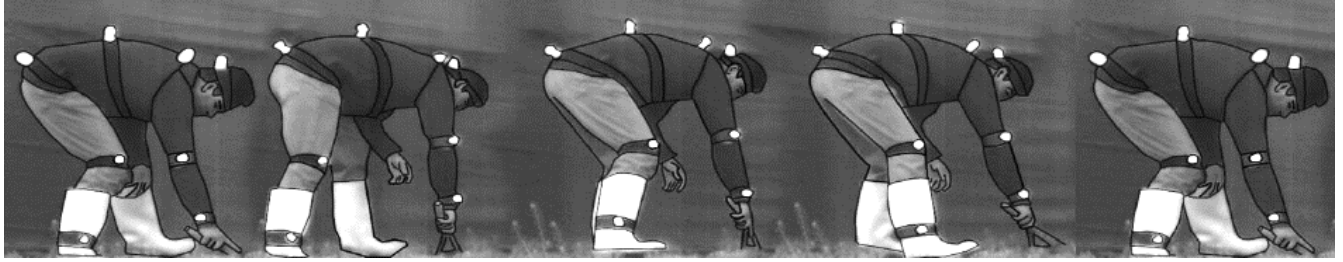


Figura 4. 10 Ciclo definido del escardado en sus cuatro periodos y su nuevo inicio [Imagen de desarrollo propio].

En el transcurso de los pasos anteriores, por medio de una circunducción<sup>1</sup> del brazo que sujeta la herramienta se ejecuta el escardado (Figura 4.10).

Ya definido el periodo del movimiento, capturado los datos numéricos e imágenes de correlación (video), se parte a contar el número de ciclos ejecutados en la prueba (la cual varía según la velocidad y la marcha del trabajador). Una vez contabilizados, estos se extraen en forma de datos numéricos (a [g] - t [s]) para los cuatro acelerómetros y se correlacionan con el tiempo del video.

En este proceso también se descartan los ciclos con características fuera del rango tales como datos de aceleración ocasionados por ruido, y ciclos en los cuales el trabajador agrícola realiza algún otro movimiento diferente, como puede ser un giro de cabeza inesperado, algún movimiento extra de una extremidad, etc.

Quedan así plasmados los periodos cíclicos en forma numérica (aceleración [g] – tiempo de grabación [s]) para cada dispositivo (Tabla 4.1); es decir si en una prueba con 2 ciclos del movimiento sin descartar alguno, en este punto se debería tener ocho ciclos a [g] – t [s], dos por cada acelerómetro.

- A42 Transformar los ciclos a [g] – t [s] a a [g] - %C:

Para poder comparar los valores de los ciclos resultantes en cada dispositivo, es necesario definir una escala diferente al tiempo de grabación [s], ya que cada periodo fue grabado en tiempo y con duración diferente (este último debido a que difícilmente se repite el mismo movimiento en el mismo lapso).

Se nombra a la nueva escala como porcentaje de ciclo [%C] que corresponde al lapso en el que se desarrolla el movimiento de manera porcentual.

El algoritmo matemático para pasar del tiempo [s] al porcentaje de ciclo [%C] queda definido como (Tabla 4.1).

$$\%C = \frac{T - T_{ic}}{T_{fc} - T_{ic}}$$

Donde  $T$  es el tiempo a transformar en %C,  $T_{ic}$  es el tiempo en el que inicia el ciclo, y  $T_{fc}$  es el tiempo donde finaliza.

Cabe destacar que existe un número definido de ciclos para cada acelerómetro que dependen de la cantidad de pruebas, los movimientos del escardado capturados y los descartados en el proceso anterior.

- A43 Interpolación y obtener gráficas:

Los ciclos numéricos a-%C por acelerómetro obtenidos de la función anterior (caja A42) aún no pueden ser comparados entre sí, debido a que para cada dato de aceleración [g] le corresponde un dato de %C que difiere con el número de los otros periodos en común (los otros ciclos del movimiento por acelerómetro).

De esta manera se procede a interpolar los valores de cada ciclo para obtener la aceleración [g] en los mismos números %C.

Con la ayuda del programa desarrollado se realiza la interpolación segmentada para los valores de aceleración en cada periodo, manteniendo una unión de polinomios de grado tres delimitados en el dominio.

Esta suma de polinomios describe el comportamiento de la aceleración respecto al porcentaje del ciclo. Por lo que se evalúa para cada conjunto de datos con el fin de obtener los valores de aceleración respecto a los números enteros correspondientes en la serie de 0 al 100 de uno en uno del %C.

Ya obtenido los ciclos en forma de a [g]- %C abarcando del 0 al cien de uno en uno, se grafican los valores para ir visualizando el comportamiento de la aceleración en el escardado.

Por otro lado, como ejemplo de los procesos de las cajas A41, A42 y A43 se muestra en la Tabla 4.1 un ciclo identificado en valores del tiempo [s] y aceleración [g], el cual se procesa para transformarse en ciclo a [g]- %C, finalmente interpolado y evaluado en los valores de %C de 0 a 100 de diez en diez.

Tabla 4. 1 ejemplo de procesamiento de datos					
Ciclo identificado		Ciclo transformado		Ciclo interpolado	
T [s]	a [g]	%C	a [g]	%C	a [g]
2.716	0.7282584	0	0.728258	0	0.728258
2.733	0.71745329	11.3333	0.717453	10	0.723636
2.749	0.67530309	22	0.675303	20	0.678865
2.766	0.75726098	33.3333	0.757261	30	0.724593
2.783	0.88391465	44.6667	0.883915	40	0.838992
2.799	0.86736991	55.3333	0.86737	50	0.885523
2.816	0.8208053	66.6667	0.820805	60	0.845099
2.833	0.86489732	78	0.864897	70	0.823798
2.849	1.00050378	88.6667	1.0005	80	0.888869
2.866	1.0468973	100	1.0469	90	1.01499
				100	1.0469

- A44 Promediar ciclos y graficar:

El siguiente paso es promediar y obtener la desviación estándar de los ciclos por acelerómetro, calculando los datos que recaen en el mismo número de porcentaje de ciclo [%C]. Después se grafican los resultados obtenidos.

De esta manera se obtiene una representación gráfica y numérica de la aceleración con su factor de desvío en la parte del cuerpo donde se colocó el dispositivo de captura, siendo esta visualización apoyada por medidas antropométricas que facilitan un análisis más completo de la persona.

#### 4.3.4 Programa de procesamiento:

Dicho programa consta de tres partes: función “Ciclo”, función “graf” y “cálculo de promedio, desviación estándar y gráfico representativo”.

Cabe mencionar que cada compilación del programa corresponde al cálculo de la captura de un sólo acelerómetro.

A continuación se plasma y explica cada segmento:

- Función “Ciclo”:

```
Ciclo[a_, b_] := Module[{ A, Datos, f, C},
  A = Import["C:\\Users\\diego arturo\\Documents\\Tesis\\Escardado\\Ignacio\\ignacioR2.xlsx"][[
    1, All, All]];
  Datos = Table[{  $\frac{A[[i, a]] - A[[1, a]]}{A[[b, a]] - A[[1, a]]} * 100, A[[i, a + 1]]$ }, {i, b}];
  f = Interpolation[Datos, InterpolationOrder -> 3];
  C = TableForm[Table[{x, f[x]}, {x, 0, 100}]]
```

```
]
```

```
cl = Ciclo[1, 57]
```

Figura 4. 5 Función Ciclo correspondiente al procesamiento de datos con su respectivo llamado.

Al identificar los ciclos en los acelerómetros, estos son impresos en un documento con formato .xlsx (hoja de Excel) tal como se muestra en la Figura 4.12.

La función Ciclo es una llamada de comandos que corresponden primeramente a importar (mediante la función Import) los datos de un ciclo (aceleración y tiempo) correspondientes a las celdas de la hoja del documento con formato .xlsx; para posteriormente transformar los números de tiempo a %C. tal como se ve en la función “Table” mediante la operación ya mencionada en la caja A42, este desarrollo es por medio de arreglos definidos en la importación.

Determinado en el diagrama IDEF0 después corresponde a la interpolación del ciclo; el software donde se desarrolló el programa posee la facilidad de tener comandos matemáticos ya predispuestos para este tipo de desarrollos, por lo que se aprovecho la función “Interpolation” con especificación de orden 3 para desarrollar las interpolaciones (arreglo llamado Datos para el programa). Esta unión de polinomios delimitados se evalúa mediante la función “Table” en los valores de 0 al 100 de uno en uno.

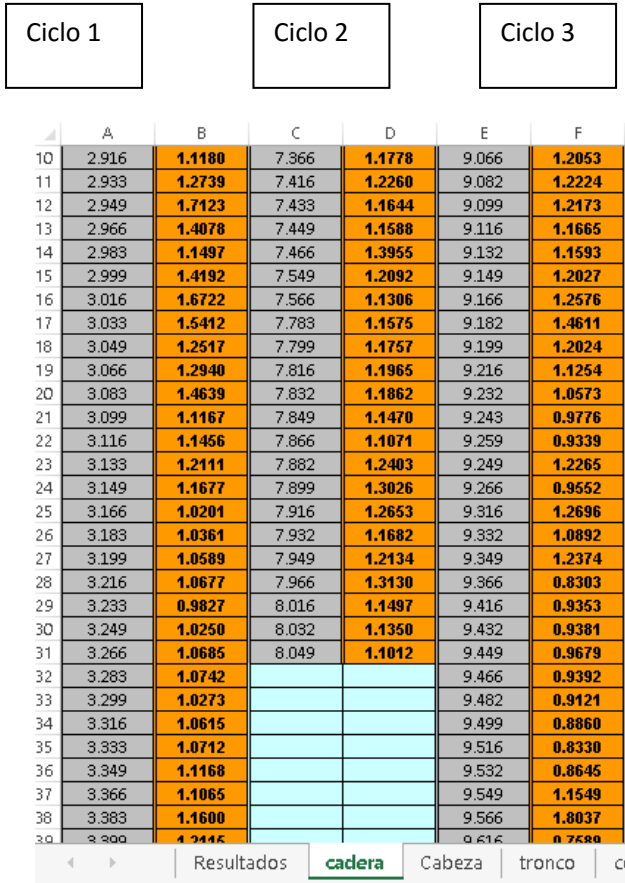


Figura 4. 12 Ciclos extraídos del acelerómetro correspondiente a la cadera [Imagen de desarrollo propio]

En la Figura 4.11 se puede ver el llamado de la función “Ciclo”; se debe especificar la localización de la columna de tiempo y su cantidad [columna de tiempo, número de datos]. Esta función arroja en forma de arreglo los datos del ciclo ya interpolado y evaluado en números enteros del 0 al 100 de %C.

En la Figura 4.11, a los resultados de la función “Ciclo” se le asigna el nombre de C1 para identificar que corresponde al ciclo 1 del acelerómetro en la cadera (como ejemplo), de esta manera se les fija un nombre a cada ciclo del dispositivo de captura para el siguiente proceso.



- Función “graf”:

```
graf[c_] := Module[{ lista, func, q, f, w, A},

  lista = Table[{c[[1, i, 1]], c[[1, i, 2]]}, {i, 101}];
  q = ListPlot[lista];
  f = Interpolation[lista, InterpolationOrder -> 3];
  w = Plot[f[x], {x, 0, 100}, AspectRatio -> 1, PlotStyle -> {Red}];
  A = Show[q, w, PlotRange -> {0, 2}]
]

graf[c1]
```

Figura 4. 13 Función “graf” y su respectivo llamado.

La función desarrollada como “graf” evalúa y gráfica punto a punto el arreglo obtenido del procesamiento “Ciclo” junto con la interpolación de los datos, esto para visualizar el comportamiento de la aceleración, descartándolo si este presenta mucho ruido (números fuera del parámetro de estudio que pueden ser ocasionados por una mala calibración del sistema de captura de movimiento, fallas en el mocap, interferencia en las señales debido a otros dispositivos electrónicos o movimientos capturados fuera del ciclo establecido).

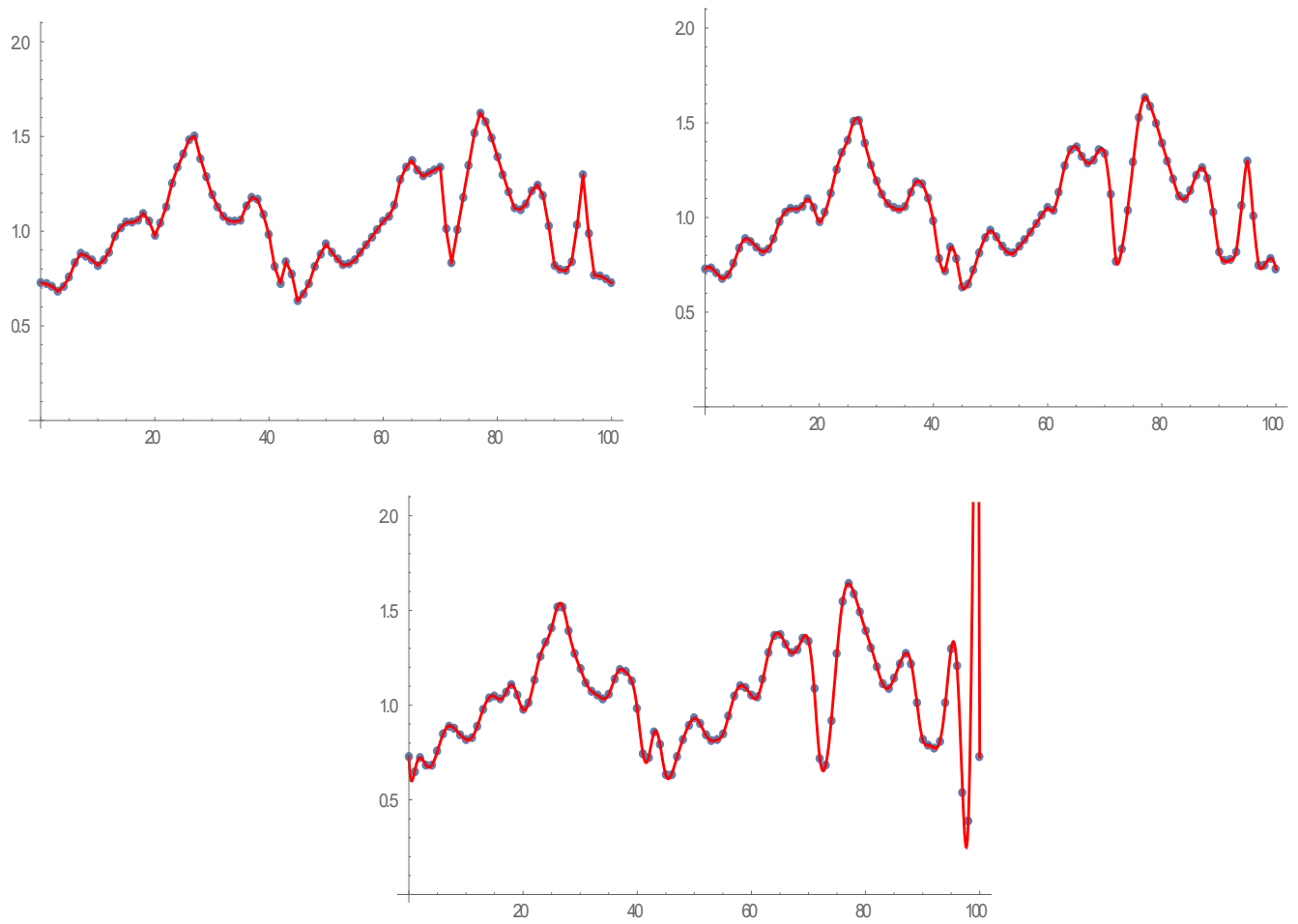


Figura 4. 14 Interpolación segmentada con polinomios de grado 1 y 3 arriba, abajo interpolación segmentada con polinomio de grado 10.

En la Figura 4.14 se puede observar el comportamiento de la interpolación, a mayor sea el grado de los polinomios unidos, mayores serán los valores intermedios entre datos obtenidos.

- Desarrollo de “cálculo de promedio, desviación estándar y grafica representativa”:

```

Print["\t", ciclos, "\t"]
cF = TableForm[Table[{i - 1, (c1[[1, i, 2]] + c2[[1, i, 2]] + c3[[1, i, 2]] + c4[[1, i, 2]] + c5[[1, i, 2]]) / 5}, {i, 101}]];

a = ListPlot[Table[c1[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Orange, PlotLegends → {Ciclo1}];
b = ListPlot[Table[c2[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Brown, PlotLegends → {Ciclo2}];
c = ListPlot[Table[c3[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Black, PlotLegends → {Ciclo3}];
d = ListPlot[Table[c4[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Blue, PlotLegends → {Ciclo4}];
e = ListPlot[Table[c5[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Green, PlotLegends → {Ciclo5}];

h = ListPlot[Table[cF[[1, i, 2]], {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Purple, PlotLegends → {PromedioCabeza}];
Show[a, b, c, d, e, h, PlotRange → {0, 3}, AxesLabel → {Style["%", Bold, 17, Blue], Style["g", Bold, 17, Blue]},
  AxesOrigin → {0, 0}, AxesStyle → Directive[20]]

DES =
TableForm[
  Table[
    
$$\sqrt{\frac{1}{5} \left( (c1[[1, i, 2]] - cF[[1, i, 2]])^2 + (c2[[1, i, 2]] - cF[[1, i, 2]])^2 + (c3[[1, i, 2]] - cF[[1, i, 2]])^2 + (c4[[1, i, 2]] - cF[[1, i, 2]])^2 + (c5[[1, i, 2]] - cF[[1, i, 2]])^2 \right)}$$
, {i, 101}]];
Print["\n", ciclo, "\t", promedio, "\t", y, "\t", desviacion, "\t", estandar, "\n", "\t", cF, "\t", DES]

i = ListPlot[Table[{cF[[1, i, 2]] - DES[[1, i]]}, {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Red, PlotStyle → Green,
  PlotLegends → {Desviación Estandar}];
j = ListPlot[Table[{cF[[1, i, 2]] + DES[[1, i]]}, {i, 101}], Joined → True, PlotStyle → Red];
Show[h, i, j, AxesLabel → {Style["%", Bold, 17, Blue], Style["g", Bold, 17, Blue]}, PlotRange → {0, 2},
  AxesOrigin → {0, 0}, AxesStyle → Directive[20]]

```

Figura 4. 15 Calculo del promedio y desviación estándar de la aceleración por acelerómetro.

En esta parte se calcula el promedio de la aceleración (llamado CF) para el mismo número %C de un solo acelerómetro. Haciendo llamar los resultados de los procesos anteriores con su nombre (C1, C2, C3, etc. Dependiendo del número de ciclos capturados y descartados).

Los ciclos resultados se grafican con diferentes colores para ir observando el comportamiento.

Posteriormente se procesan las aceleraciones de los ciclos para obtener así la desviación estándar (llamado DES).

Finalmente se plasman los valores de aceleración promedio correspondiente al dispositivo de captura con su respectiva desviación estándar y su representación gráfica.

#### 4. 4 Antropometría:

La antropometría no figura en el diagrama IDEF0 ya que no es necesaria para la representación gráfica del movimiento en forma de %C-a [g]; su importancia radica en correlacionar estos resultados del análisis del movimiento con los datos antropométricos para llevar a cabo una base de datos que pueda aportar información al comportamiento de la aceleración en la ejecución del movimiento por la persona.

La antropometría parte de la posición anatómica para medir los valores indicados en la cédula (Figura 4.16), y obtener así datos como el índice de masa corporal (IMC), índice cintura-cadera (ICC) y la complexión corpórea (CC) para poder realizar un mejor análisis relacionando estos datos con los resultados numéricos y gráficos del análisis con acelerometría y fotogrametría.

El IMC se define como la representación entre la relación de la masa corporal y la talla, se determina para determinar el grado de obesidad de una persona [38, 39].

$IMC = \frac{MC[Kg]}{T^2[m]}$  Donde MC es la masa corporal y T es la talla del individuo.

El ICC evalúa la distribución del tejido adiposo [39].

$$ICC = \frac{\text{circunferencia cintura [cm]}}{\text{circunferencia cadera [cm]}}$$

Y el IC se define por el tamaño y forma de los huesos, la cual es transmitida por herencia genética, entre mayor sea la complexión la musculatura será mayor, lo que implica un mayor peso sin que por ello tenga obesidad la persona [38-41].

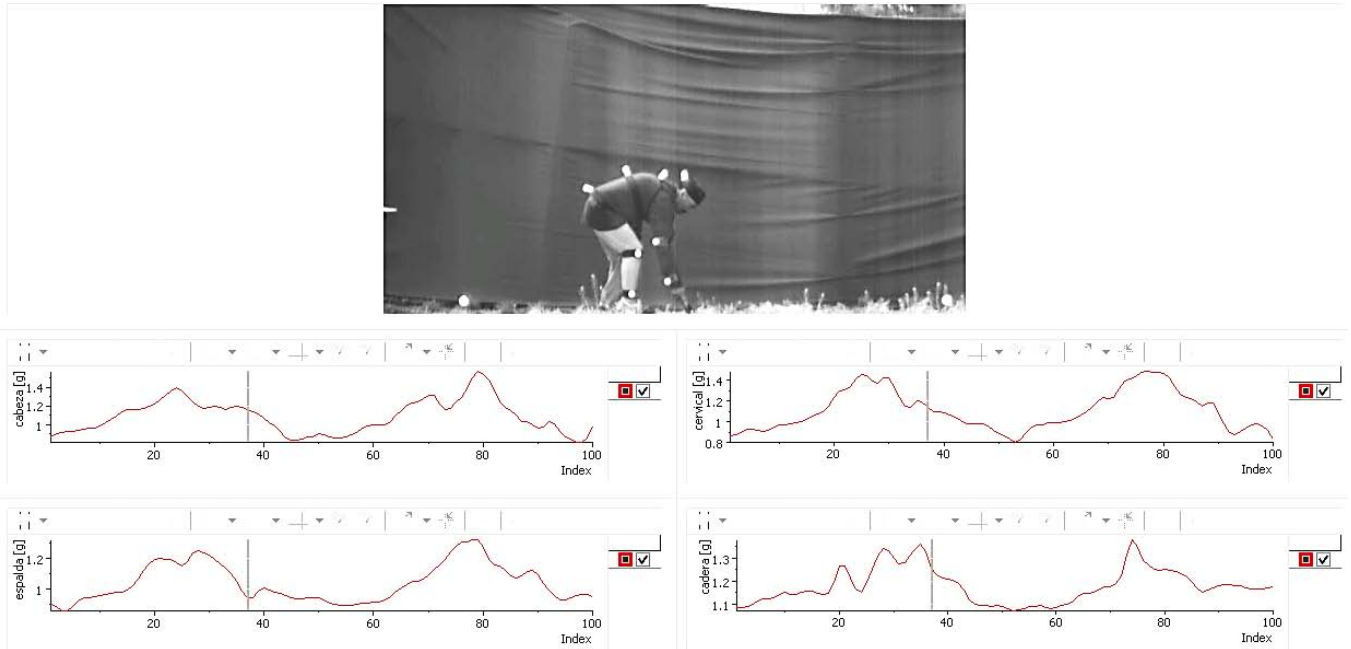
$$IC = \frac{\text{altura [cm]}}{\text{circunferencia de la muñeca [cm]}}$$

Cédula Antropométrica			
Nombre:			
Edad:		Sexo:	
Lugar de nacimiento:			
1- Peso:		8- Circunferencia de muñeca cm:	
2- Altura:		9- Pliegue tricipital mm:	
3- Altura del tronco o talla sentada			
4- Distancia sacro - rotula			
5- Altura rodilla suelo			
6- Circunferencia de la cadera en cm:			
7- Circunferencia de la cintura en cm:			

Figura 4. 16 Valores antropométricos medidos.

# Capítulo V. Resultados

---



*“Los números hablan por sí mismos en términos de todo lo que hemos hecho” – Paul Rand*

En este capítulo se presentan únicamente los resultados más representativos del estudio, que debido a su gran cuerpo se agregan de forma completa en los Apéndices.

- 5.1 Primera experimentación:

Como primera experimentación se hace referencia a las pruebas que dan inicio al estudio biomecánico del movimiento escardado; cabe mencionar que estos ensayos no están completamente basados en el modelo descrito del capítulo IV debido a que fueron ensayos que dieron pie al modelo por medio de los resultados obtenidos.

Se realizó el estudio a seis trabajadores agrícolas en el movimiento del escardado, tres hombres y tres mujeres. Realizando por persona la siguiente experimentación:

- Con los acelerómetros colocados en el dorso y cabeza (puntos ya especificados en el capítulo anterior)
- Con los dispositivos colocados en las articulaciones de las rodillas y tobillos
- Con los acelerómetros en las articulaciones de codos y muñecas.

Las grabaciones fueron a una frecuencia de 60 Hz utilizando cuatro acelerómetros triaxiales en cada captura, sin toma de video ni medidas antropométricas.

Los ensayos en articulaciones de las extremidades superiores e inferiores fueron descartados debido a su gran divergencia entre ciclos y aún más entre agricultores; también porque al ser grabaciones diferentes, los datos no pueden ser correlacionados en conjunto debido a los diferentes tiempos y movimientos en el que se ejecuta la actividad. Por lo tanto para poder evaluar todo el cuerpo se necesita un mayor número de dispositivos y la captura de todos ellos en la misma toma.

El grado de los polinomios para la interpolación segmentada fue de 5.

Se tomó video únicamente para grabar el movimiento más no como correlación de la captura con acelerómetros. Siendo la máxima captura a 30 FPS debido a que se trabajó con una versión prueba del software para la cámara de alta velocidad.

Se presenta en las tablas siguientes (Tabla 5.1 a Tabla 5.6) los valores más elevados de aceleración y de desviación estándar alcanzados de la primera experimentación.

Tabla 5. 1 Prueba Mujer 1 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla de elaboración propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max [g]	Desviación estándar max [%]
Cabeza	1.22927	28.82
Cervical	1.15087	12.98
Centro tronco	1.12567	12.97
Lumbar	1.12286	24.39

Tabla 5. 2 Prueba Hombre 1 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla de elaboración propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max [g]	Desviación estándar max [%]
Cabeza	1.2652	23.45
Cervical	1.2219	17.55
Centro tronco	1.1609	21.74
Lumbar	1.2062	35.78

Tabla 5. 3 Prueba Mujer 2 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max [g]	Desviación estándar max [%]
Cabeza	1.2913	25.86
Cervical	1.368	18.05
Centro tronco	1.2704	27.2
Lumbar	1.1081	24.64

Tabla 5. 4 Prueba Hombre 2 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max[g]	Desviación estándar max[%]
Cabeza	1.3708	22.54
Cervical	1.287	16.68
Centro tronco	1.3165	25.96
Lumbar	1.5254	45.67

Tabla 5. 5 Prueba Mujer 3 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max[g]	Desviación estándar max[%]
Cabeza	1.3288	13.03
Cervical	1.2021	102.2
Centro tronco	1.2571	30.25
Lumbar	---	-----

Tabla 5. 6 Prueba Hombre 3 Valores Máximos de aceleración y desviación estándar [Tabla propia]

Acelerómetro	Valor aceleración max [g]	Desviación estándar max[%]
Cabeza	1.47354	62.48
Cervical	1.30241	18.19
Centro tronco	1.23257	16.2958
Lumbar	1.11567	23.1375

La primera experimentación fue realizada con el fin de conocer las posibles complicaciones en la captura, procesamiento y evaluación de la aceleración en el escardado. Por lo que la muestra de estudio es reducida y no se consideraron medidas antropométricas ni captura de video.



A continuación se presentan dos de las 6 representaciones gráficas resultantes de la primera experimentación, en rojo se encuentra la aceleración promedio y en azul se delimita la desviación estándar.

Todas las gráficas obtenidas en la primera experimentación se encuentran en el Apéndice A. Las tablas de resultados numéricos no se mostraran debido a que esta primera experimentación es solo una prueba para la captura y procesamiento.

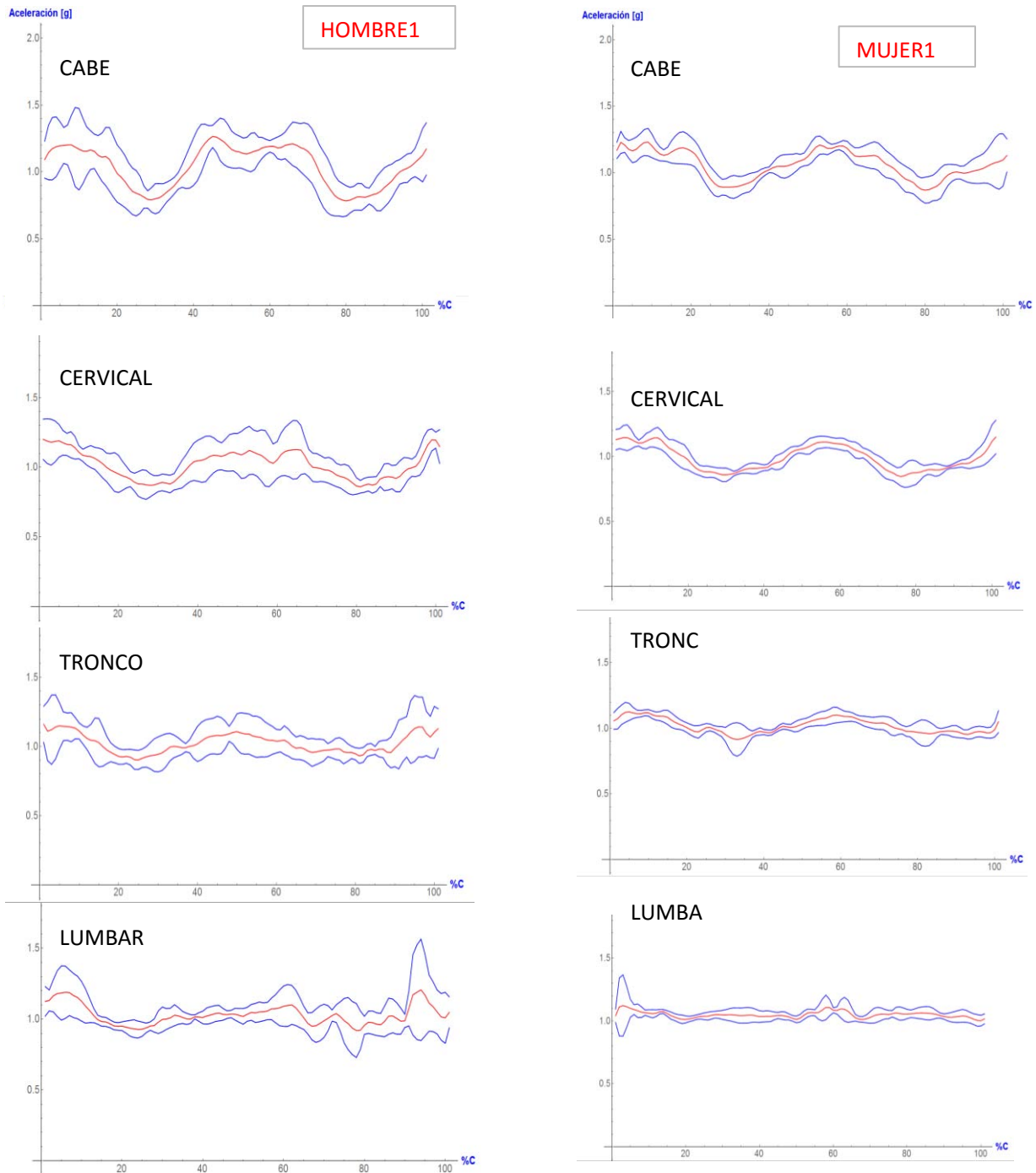


Figura 5. 1 Gráficas representativas de la aceleración para un hombre y una mujer.

- 5.2 Segunda experimentación:

Se estudiaron once personas en el movimiento del escardado con aro u hoz, siendo dos capturas de acelerómetros y video por persona. Esta segunda experimentación ya fue realizada acorde al modelo IDEFO del Capítulo IV, a manera de obtener un mayor control en la captura y procesamiento del movimiento. Sin embargo no se logró obtener resultados de todas las pruebas realizadas.

5.2.1 Antropometría:

En la tabla 5.7 se muestran los datos antropométricos capturados para cada individuo de estudio, y en la Tabla 5.8 se muestran los resultados IMC, ICC y CC.

Tabla 5. 5 Datos antropométricos capturados. [Tabla de elaboración propia]										
Individuo	Edad [años]	Sexo	Peso [Kg]	Altura [cm]	Altura tronco [cm]	Dist. Sacrorotula [cm]	Altura rodilla [cm]	Circ. Cadera [cm]	Circ. Cintura [cm]	Circ. Muñeca [cm]
1	53	M	74	161	92	54	46	106	98	17.5
2	39	M	90	176.8	92	61	57	109	107	17.5
3	64	M	85	162.6	86	58	50	112	113	23
4	64	M	67	150.9	80	50	45	101.5	99.5	17
5	38	M	70	169	89	59	52	85	101	16.5
6	29	M	62	171.8	94	58	59	95	84.5	21
7	34	F	48	150.6	75	48	47	88.5	74.5	14.5
8	28	M	72	165.5	89	51	51	85.5	98	16.3
9	44	M	68	160	84	51	49	92	92	17
10	55	M	65	152.3	83	54	51	95.5	95.5	22
11	56	M	75	159.4	86.4	51	46	99.5	98	19.5

Tabla 5. 6 Tabla de cálculos antropométricos. [Elaboración propia]						
Individuo	IMC		ICC		CC	
1	28.6	Obesidad G. 1	0.92	Normal	9.2	Grande
2	29.1	Obesidad G. 1	0.98	Androide	10.06	Mediana
3	32.4	Obesidad G. 2	1.01	Androide	7.04	Grande
4	29.8	Obesidad G. 1	0.98	Androide	8.82	Grande
5	24.5	Sobrepeso	1.19	Androide	10.24	Mediana
6	21.2	Sobrepeso	0.88	Androide	8.14	Grande
7	21.3	Sobrepeso	0.84	Normal	10.34	Mediana
8	26.3	Obesidad G. 1	1.15	Androide	10.12	Mediana
9	26.6	Obesidad G. 1	1	Androide	9.41	Grande
10	28.1	Obesidad G. 1	1	Androide	6.91	Grande
11	29.7	Obesidad G. 1	0.99	Androide	8.15	Grande

Donde el índice de cadera-cintura androide indica mayor concentración de grasa en la zona abdominal y menor en las otras partes del cuerpo. Es el de mayor riesgo para las enfermedades del corazón, por estar la grasa más cerca de órganos importantes (corazón, hígado, riñones, etc.) [41].

En cuanto al riesgo a la salud depende del grado de obesidad que en forma creciente se encuentra como: sobrepeso, obesidad grado 1, grado 2, grado 3 y grado 4. Siendo más propenso a problemas de diabetes, colesterol y de presión a mayor grado [39, 41].

### 5.2.2 Acelerometría y fotogrametría:

Se hicieron dos pruebas por trabajador, por lo que en total se obtuvieron 22 análisis, de las cuales catorce fueron descartados debido a fallas en la captura, movimientos no deseados o datos inconclusos.

Se consiguió la representación de la aceleración en forma integral y de forma unánime con siete individuos y ocho pruebas (Tabla 5.9), se considera la numeración de la Tabla 5.7 y Tabla 5.8.

Tabla 5. 7 Individuos de los cuales se obtuvo resultados.					
Individuo	Prueba	Edad [años]	Sexo	Peso [Kg]	Altura [m]
1	A	53	M	74	1.61
1	B	53	M	74	1.61
2	C	39	M	90	1.768
3	D	64	M	85	1.626
4	E	64	M	67	1.509
5	F	38	M	70	1.69
6	G	29	M	62	1.718
7	H	34	F	48	1.506

Todos los gráficos representativos de la aceleración en forma individual se encuentran en el Apéndice B y Apéndice C.

En la Figura 5.2 se puede apreciar que para la prueba E se lograron obtener 5 ciclos, los datos ya interpolados y transformados se promedian para los mismos valores de %C; obteniendo así la representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza del individuo 5 con su respectiva desviación estándar (Figura 5.3), ello es el procesamiento de datos en el diagrama IDEF0.

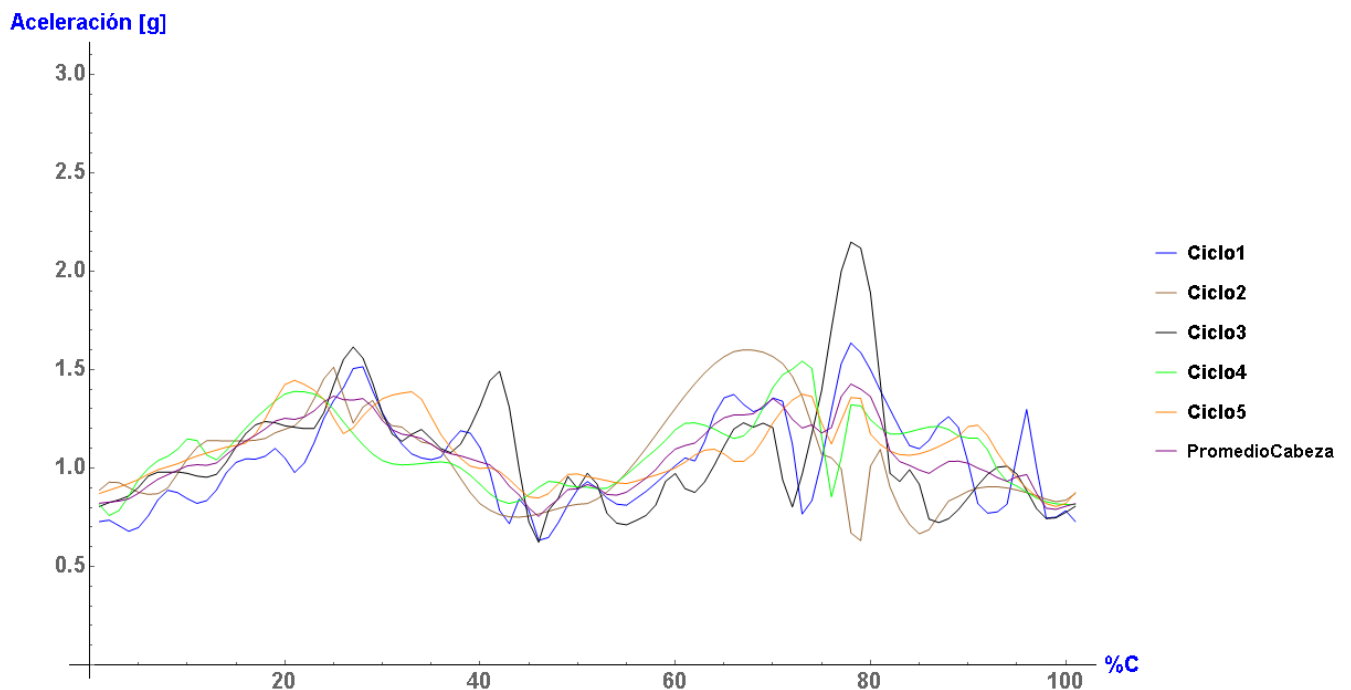


Figura 5. 2 Ciclos obtenidos para el acelerómetro de la cabeza en el individuo 5, prueba E

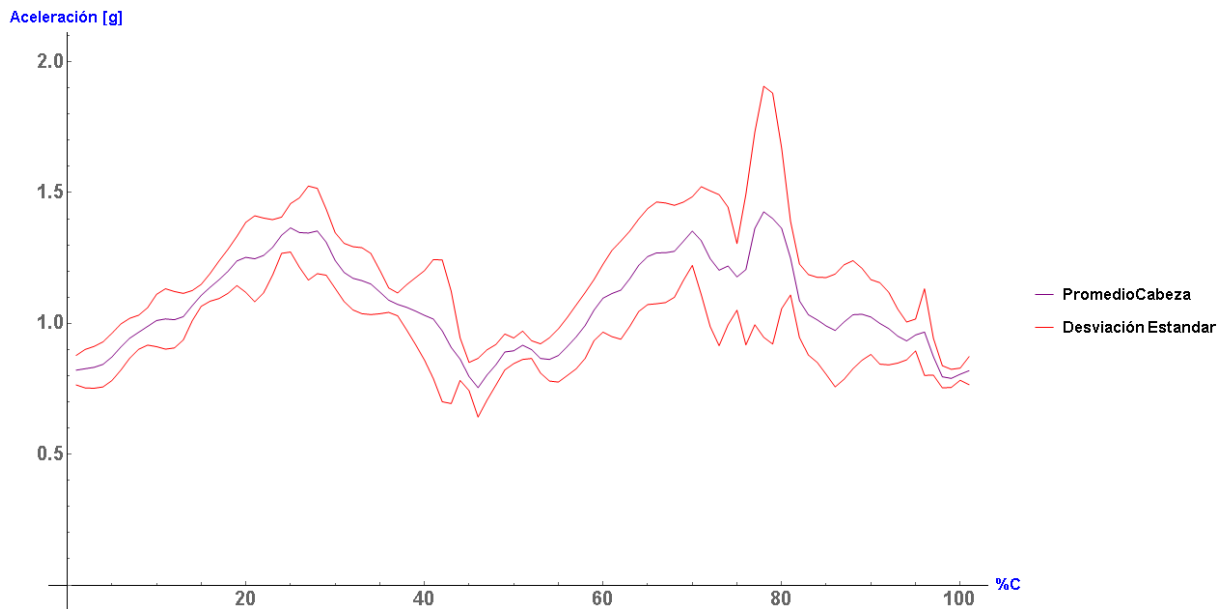


Figura 5. 3 Representación promedio de la aceleración del centro de la cabeza en el movimiento escardado para el individuo 5, prueba E

A continuación se presentan las gráficas de aceleración promedio [g] contra porcentaje de ciclo [%C] obtenidas por cada prueba y para todos los experimentos como un solo conjunto que han sido obtenidas mediante el diagrama IDEF0 (Apéndices A, B Y C). Se muestran los resultados seccionados por región para una mejor comparación entre pruebas.

- Centro Cabeza:

Se plasma en la Figura 5.2 los resultados para un solo acelerómetro (centro cabeza) por prueba obtenidos mediante la metodología IDEF0. Cada experimentación se sometió al procedimiento para obtener la aceleración promedio con su desviación estándar, siendo estos datos definidos por el número de ciclos capturados según la prueba.

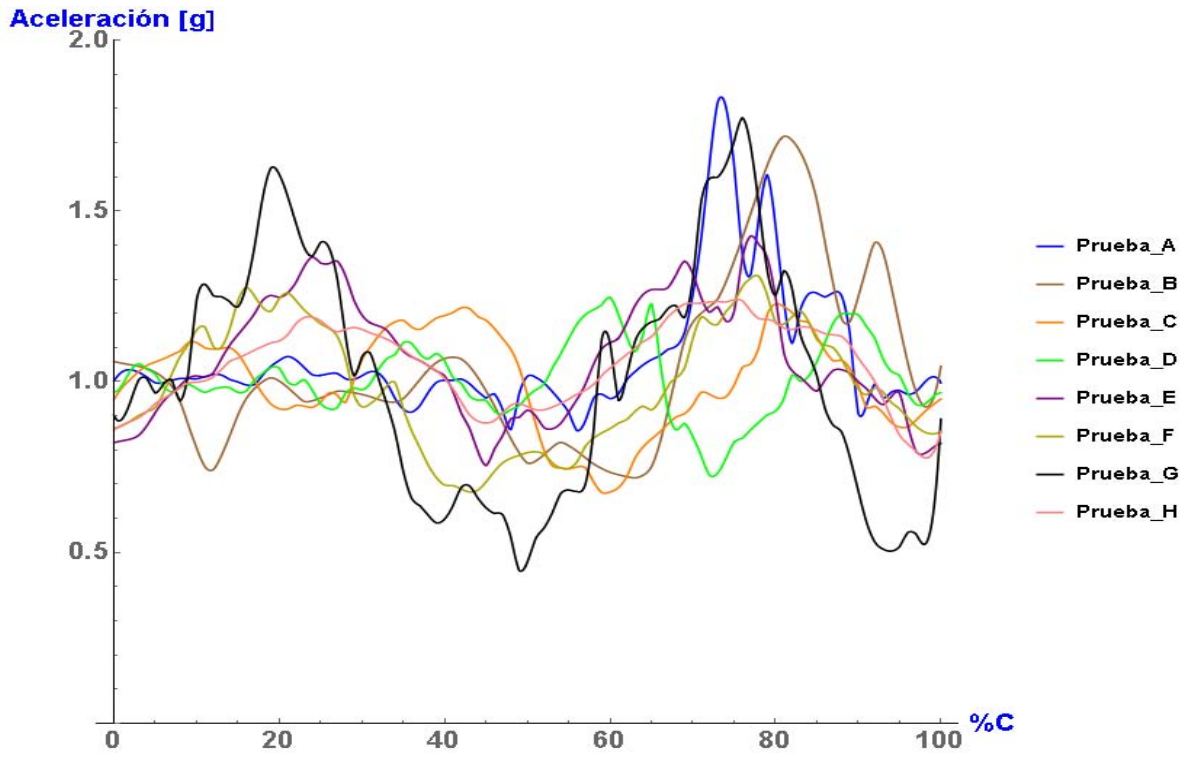


Figura 5. 4 Grafica donde se muestra el comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para la cabeza en las pruebas con resultados.

Se puede apreciar que la prueba A, B pertenecientes a la misma persona son de los valores más altos, junto con la prueba G. Y la prueba C y H son con los valores más lineales relativamente.

En la Figura 5.5 se muestra la representación gráfica de la aceleración aplicando el diagrama IDEF0 ya descrito anteriormente para todas las pruebas como si de una se tratase. Por lo que es importante mencionar que no es un “promedio” de la Figura 5.4, ya que cada resultado tiene un procesamiento que define el comportamiento promedio de la aceleración y de su desviación, estos se encuentran dados por los ciclos que definen esa experimentación. De modo que si fuese un promedio de los resultados individuales de cada prueba se perdería basta información, por lo que para la representación de la Figura 5.5 se considera todos los ciclos de las pruebas dadas en el acelerómetro ubicado en la cabeza.

Por lo que se puede afirmar que la Figura 5.5 es la representación gráfica de la aceleración en la cabeza del movimiento escardado para la población de estudio.

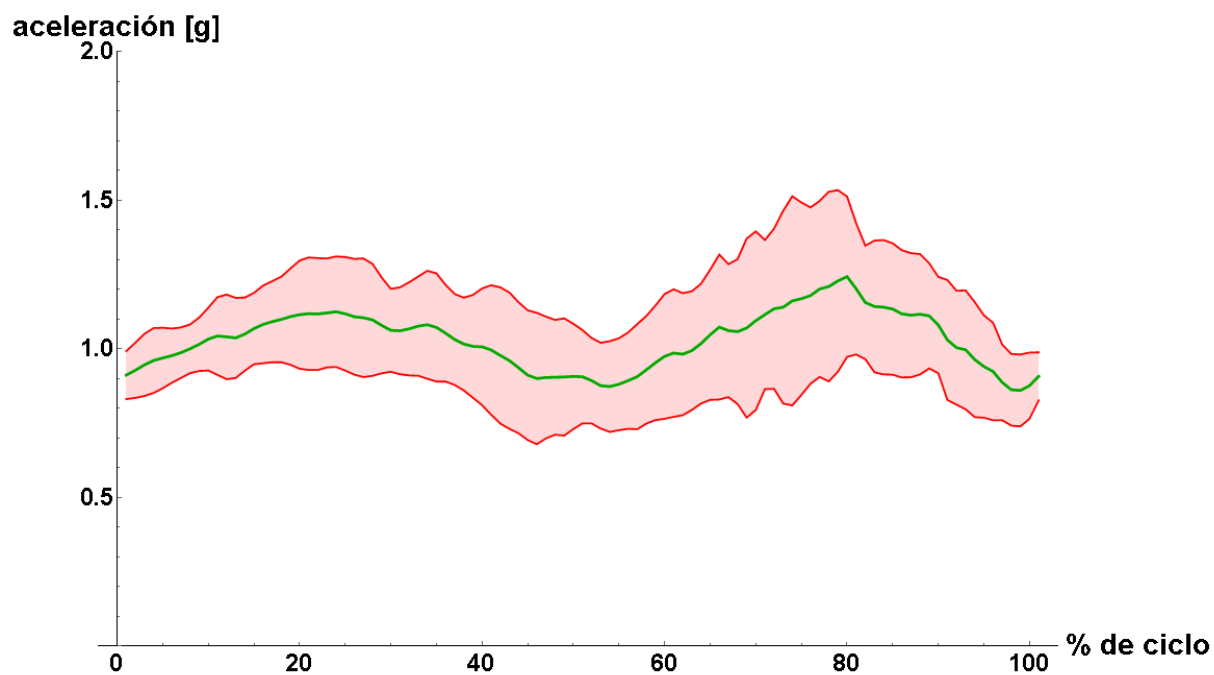


Figura 5. 5 Representación gráfica de la aceleración en la cabeza del movimiento escardado considerando 29 ciclos.

La Figura 5.5 muestra una aceleración máxima de 1.2421 [g] y una desviación estándar máxima de 35.17%

- En la cervical 7 (C7):

Como en el apartado anterior, se sitúa en la Figura 5.6 los resultados únicos de cada prueba de la cervical 7 y en la Figura 5.7 la representación gráfica global producto de todos los ciclos de los experimentos en la misma zona de estudio (C7).

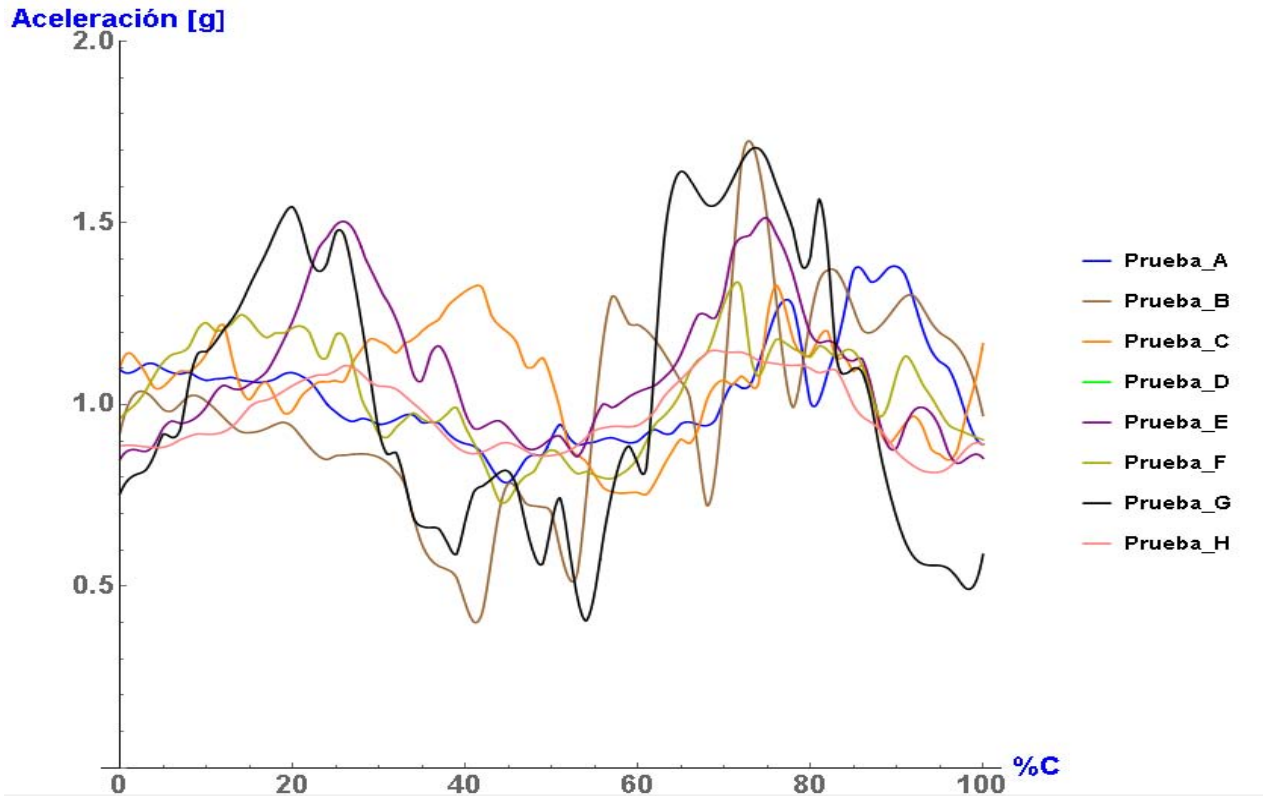


Figura 5. 6 Grafica donde se muestra el comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para la cervical en las pruebas con resultados.

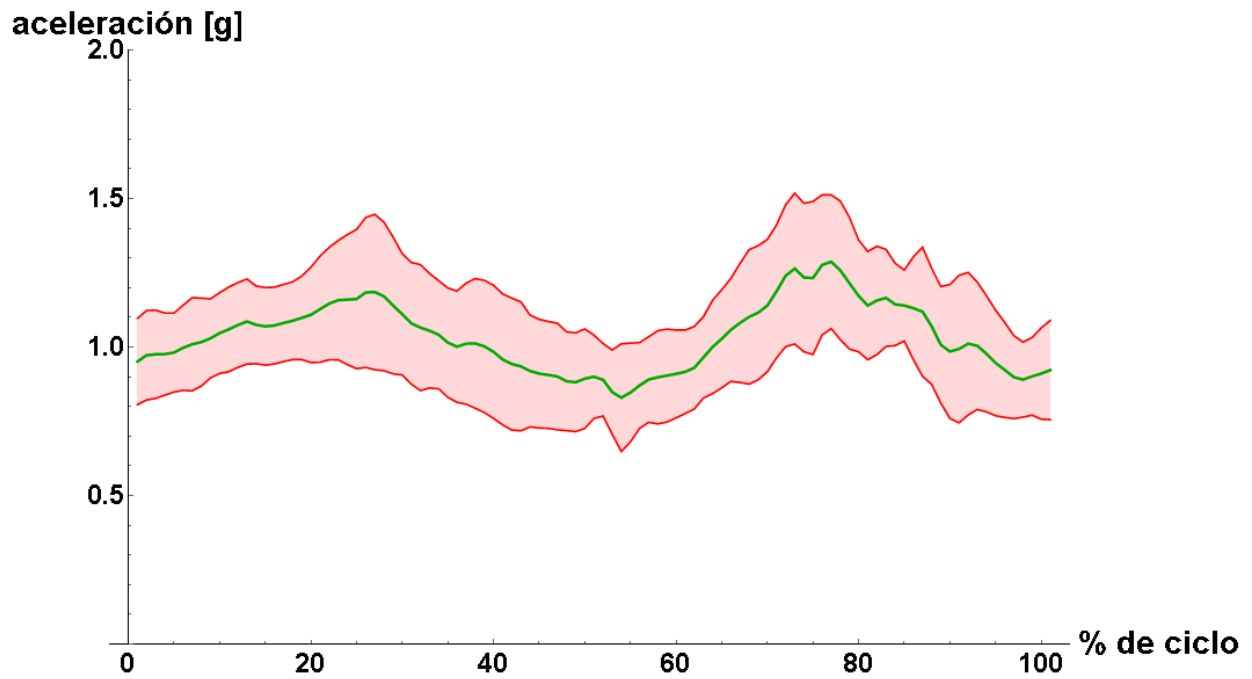


Figura 5. 7 Representación gráfica de la aceleración en la cervical 7 del movimiento escardado considerando 23 ciclos.



- Centro de masa del tronco:

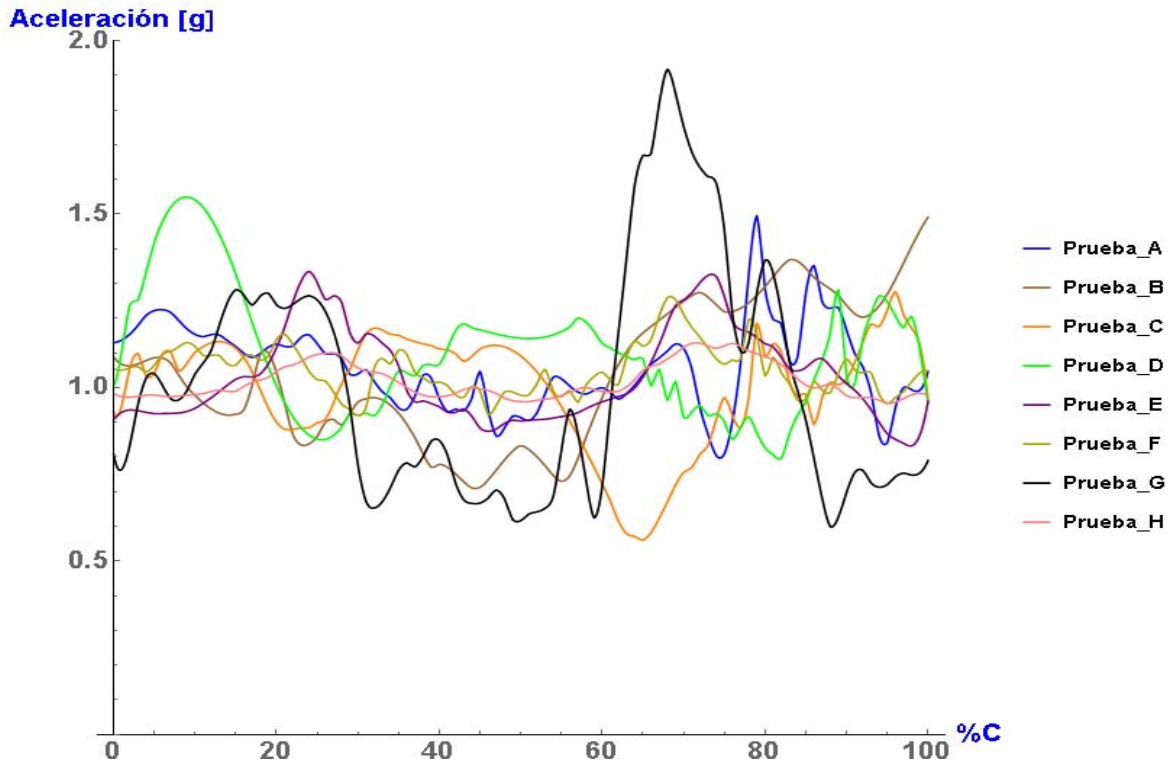


Figura 5. 8 Grafica donde se muestra el comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para el tronco en las pruebas con resultados.

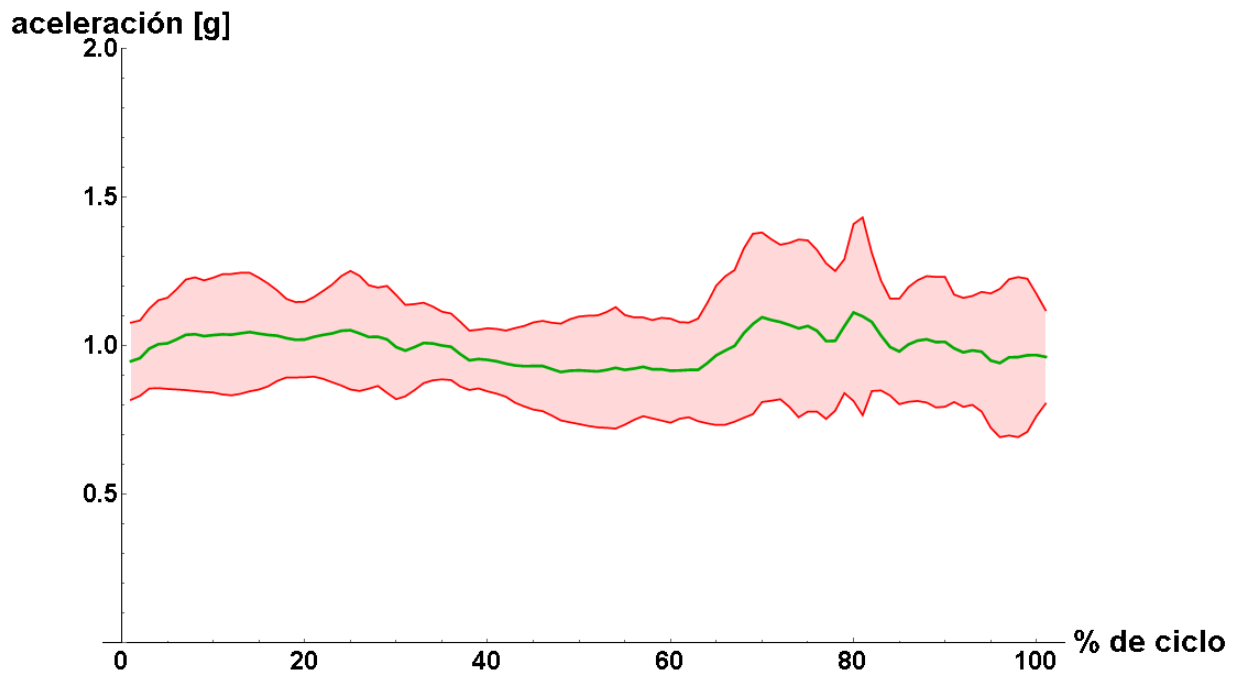


Figura 5. 9 Representación gráfica de la aceleración en el centro del tronco del movimiento escardado considerando 24 ciclos.

- Región lumbosacra (aproximadamente en la lumbar 5)

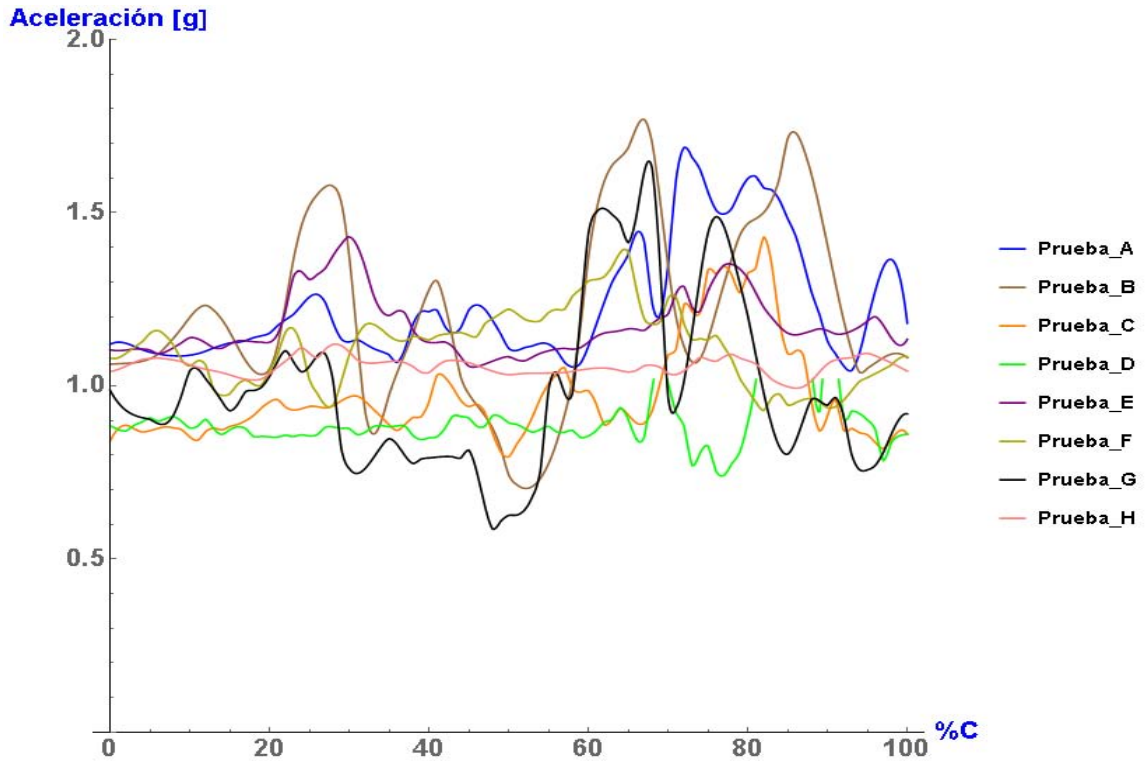


Figura 5. 10 Grafica donde se muestra el comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para la lumbar en las pruebas con resultados.

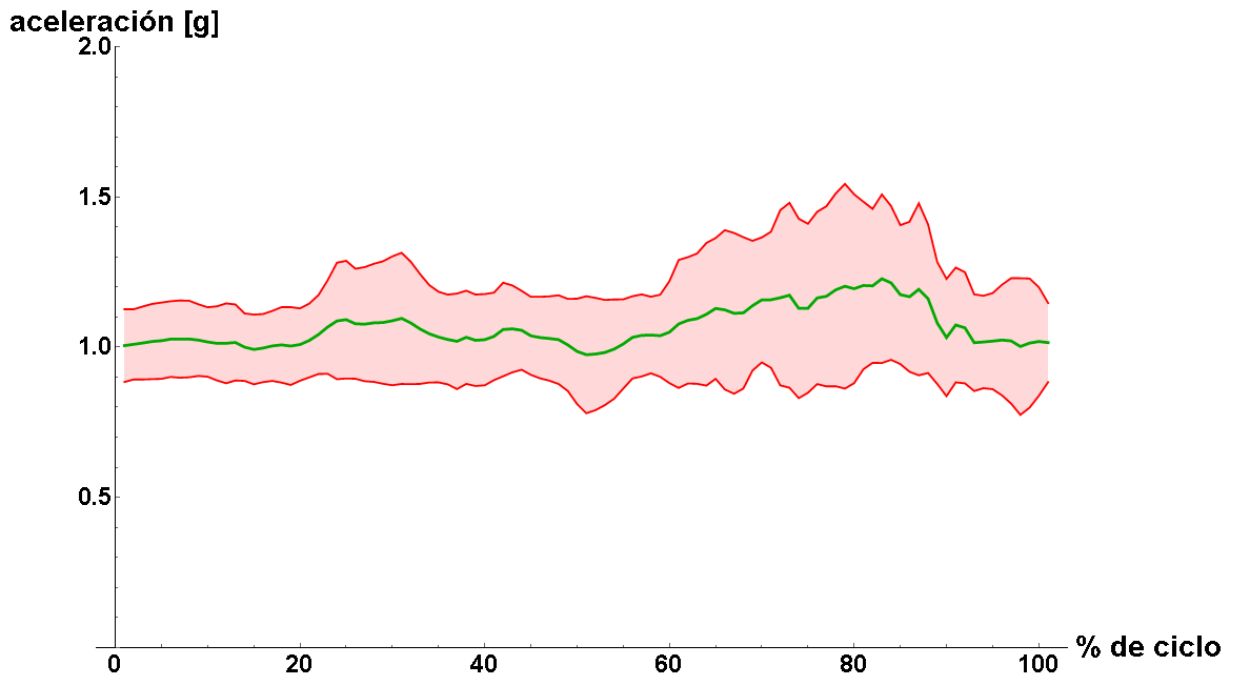


Figura 5. 11 Representación gráfica de la aceleración en la zona lumbosacra del movimiento escardado considerando 29 ciclos.

Estas son las representaciones finales de la aceleración, es importante tener en consideración los valores máximos alcanzados, ya que con estos se puede determinar parámetros que sirvan en el diseño de herramientas para la labor, técnicas de movimiento, etc. que manipulen las aceleraciones según las necesidades. Por eso en la Tabla 5.10 se presentan los datos más elevados para cada prueba. Y en la tabla 5.11 se plasma los números máximos alcanzados por la aceleración y la desviación estándar de las pruebas como conjunto (resultado unánime del movimiento escardado).

Tabla 5. 8 Aceleraciones máximas de todas las regiones para cada prueba [Tabla de desarrollo propio].								
Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
a. Cabeza [g]	1.81676	1.71813	1.22735	1.24733	1.4267	1.30851	1.77294	1.23994
a. Cervical [g]	1.38012	1.72436	1.32842	0	1.51371	1.32513	1.70520	1.14958
a. Tronco [g]	1.49514	1.49071	1.27621	1.54908	1.33486	1.25822	1.91738	1.12784
a. Lumbar[g]	1.68796	1.76913	1.42998	1.45037	1.43046	1.38578	1.62792	1.12002

Tabla 5. 9 Tabla de aceleraciones y desviación máximas alcanzadas en todas las pruebas como conjunto. [Tabla de desarrollo propio].				
	Cabeza	Cervical	Tronco	Lumbar
Aceleración máxima [g]	1.24217	1.28768	1.11238	1.22776
Desviación Estandar máxima [%]	35.1792	26.1603	33.2812	34.076

### 5.2.3 Entrevistas:

Una vez concluido los datos antropométricos, los resultados numéricos y los gráficos para cada prueba y el conjunto de estas, se optó por entrevistar a los individuos en estudio para conocer:

- 1- El tiempo laborando en la agricultura de hortalizas.
- 2- Actividades fuera de la agricultura.
- 3- Traumatismos Musculo-esqueléticos a lo largo de su vida.
- 4- Zona donde ha llegado a presentar dolores o molestias frecuentes.

- 5- Tiempo diario en el que desempeña el escardado.
- 6- Molestias durante o/y después de la labor.

Con el fin de relacionar los datos de aceleración, los datos antropométricos y las entrevistas para llegar a una mejor conclusión sobre los efectos del movimiento escardado sobre el cuerpo.

Este proceso del trabajo no está incluido en el diagrama IDEF0 puesto que la metodología fue utilizada únicamente para obtener la representación gráfica y numérica de la aceleración de forma individual y por grupo.

A continuación se numeran las respuestas del 1 al 6 según la lista anterior.

*Individuo 1:*

- 1- 41 años trabajando.
- 2- Sin otra actividad.
- 3- Sin traumatismos crónicos a lo largo de su vida.
- 4- Ha llegado a presentar molestias en muslo, rodilla, y espalda.
- 5- Por más de tres horas desempeña el movimiento diario.
- 6- Después de la jornada presenta fatiga física en forma de dolor muscular. Con recuperación al descanso.

*Individuo 2:*

- 1- 7 años trabajando.
- 2- Sin ninguna otra actividad.
- 3- Padece lumbalgia crónica debido a un accidente vehicular.
- 4- Ha llegado a presentar molestias en muslo, rodilla, cadera y espalda.
- 5- Por más de tres horas desempeña el movimiento diario.
- 6- Presenta dolores de espalda durante la jornada y después de esta.

*Individuo 3*

- 1- 8 años laborando como agricultor.
- 2- Por el momento se dedica a la agricultura más laboró como chofer.
- 3- Sin traumatismos crónicos a lo largo de su vida.
- 4- Ha llegado a presentar molestias en muslo, rodilla, cadera y espalda.

- 5- Por más de tres horas desempeña el movimiento diario.
- 6- Presenta fatiga muscular después de la jornada.

*Individuo 4*

- 1- 56 años laborando como agricultor.
- 2- Sin ninguna otra actividad.
- 3- Sin traumatismos crónicos a lo largo de su vida.
- 4- Ha llegado a presentar molestias en muslo, rodilla, cadera y espalda.
- 5- Por más de tres horas desempeña el movimiento diario.
- 6- Presenta fatiga muscular después de la jornada. Principalmente en la zona lumbar. Con recuperación al descanso.

*Individuo 5*

- 1- 28 años laborando como agricultor.
- 2- Sin ninguna otra actividad.
- 3- Sin traumatismos crónicos a lo largo de su vida.
- 4- Ha llegado a presentar molestias en rodilla, pierna y espalda.
- 5- Por más de tres horas desempeña el movimiento diario.
- 6- Presenta cansancio durante y después de la jornada. Con recuperación al reposar.

*Individuo 6*

Lleva 10 años laborando como agricultor.

La entrevista no se pudo concretar por lo que no se tienen datos.

*Individuo 7*

Lleva 10 años laborando como agricultor.

La entrevista no se pudo concretar por lo que no se tienen datos.

#### 5.2.4 Relación entre antropometría, aceleración y anomalías físicas.:

- *Individuo 1:* Al individuo 1 le corresponden las pruebas A y B, las cuales son muy parecidas en comportamiento con lo que se comprueba que los análisis son correctos.

Dicha persona posee gran experiencia en cuanto a la agricultura y el movimiento del escardado por lo que no presenta gran desviación estándar entre ciclos.

La aceleración máxima alcanzada por esta persona fue en el centro de la cabeza, seguido por la zona lumbosacra que relacionandola con el video se confirma mayor movimiento en estas regiones, realizando el escardado en forma serpentina siendo el eje de rotación el centro del tronco.

A pesar de su edad y la técnica empleada por muchos años, no presenta ninguna lesión músculo esquelética crónica; únicamente fatiga muscular al término de la jornada.

- *Individuo 2:* Dicha persona posee gran altura y mucho peso, más no padece un grado de obesidad muy alto. Tampoco tiene muchos años de experiencia en la agricultura y debido al padecimiento de una lumbalgia de origen ajeno al escardado, este trabajador ha desarrollado su técnica evitando movimientos bruscos y manteniendo una aceleración lo más lineal posible en toda las zonas de estudio. Es por esta razón que los datos que presenta son los menos elevados en cuanto a todos los individuos masculinos.

Su eficiencia de trabajo es baja a comparación de los demás agricultores incluso con la técnica que emplea para no lesionarse, esto debido a su padecimiento. A pesar de que sus índices no son tan elevados, sería prudente que bajara su índice de masa corporal y su índice de cadera-cintura para disminuir la carga sobre la zona lumbosacra, también se recomendaría realizara su labor mediante alguna otra herramienta de trabajo que permita una marcha más erguida.

- *Individuo 3:* Es uno de los trabajadores con mayor probabilidad de tener alguna lesión músculo esquelética ocasionada por el escardado. Es una persona mayor con obesidad de grado 2 (la más elevada entre los sujetos de estudio) y un índice de cadera-cintura androide, es decir, que posee mayor grasa en la zona abdominal. Las aceleraciones que presenta son medias entre los individuos analizados, siendo mayor sus datos en la zona lumbosacra y el centro del tronco; que afirmándolo con el video, en el escardado que realiza mueve crecidamente la cadera al dar el fin del ciclo (paso).

Más a pesar los ocho años de trabajo en la agricultura, no presenta lesiones.

- *Individuo 4:* El individuo 4 es el segundo más propenso a lesiones debido a que es una persona de edad avanzada con sobrepeso de grado 1 e índice de cintura-cadera androide. Este trabajador a pesar de no poseer un índice de masa como el individuo 3, las aceleraciones que alcanza son mayores. Al realizar el movimiento intenta mantener una postura erguida en el tronco más flexiona cerca de 70° el cuello; mantiene una aceleración uniforme en todo el tronco y cabeza. Es el que posee mayor tiempo laborando como agricultor más la técnica que utiliza no parece la apropiada para sus cervicales. A pesar de la posición que adquiere, del grado de obesidad y de la aceleración alcanzada no presenta lesiones crónicas en el sistema musculoesquelético.
- *Individuo 5:* Dicho trabajador posee solo un poco de sobrepeso con un índice de cintura-cadera androide, posee un ciclo medio en cuanto a las aceleraciones adquiridas y no presenta anomalía en su salud a pesar de que lleva ya casi 30 años realizando la agricultura de hortalizas.
- *Individuo 6:* Esta persona posee muy poco sobrepeso, es el trabajador más joven analizado pero no el que posee menor experiencia. Las aceleraciones alcanzadas son las máximas en el grupo de estudio debido a que las flexiones y extensiones de las articulaciones vertebrales son mucho más grandes a la de los demás agricultores, más haciendo una relación entre los individuos con un índice de masa corporal mucho mayor, de edad más avanzada y mayor tiempo de labor en el escardado, se puede pronosticar que hay muy bajas probabilidades de lesión en la región del tronco o/y cabeza.

La mayor aceleración alcanzada fue en el centro del tronco y en la cabeza. Esto podría deberse a la curvatura que adquiere en su posición, siendo la parte más elevada de su cuerpo el centro del tronco.

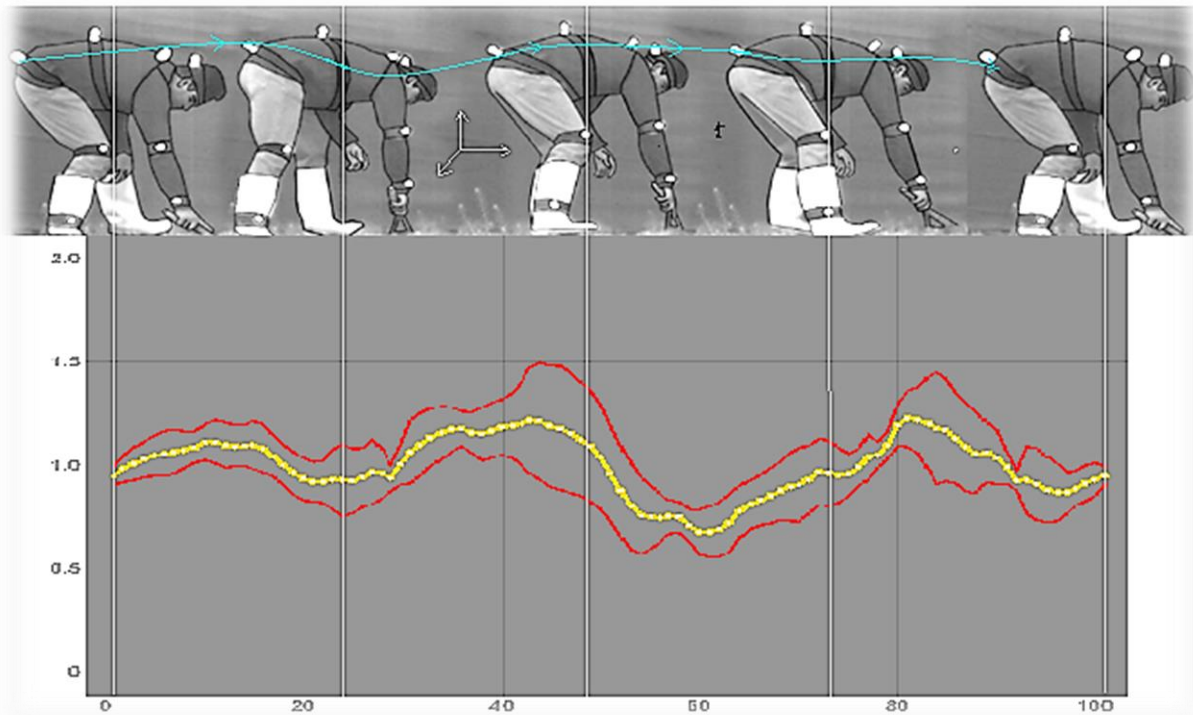
- *Individuo 7:* Para esta segunda experimentación solo se pudo conseguir analizar a una sola mujer. Esta presenta muy poco sobrepeso y un índice de cintura-cadera normal, es decir que distribuye las grasas en todo el cuerpo y no se acumulan con énfasis en la zona abdominal. A pesar de no ser el individuo con mayor experiencia presenta la menor desviación estándar adquirida para todas las pruebas, dando el lujo de decir que tiene ya su técnica bien definida.

En cuanto a las aceleraciones alcanzadas, fueron las más bajas de todos los estudios. Manteniendo una aceleración casi lineal en la zona lumbosacra y creciendo las variaciones en proporción a la distancia hasta llegar a la cabeza. Cabe mencionar que es la única persona que realizó el escardado tomando la herramienta a dos manos. Las demás personas utilizaban solo una, mientras el otro brazo tomaba apoyo de la rodilla para disminuir la carga del tronco al flexionar y extender.



## Capítulo VI. Conclusiones

---



*“La conclusión es que sabemos muy poco y sin embargo es asombroso lo mucho que conocemos. Y más asombroso todavía que un conocimiento tan pequeño pueda dar tanto poder”- Bertrand Arthur William Russell*

- 6.1 Conclusiones sobre primera experimentación:

Lo más recomendable para la captura del movimiento es realizar la grabación en campo, esto debido a que el agricultor que ejecuta el movimiento puede verse afectado por un entorno ajeno a lo que acostumbra y el movimiento por lo tanto se perturba. Por eso desde la primera experimentación se realizó el estudio en los campos de cultivo locales, pero al ser un ambiente no controlado, se produjeron muchos conflictos en la captura.

Los datos obtenidos de capturas diferentes no son correlacionales, debido a que todas las capturas son únicas ya que cada movimiento siempre difiere en todo ciclo y aún más en cada prueba. Esto se puede minimizar con la práctica del movimiento más nunca desaparecer.

Al analizar los datos se presentó la dificultad de identificar los ciclos, ya que no se tomó video como referencia al inicio del movimiento, por lo que se tuvo que capturar un movimiento simulado en laboratorio del escardado para identificar aproximadamente el comportamiento de la aceleración en un ciclo, y de ahí tomar los patrones similares en los datos capturados. Es por ello que los resultados numéricos de la primera experimentación son forzados a coincidir, por lo que estos resultados no son confiables, más las gráficas muestran de manera general cómo se comporta la aceleración en un ciclo del escardado.

Se compararon diferentes tipos de interpolación para obtener los números más cercanos posibles a la realidad y minimizar las pérdidas de información. Probando primeramente obtener un polinomio por ciclo para después evaluarlo y compararlo con los demás, más al ser aproximadamente de 40 a 100 datos por ciclo, se obtenía un polinomio de un grado muy elevado que en cierta forma cumplía con el requisito de obtener los valores capturados, pero con valores intermedios que se dispersaban considerablemente de la realidad. Por lo que se optó por la interpolación segmentada, la cual consiste en la unión de polinomios delimitados en su dominio, este tipo de interpolación lo ofrece el software empleado con el comando "Interpolation"; en esta función se experimentó la unión de polinomios de grado 2 a 10, ocurriendo lo anterior ya mencionado, a mayor el grado mayor la discrepancia y a menor grado sería mayor el comportamiento lineal lo cual también se aleja de la realidad. Finalmente se optó por el de grado 3, ya que es el que presenta las curvas más cercanas al movimiento real.

Por lo tanto esta primera experimentación dio paso a los algoritmos de captura y procesamiento utilizados para la metodología IDEF0 y con esto lograr obtener un mejor análisis del movimiento.

- 6.2 Conclusiones sobre segunda experimentación:

La técnica del escardado local presenta patrones similares entre los individuos estudiados, siendo estos movimientos aprendidos de generación en generación o de vista a compañeros de trabajo; existen pequeñas variables entre trabajadores que dependen más de la antropometría y comodidad que de la técnica aprendida.

Las aceleraciones alcanzadas no son capaces de producir alguna lesión crónica musculoesquelética en el área del tronco, cuello y/o cabeza, aun padeciendo cierto grado de obesidad o una edad avanzada; ya que la carga y el tiempo de recuperación es el suficiente para que el cuerpo humano se adapte a la labor; más no es recomendable si se padece alguna lesión en alguna de estas áreas.

Con los resultados obtenidos es posible optimizar la técnica del escardado para disminuir la aceleración y por consiguiente la carga que presenta la persona sobre los puntos de estudio, al igual que la producción de herramientas de fácil adquisición para el trabajador de baja producción agrícola.

También sería idóneo el estudio de acelerometría y fotogrametría secuencial para las extremidades inferiores, ya que todos los sujetos de estudio presentan algunas molestias en estas durante la jornada y después de ella.

- 6.3 Conclusiones finales:

La agricultura en general es necesaria para la producción de alimento y productos de consumo humano, por ello la importancia de optimizar la producción y de procurar el bienestar del agricultor, ya sea por medio de la automatización en la labor o de técnicas y herramientas que ayuden al trabajador de baja producción.

El objetivo de este trabajo fue conseguido, se analizó el movimiento del escardado en el tronco, cuello y cabeza mediante acelerometría y fotogrametría secuencial; obteniendo las aceleraciones de estos segmentos anatómicos para los agricultores estudiados. El inconveniente del análisis es que la población de estudio fue reducida por lo que los resultados presentes son buenos más no suficientes para definir de manera óptima el movimiento, los gráficos como las tablas finales describen solo la técnica local del escardado.

El diagrama en IDEF0 logró describir el análisis del movimiento del escardado en forma numérica y gráfica, el modelo parte del movimiento, captura y procesamiento a la representación numérica y gráfica de la aceleración en un punto anatómico.

Como futuros análisis que surgen a partir de este trabajo es conocer si el modelo realizado en IDEF0 cumple para caracterizar otros movimientos y el análisis cinemático de los miembros inferiores en el movimiento del escardado, ya que muchos de los agricultores presentan molestias durante y después de la jornada en las articulaciones de estas extremidades.

## Apéndice A

### Gráficos de primera experimentación

Se muestran los resultados gráficos de la primera experimentación, siendo en rojo la aceleración promedio, y en azul el área delimitada por la desviación estándar.

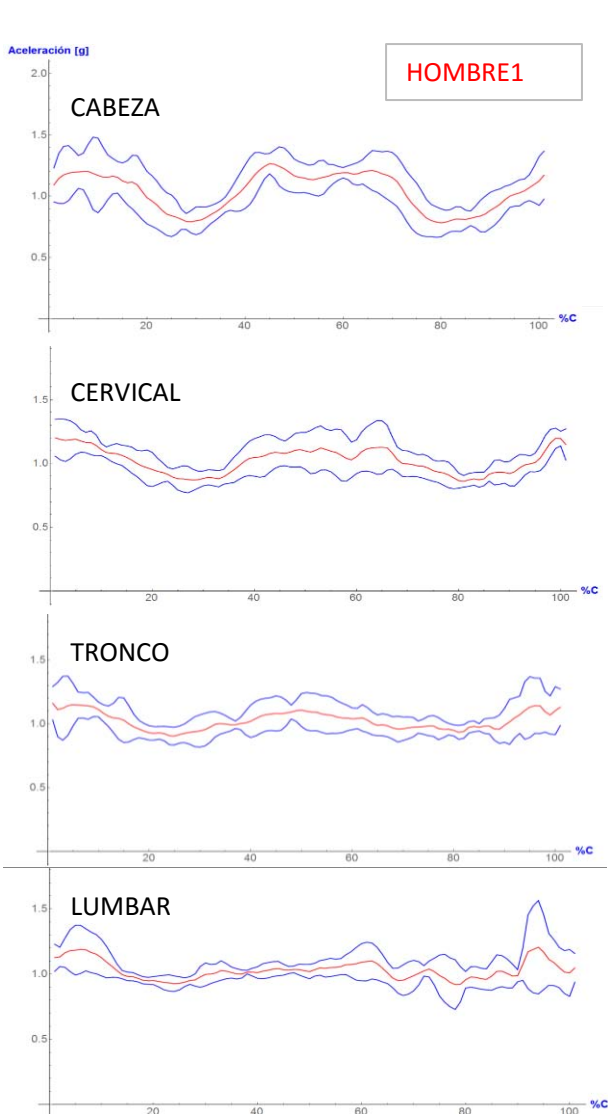


Figura A.1 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escariado para el estudio HOMBRE1

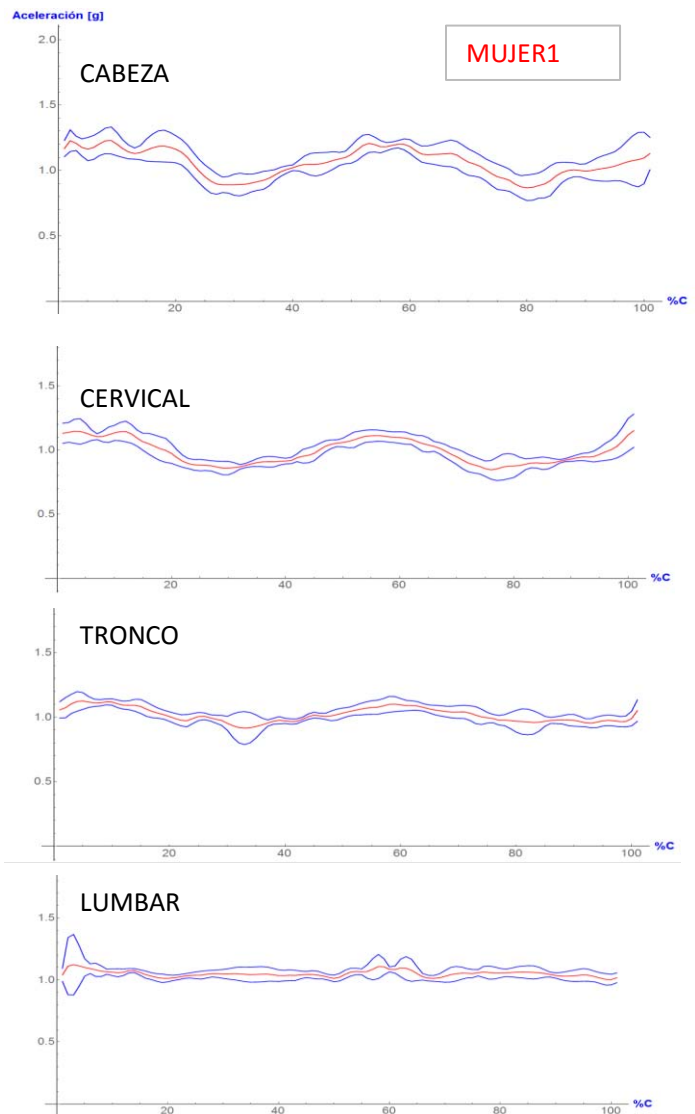


Figura A.2 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escariado para el estudio MUJER1

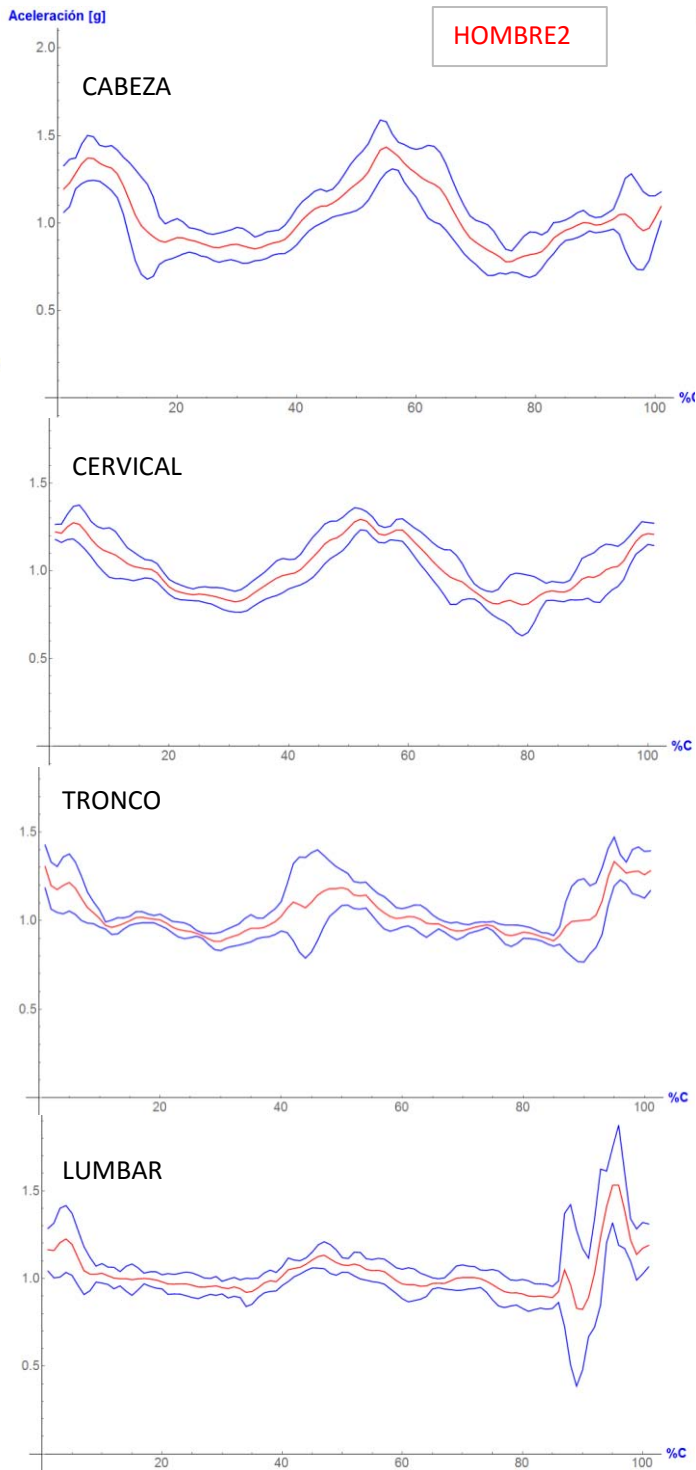


Figura A.3 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para el estudio HOMBRE2

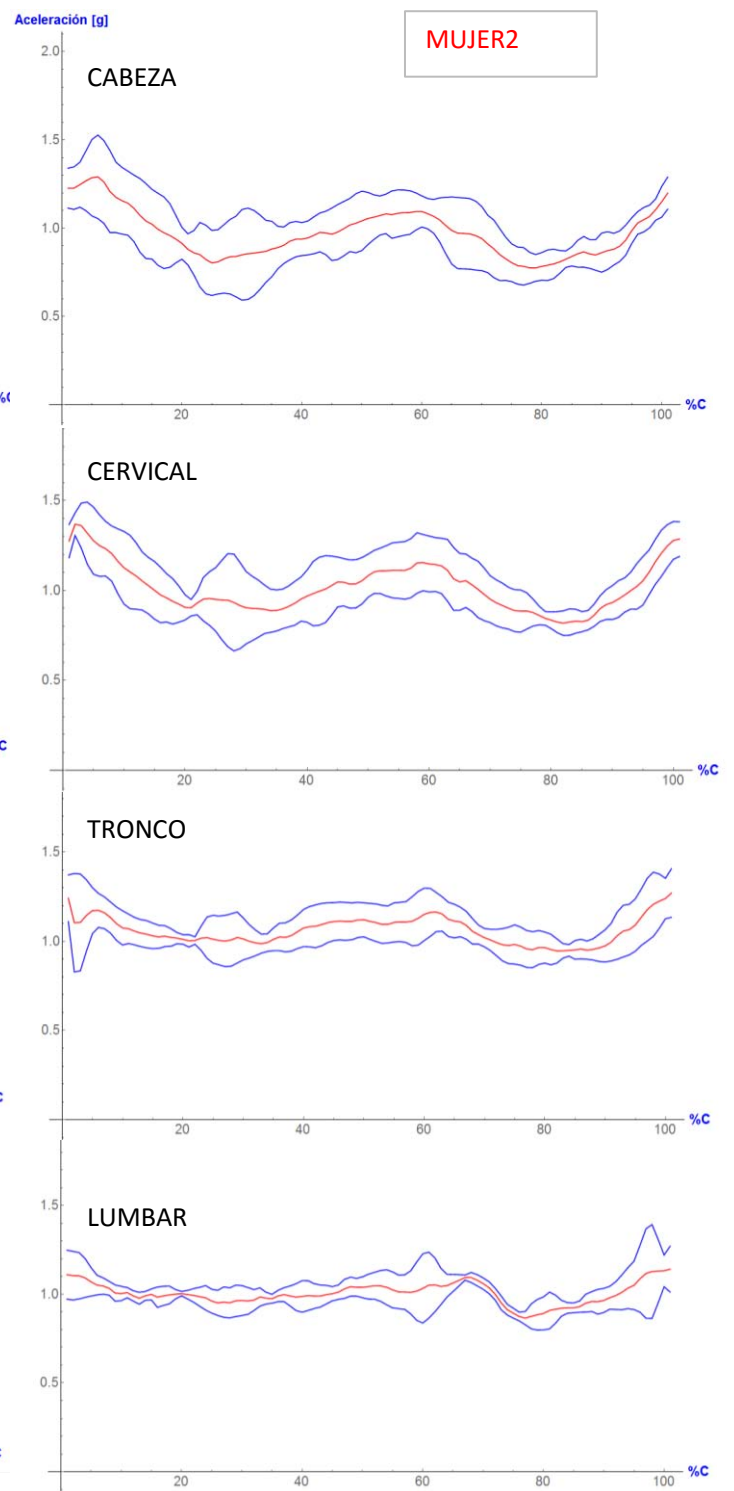


Figura A.4 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para el estudio MUJER2

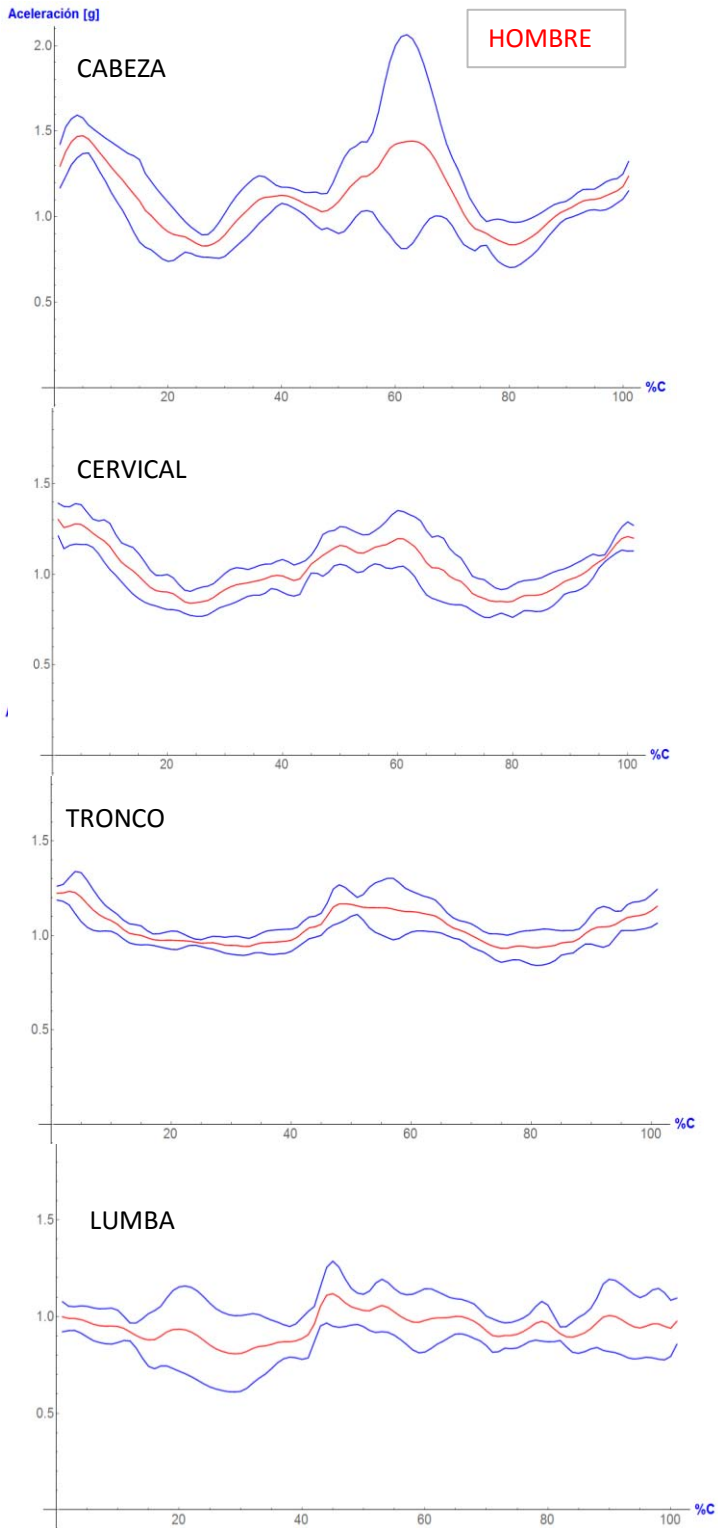


Figura A.5 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para el estudio HIOMBRE3

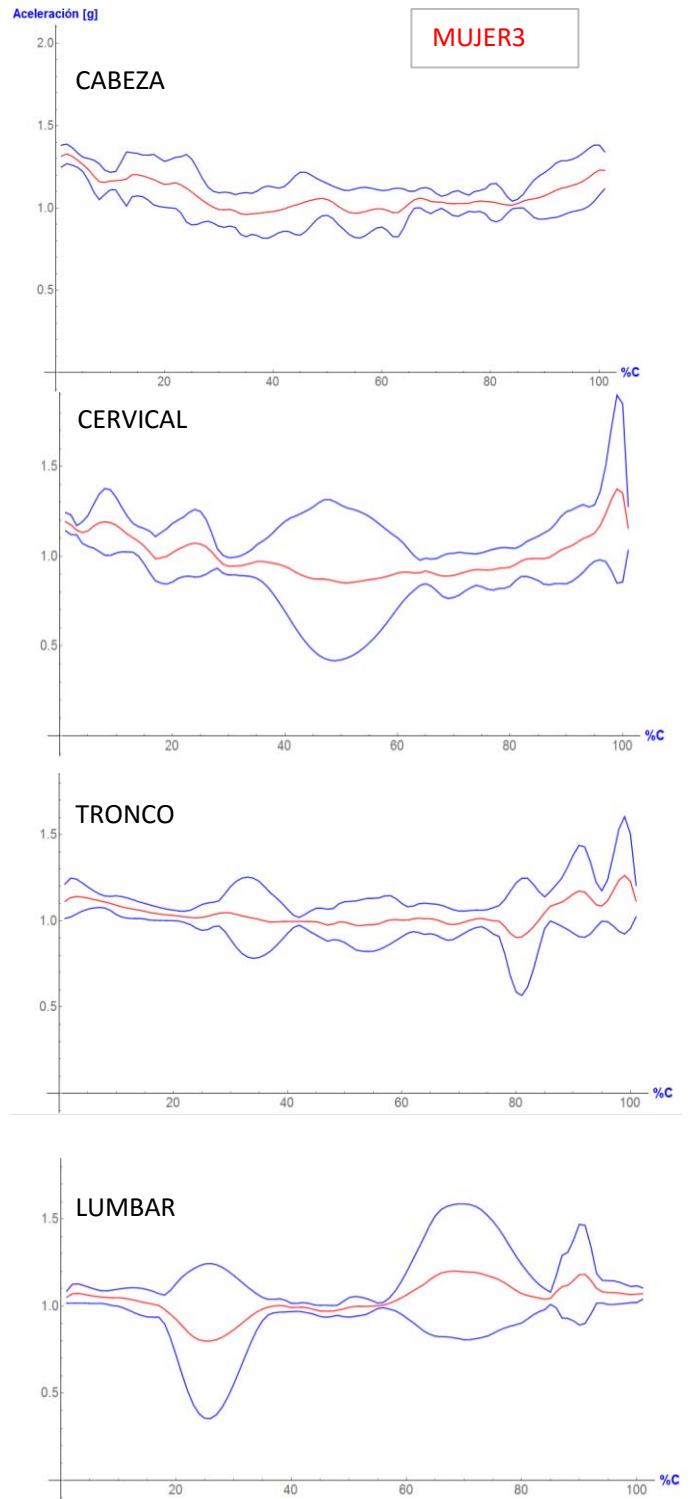


Figura A.6 Comportamiento de la aceleración en el ciclo del escardado para el estudio MUJER3

## Apéndice B

# Gráficos por prueba de segunda experimentación



Se muestra el comportamiento de la aceleración del movimiento escardado para cada captura, siendo el promedio de la aceleración del color asignado a la prueba y en rojo el área delimitada por la desviación estándar.

- **Prueba A**

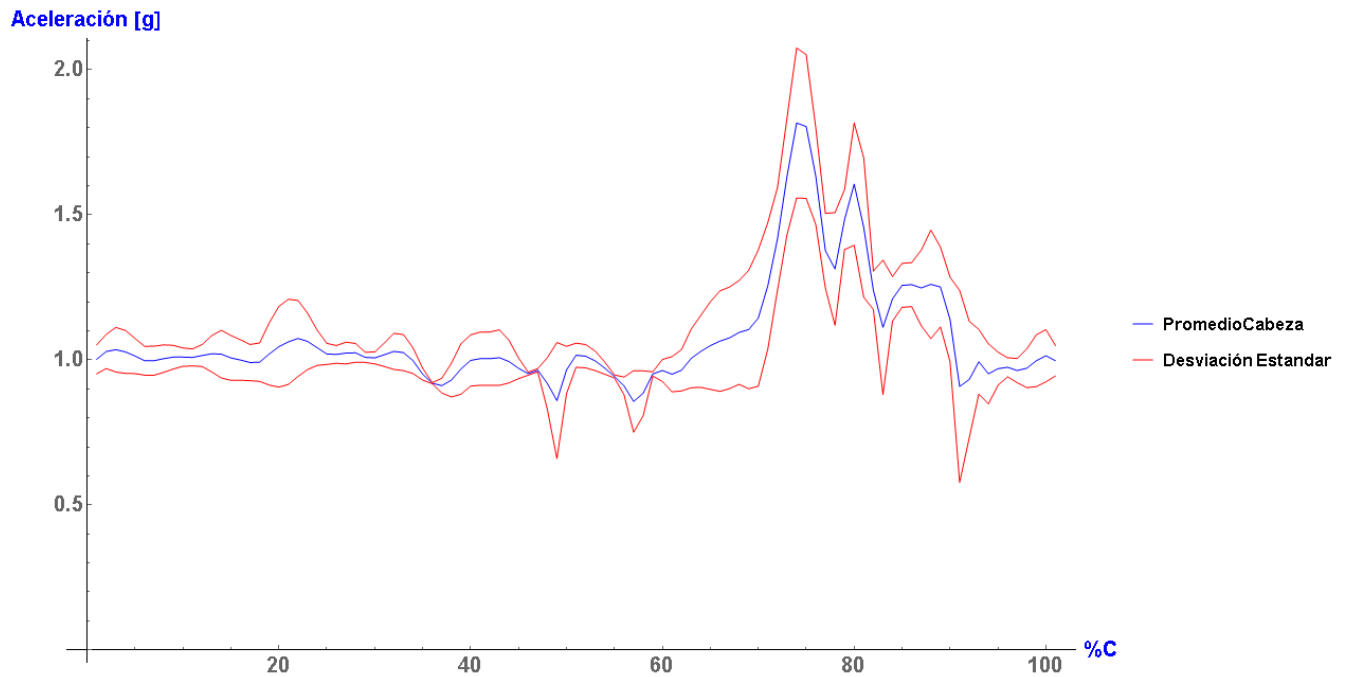


Figura B. 1 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 1, prueba A.



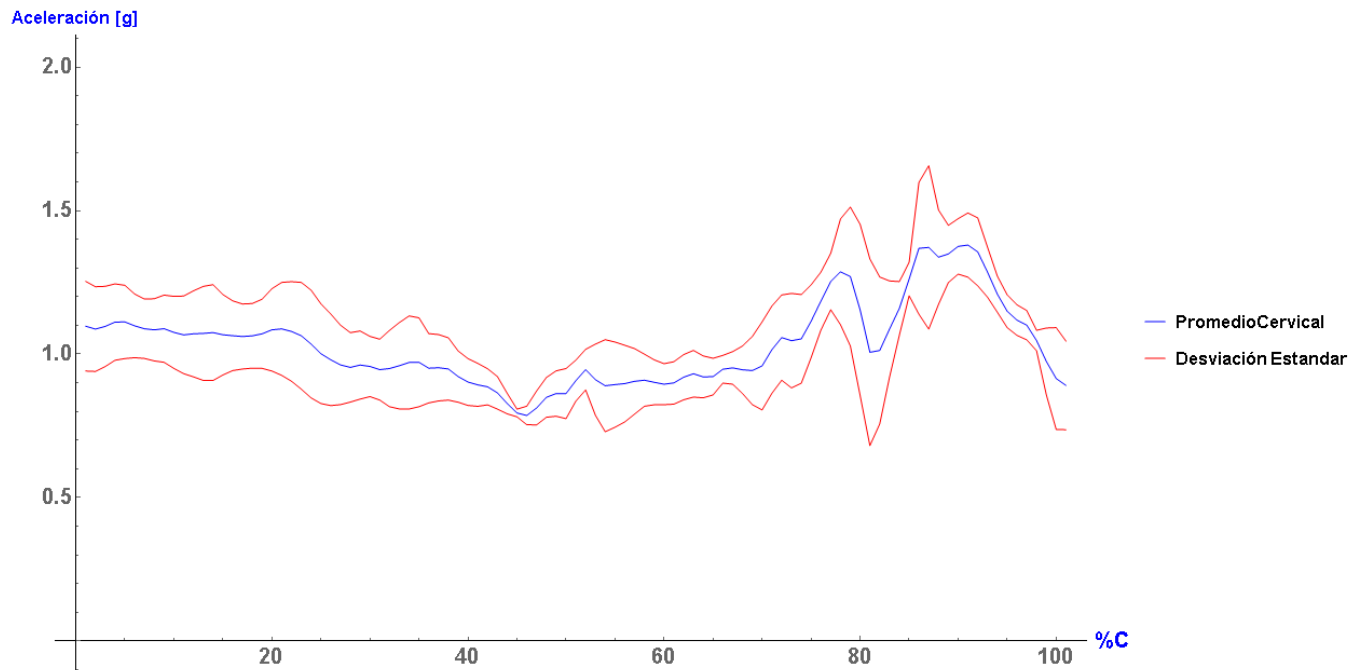


Figura B. 2 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 1, prueba A.

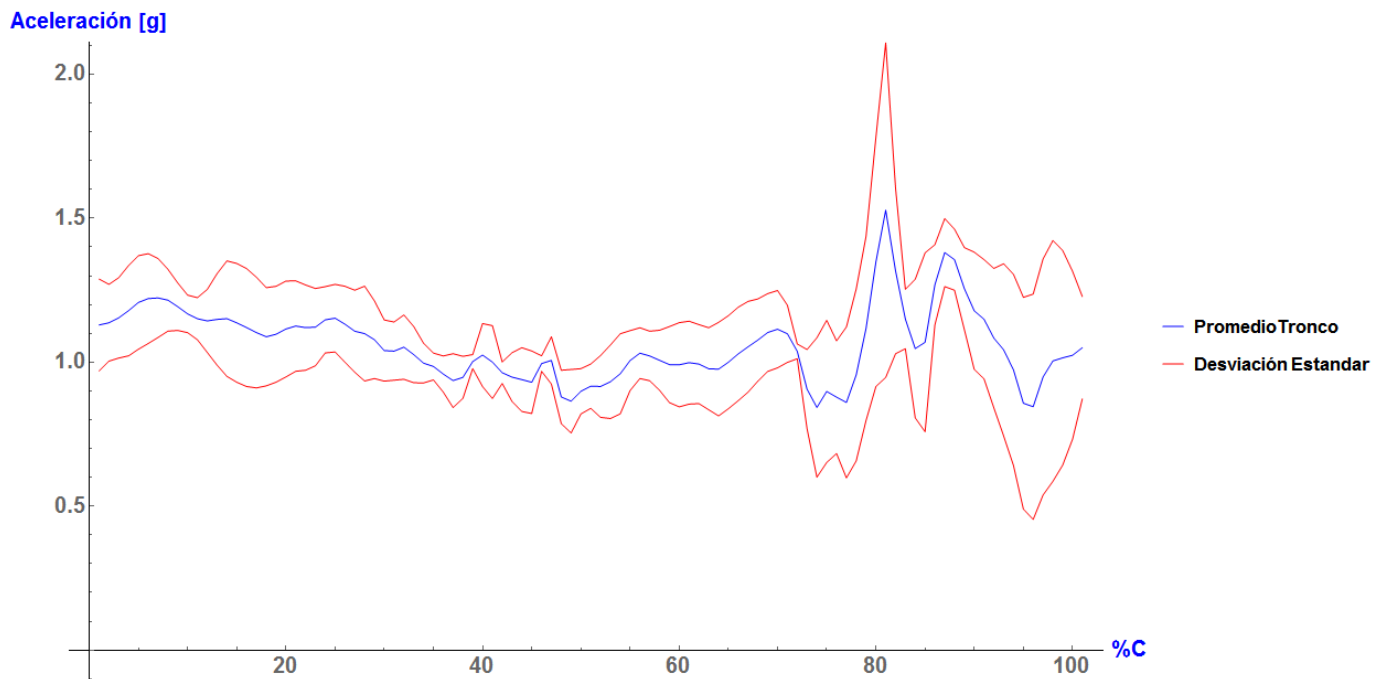


Figura B. 3 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 1, prueba A.

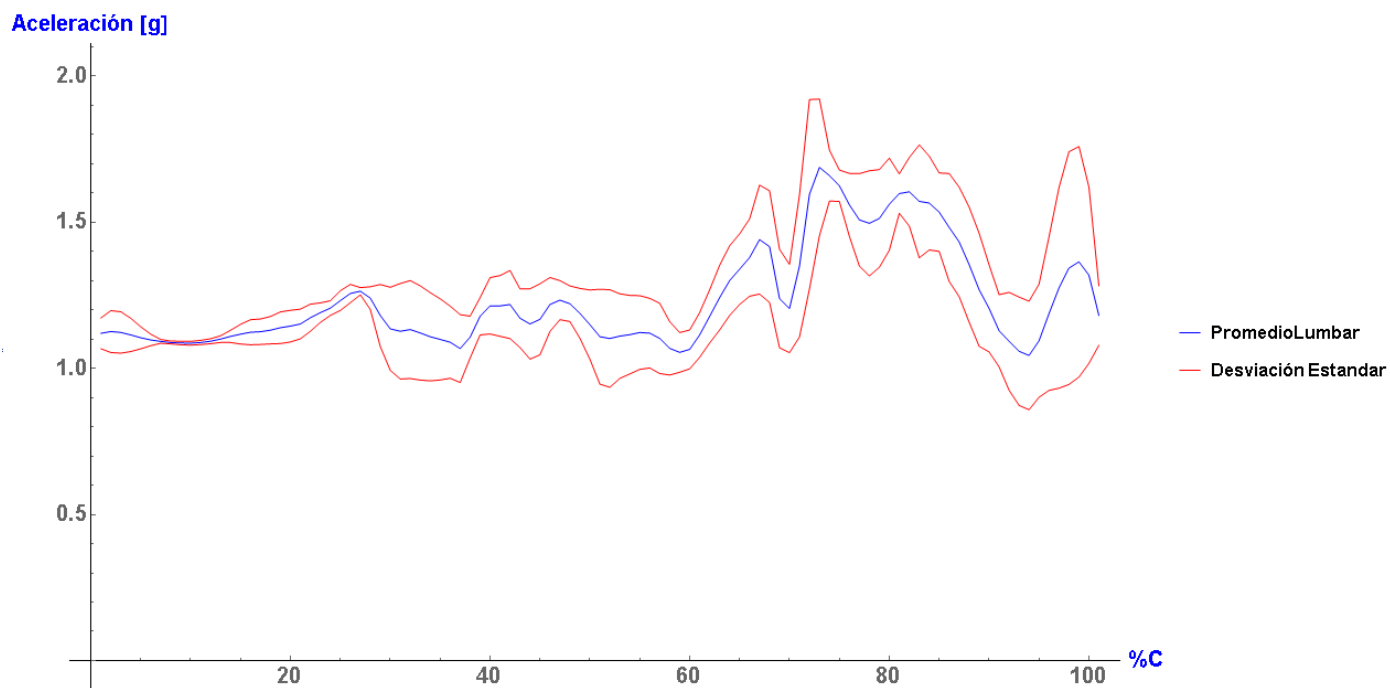


Figura B. 4 representación gráfica de la aceleración para la región lumbosacra del movimiento escardado del individuo 1, prueba A.

- **Prueba B**

Para la prueba B solo se logró obtener un ciclo por acelerómetro, por lo que no presenta un promedio y una desviación.

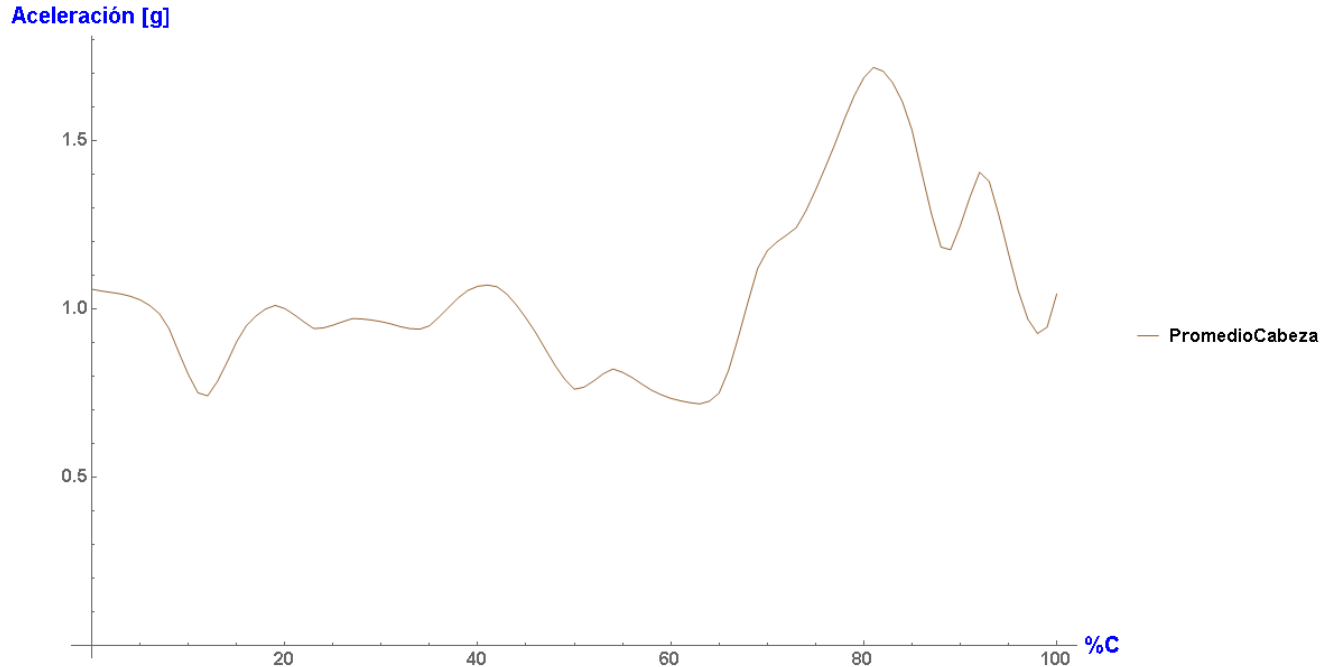


Figura B. 5 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 1, prueba B.

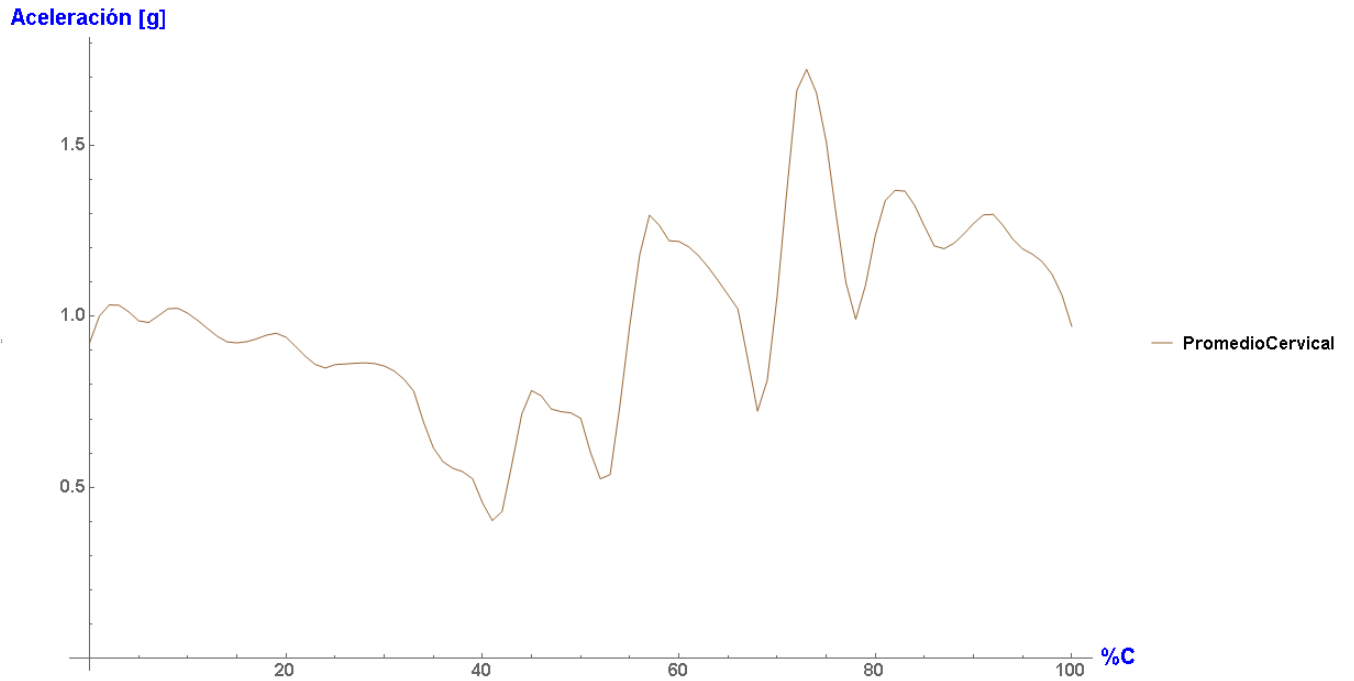


Figura B. 6 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 1, prueba B.

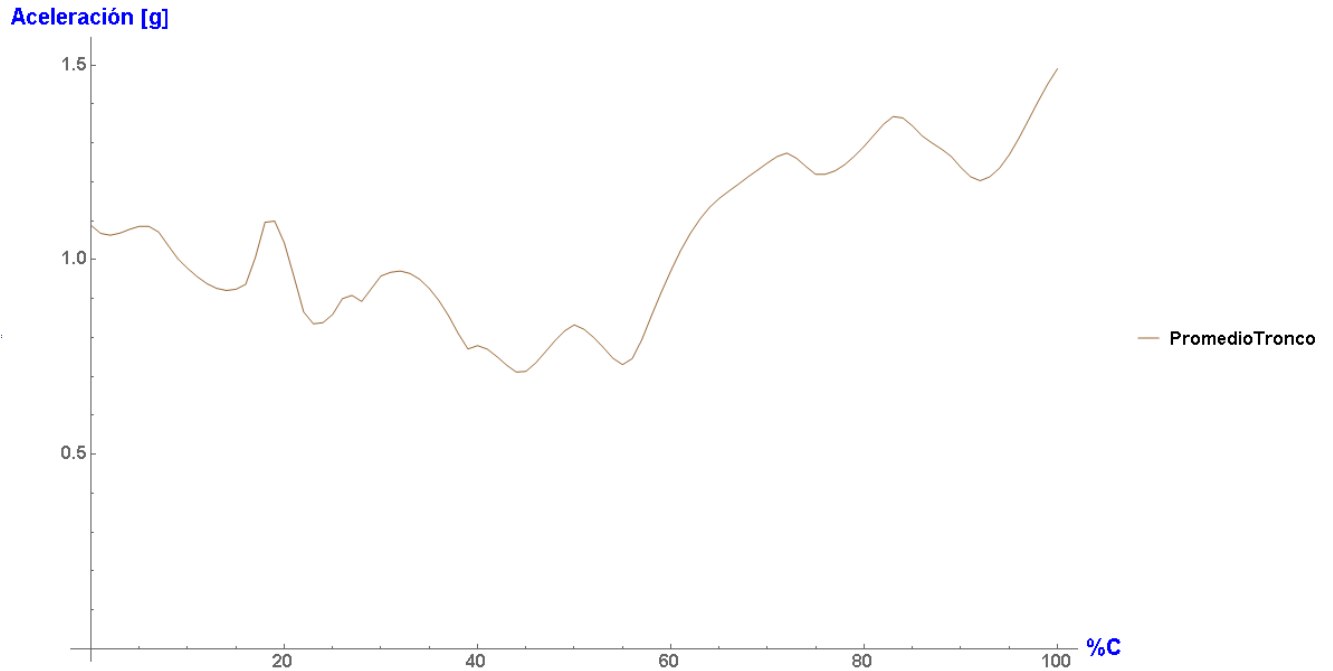


Figura B. 7 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 1, prueba B.

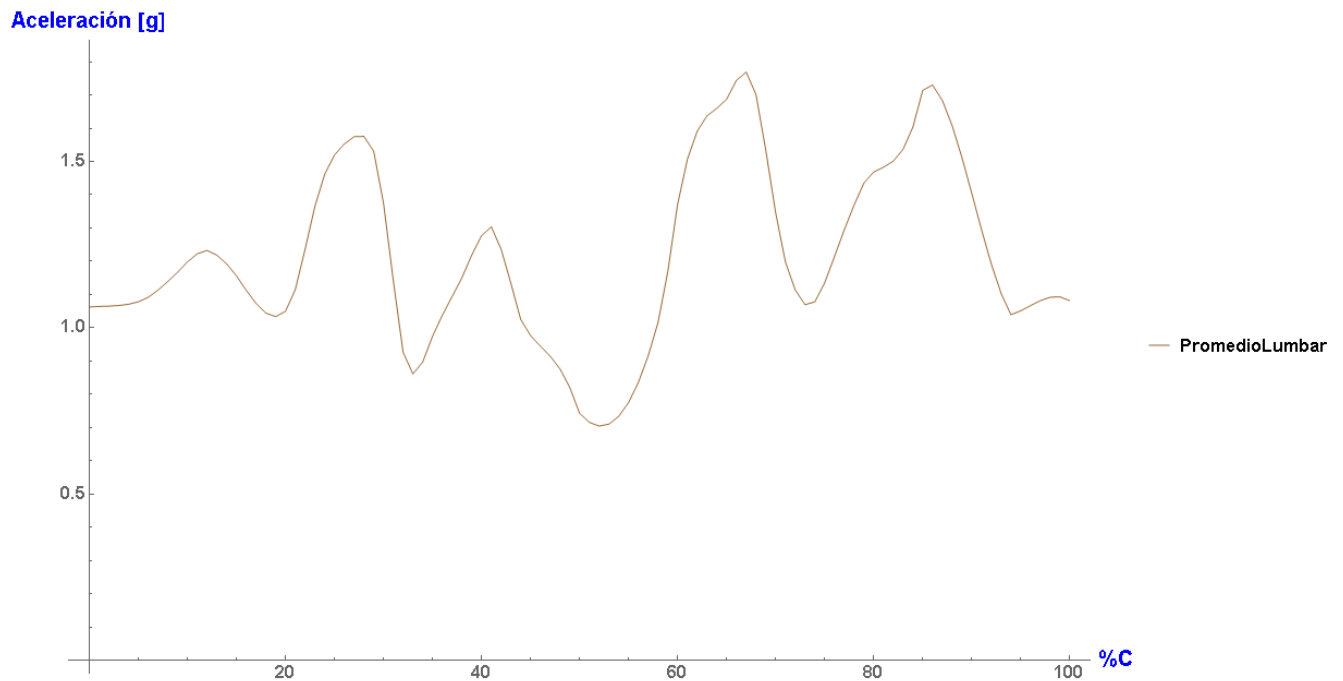


Figura B. 8 representación gráfica de la aceleración para la región lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 1, prueba B.

- **Prueba C**

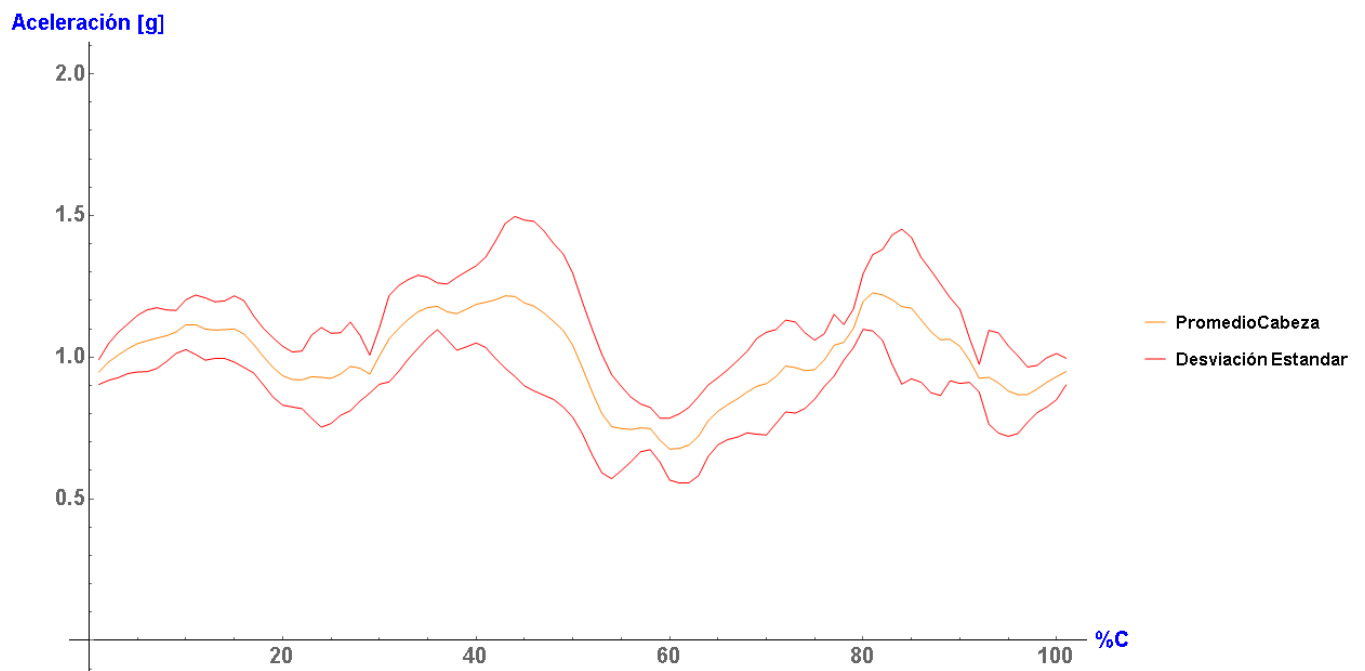


Figura B. 9 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 2, prueba C.

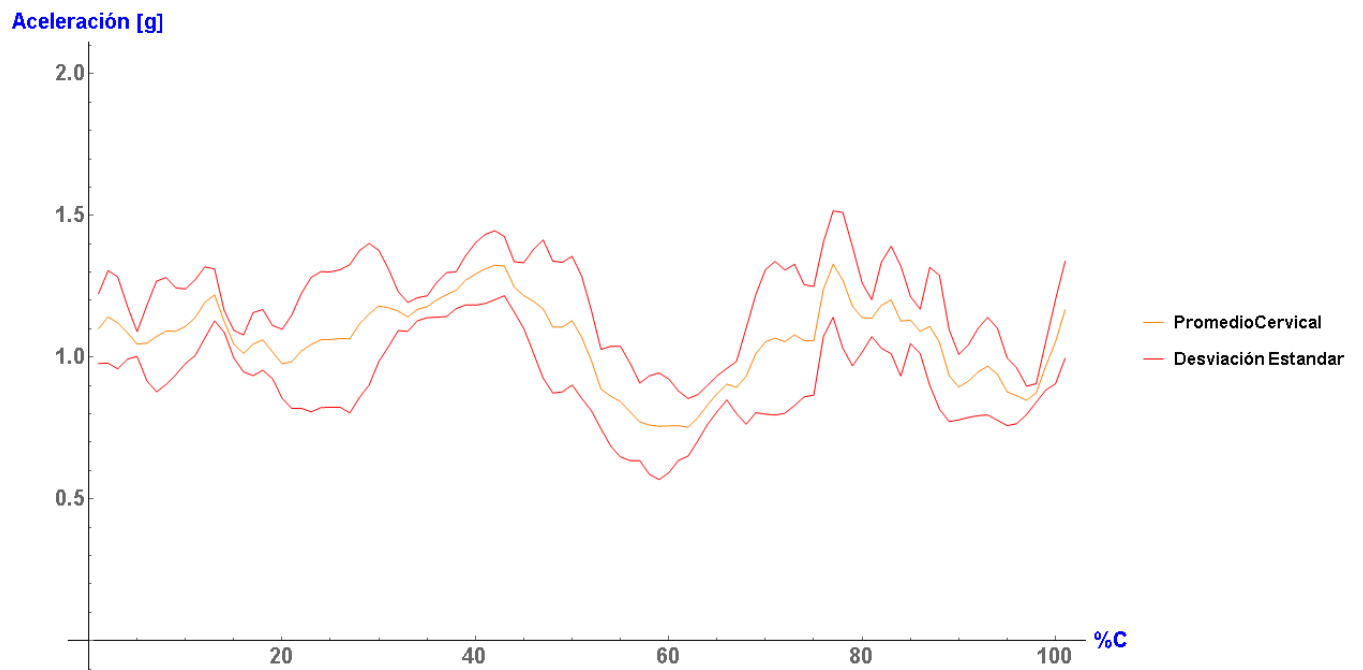


Figura B. 10 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 2, prueba C.

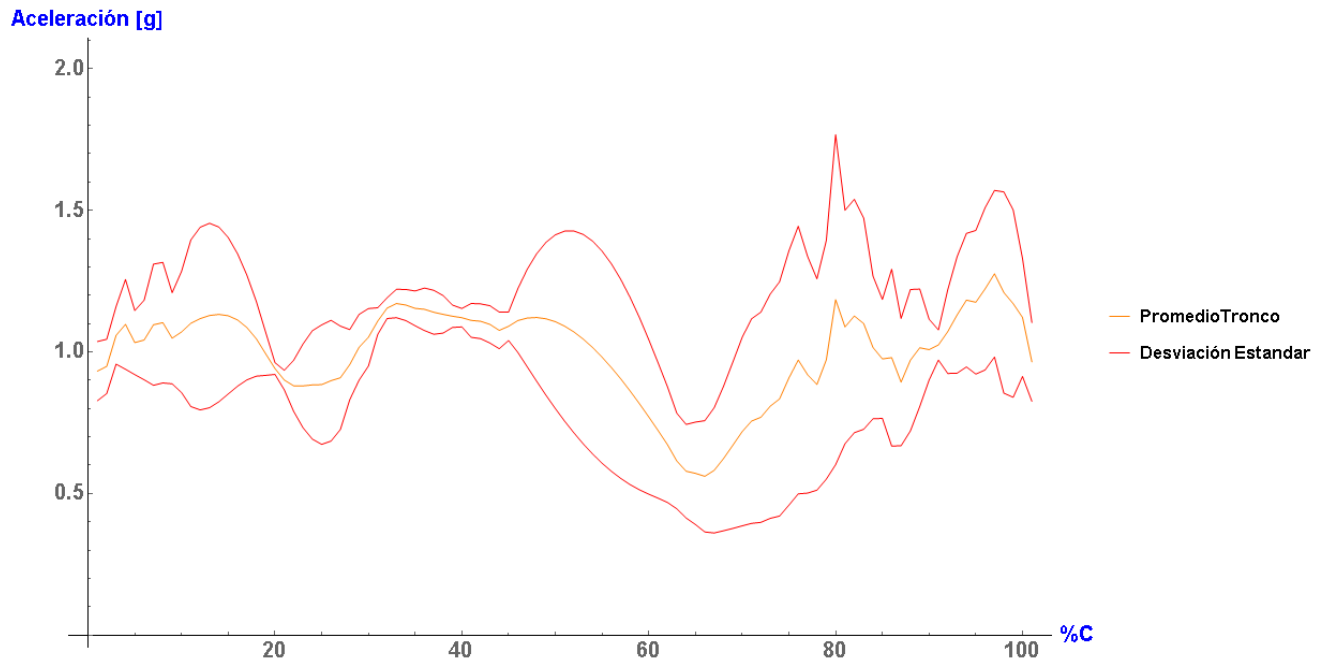


Figura B. 11 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 2, prueba C.

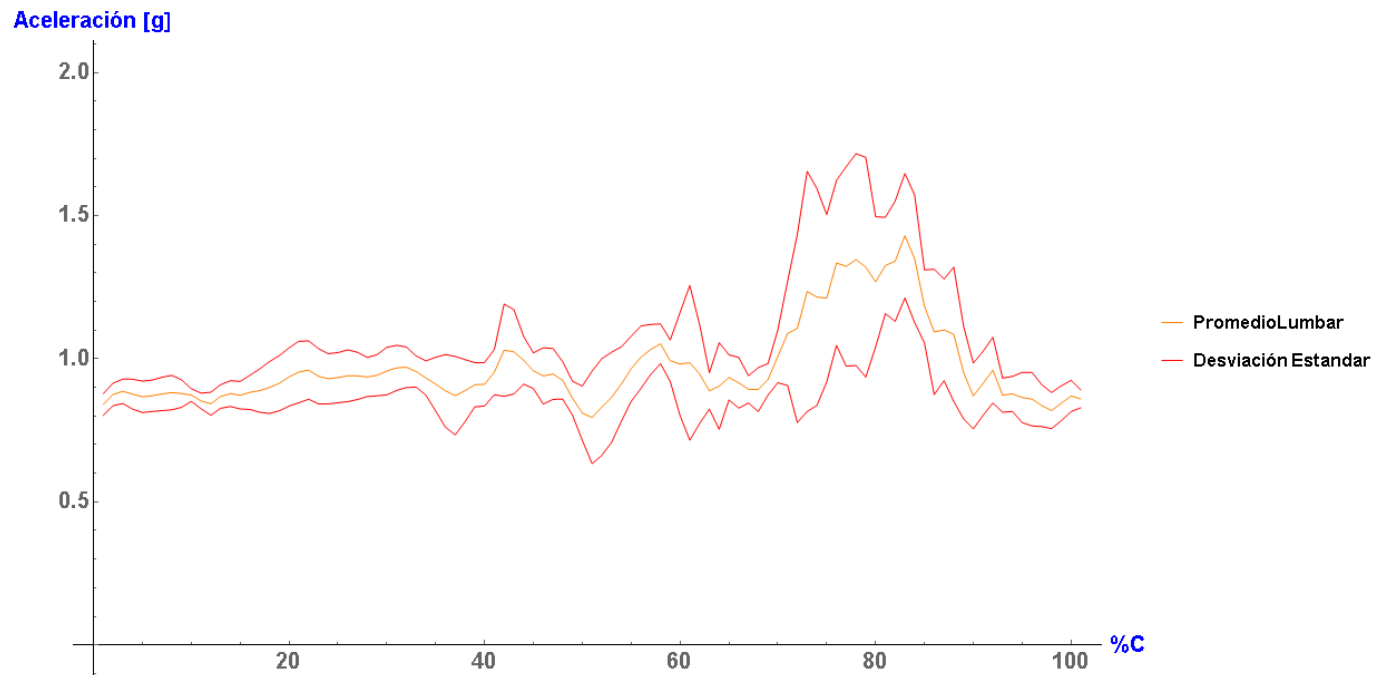


Figura B. 12 representación gráfica de la aceleración para la región lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 2, prueba C.

- **Prueba D**

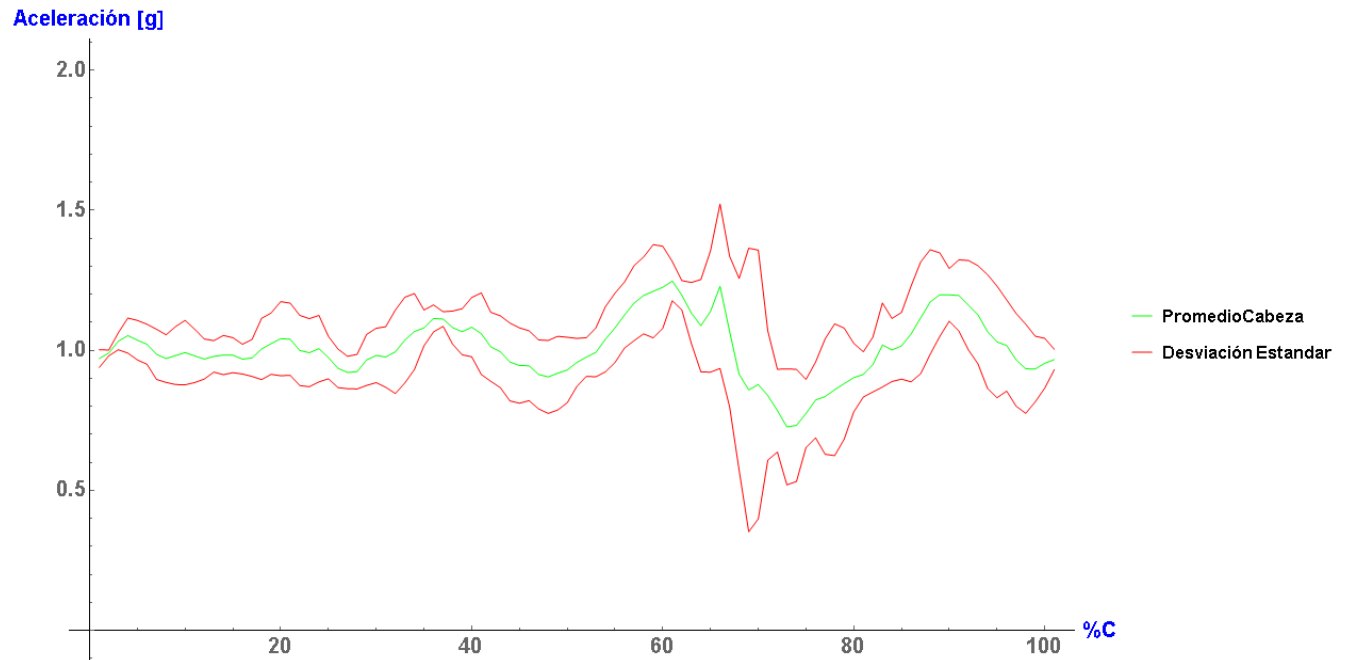


Figura B. 13 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 3, prueba D.

Para el resultado de la cervical 7 sujeto 4, no se logró concretar debido a que no se pudo identificar algún ciclo numérico de forma completa en la captura del acelerómetro.

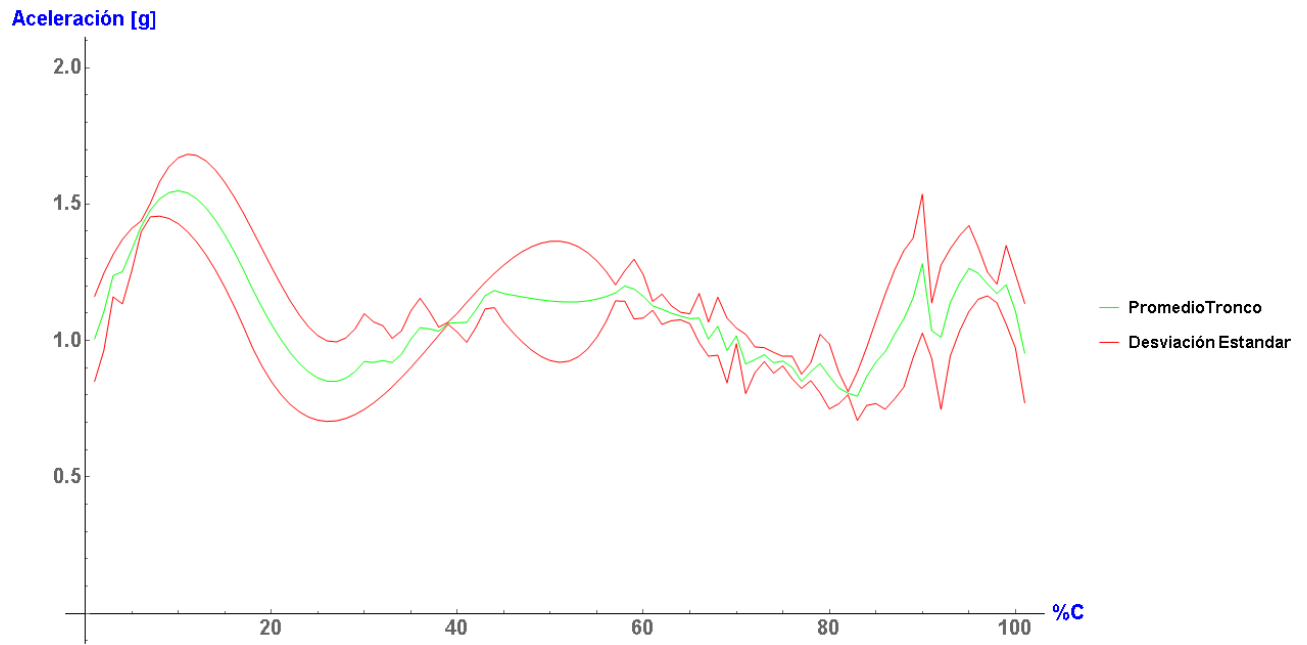


Figura B. 14 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 3, prueba D.

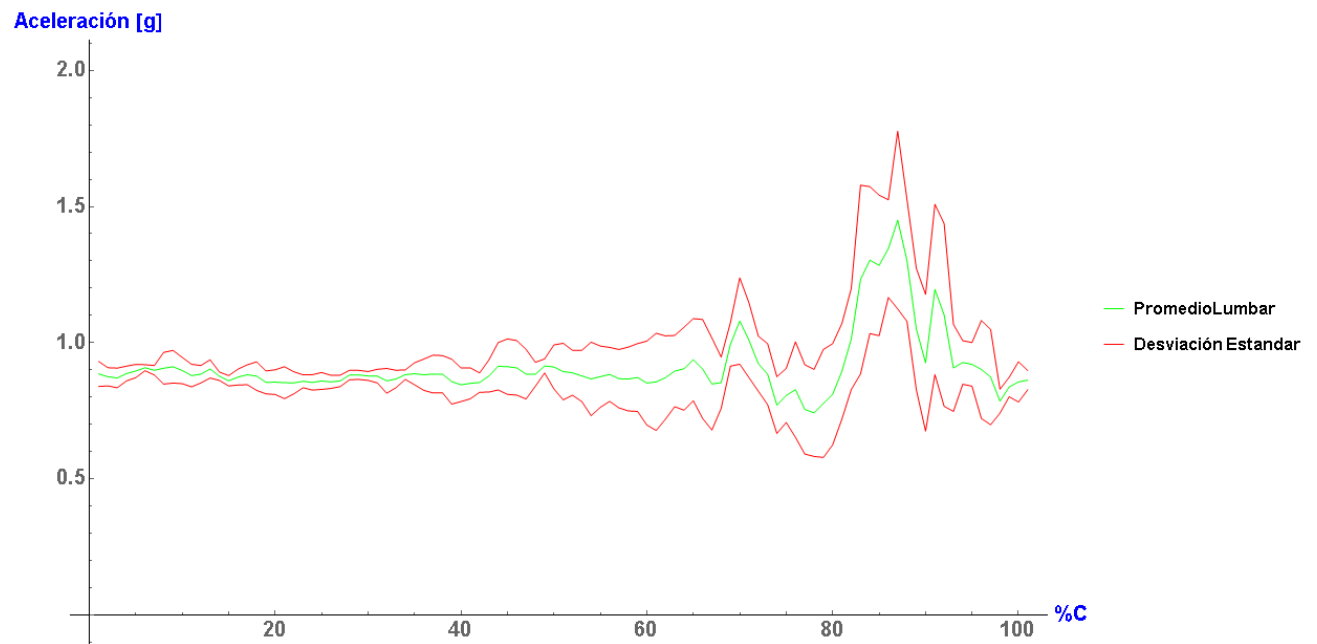


Figura B. 15 representación gráfica de la aceleración para la zona lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 3, prueba D.



• **Prueba E**

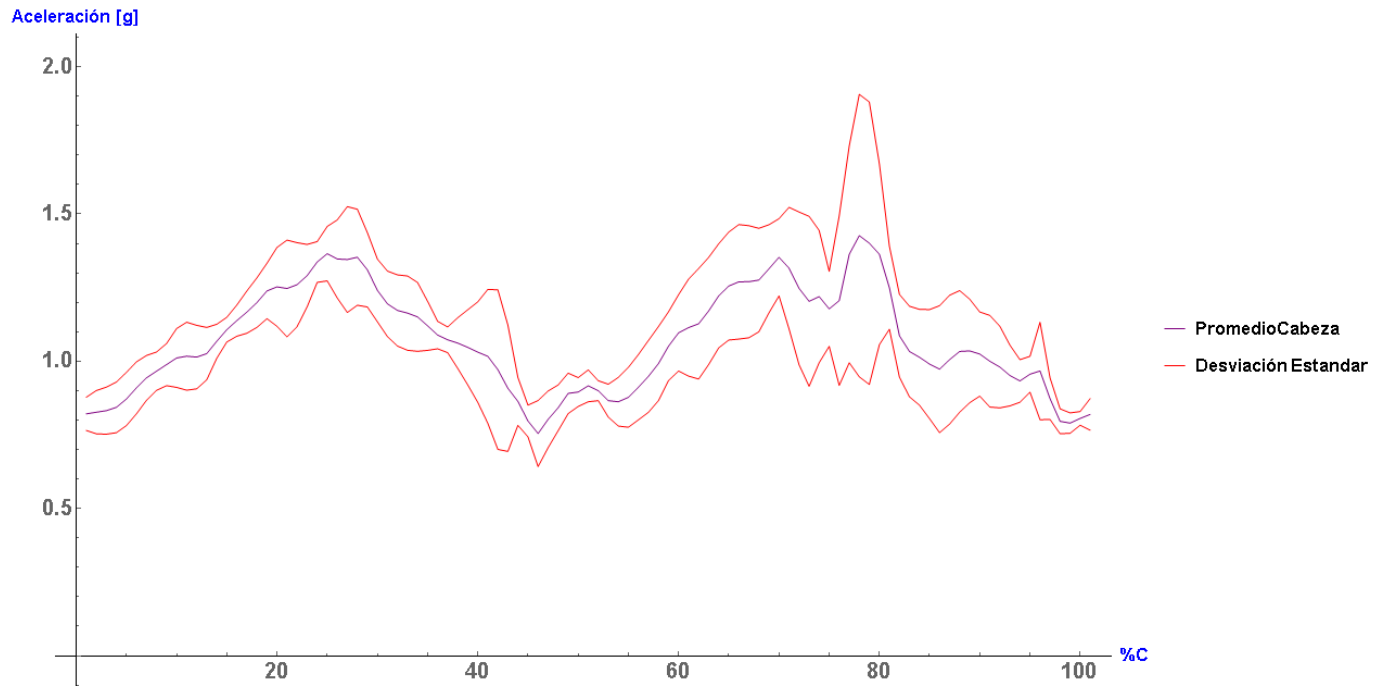


Figura B. 16 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 4, prueba E.

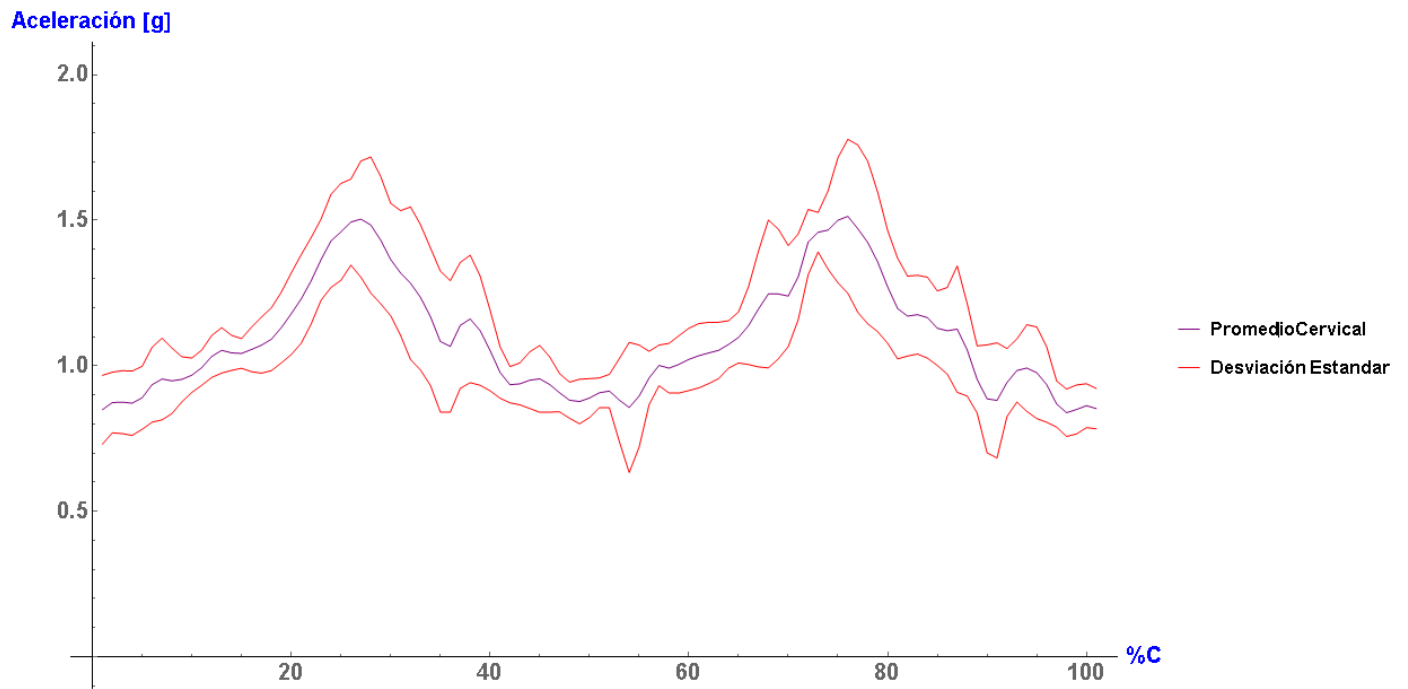


Figura B. 17 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 4 prueba E.

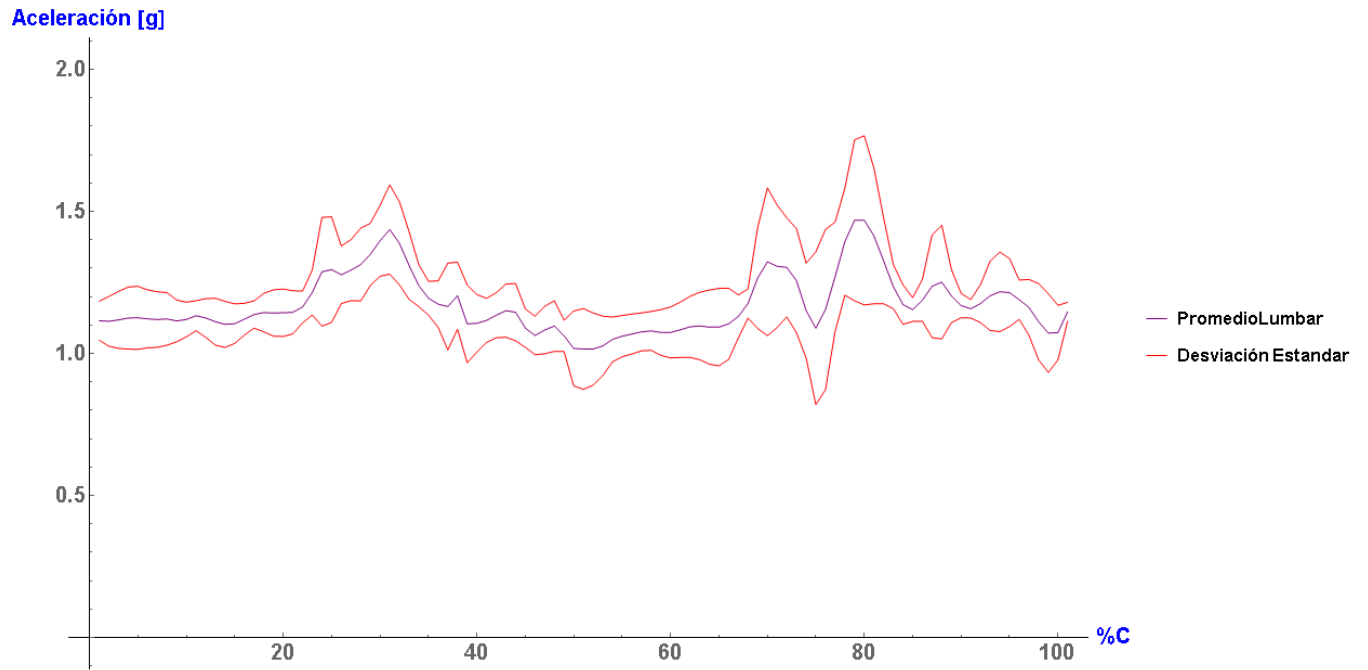


Figura B. 18 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 4 prueba E.

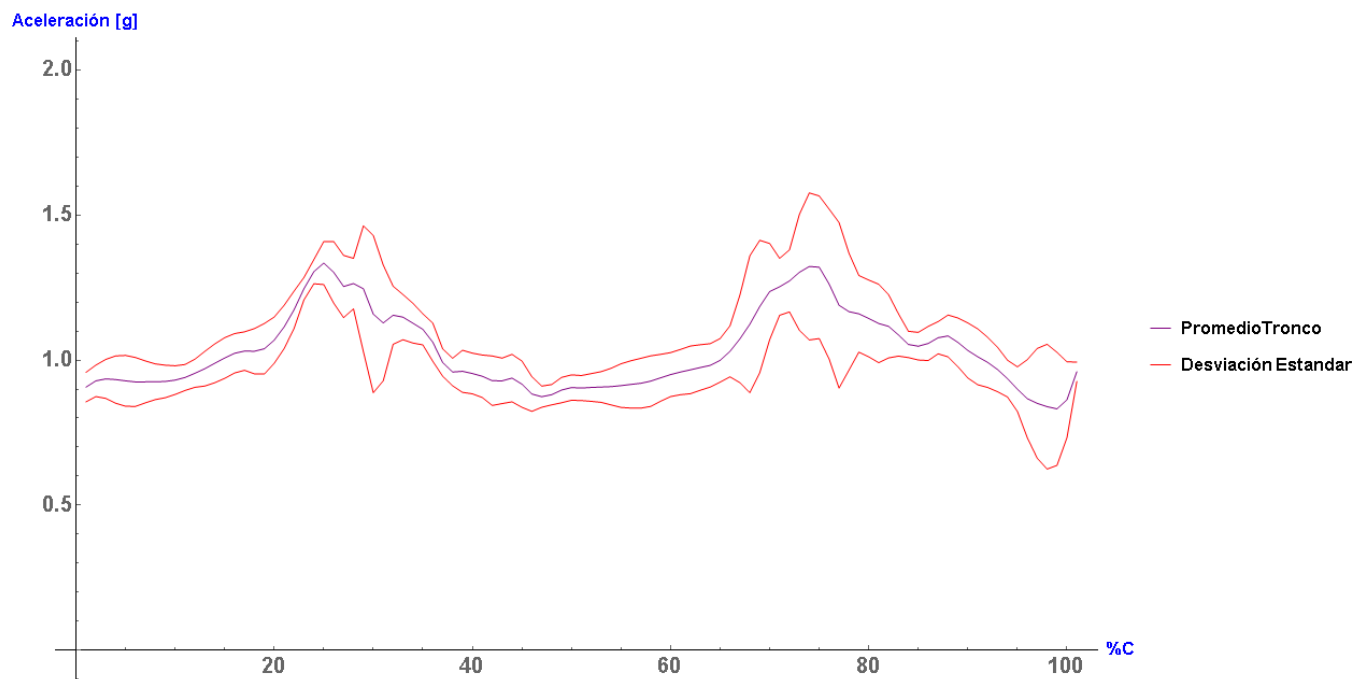


Figura B. 19 representación gráfica de la aceleración para la zona lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 4 prueba E.

- **Prueba F**

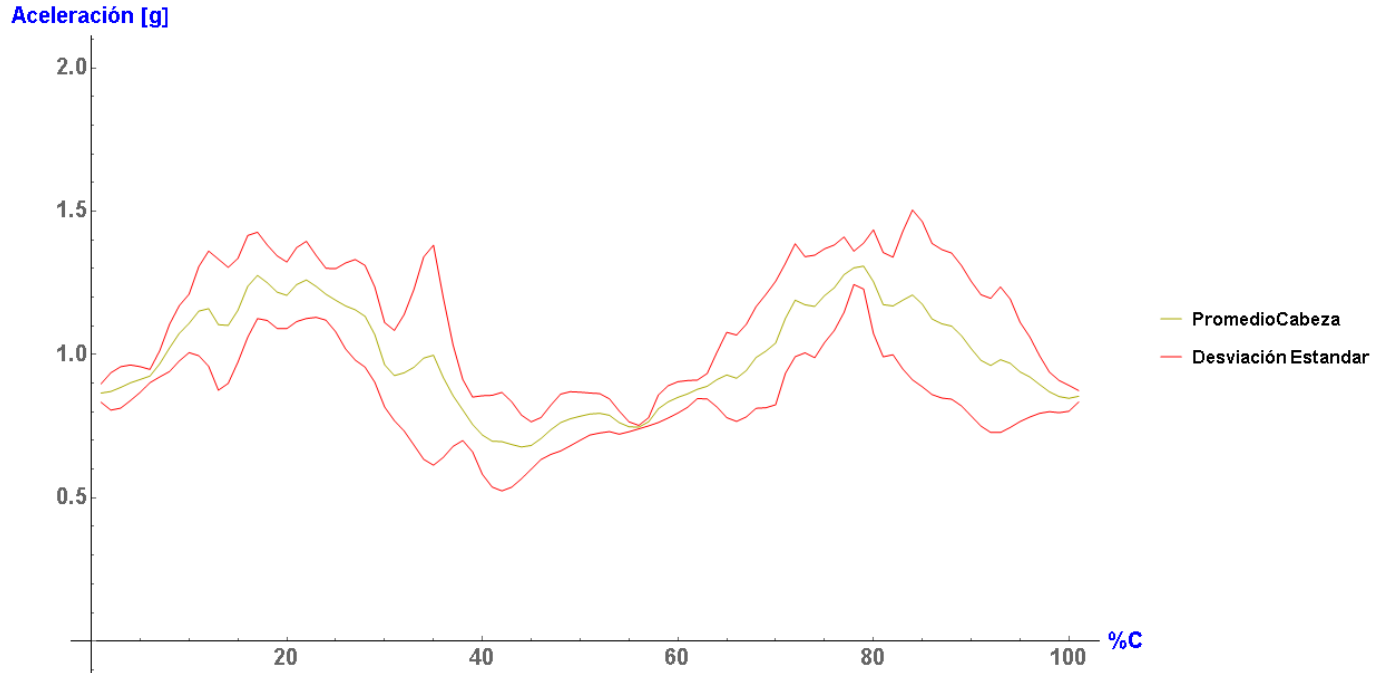


Figura B. 20 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 5 prueba F.

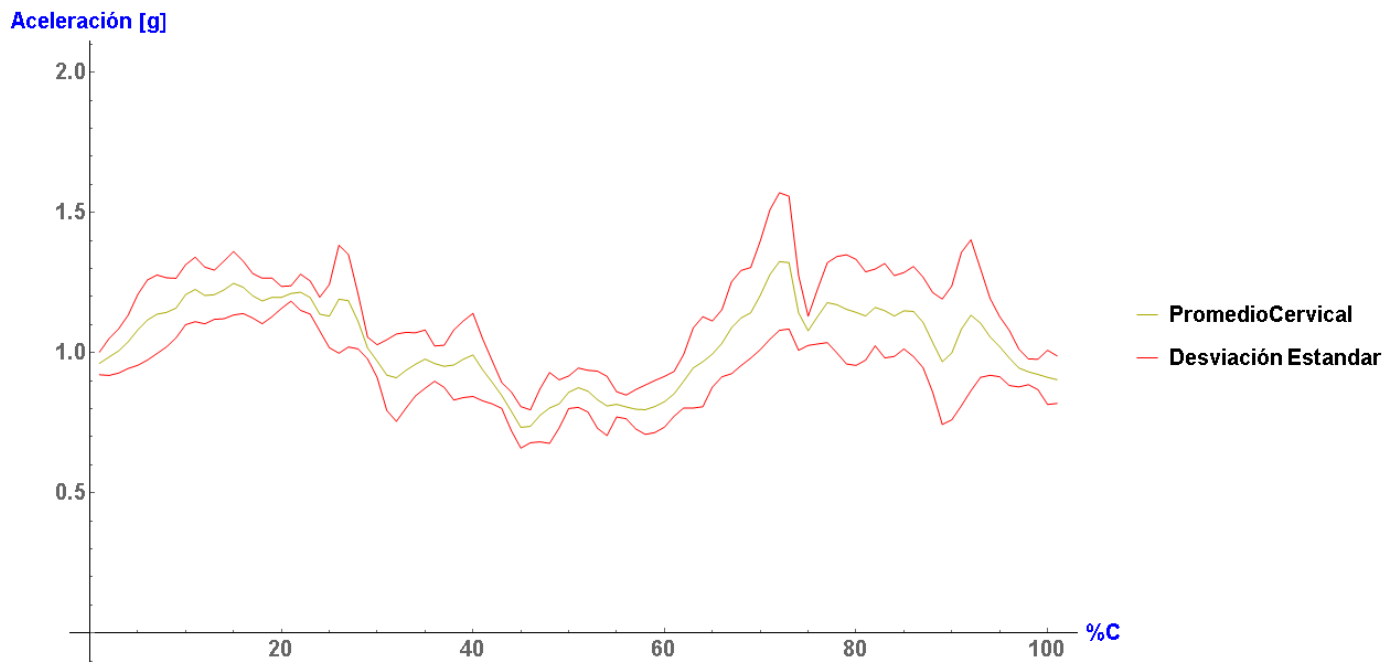


Figura B. 21 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 5 prueba F.

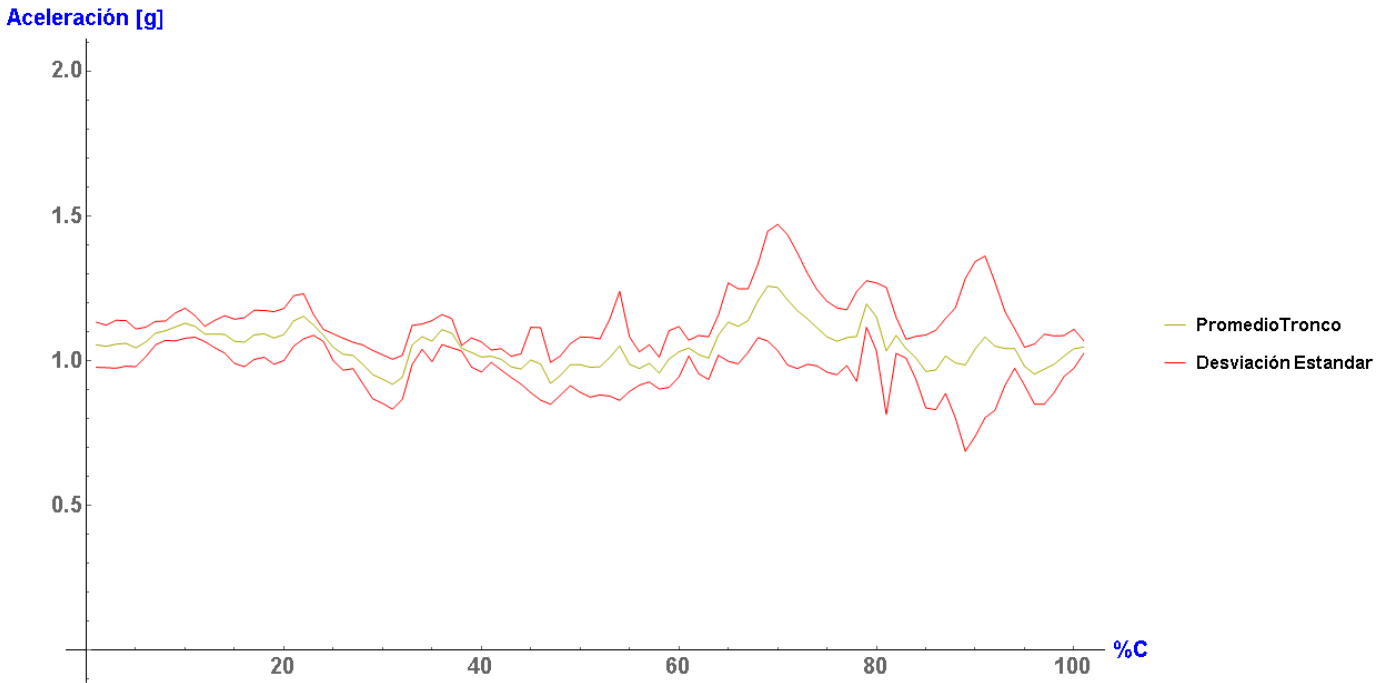


Figura B. 22 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 5 prueba F.

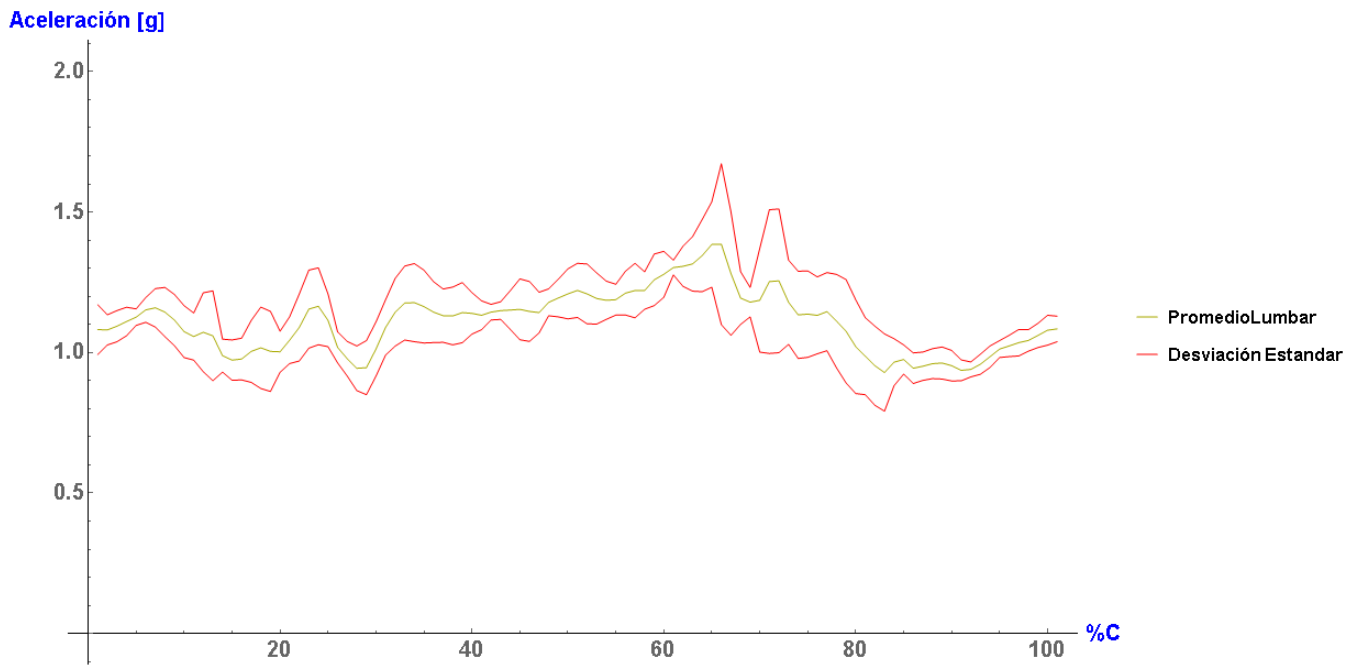


Figura B. 23 representación gráfica de la aceleración para la zona lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 5 prueba F.

- **Prueba G**

En la prueba G solo se logró obtener un ciclo por acelerómetro, por lo que no presenta un promedio y una desviación.

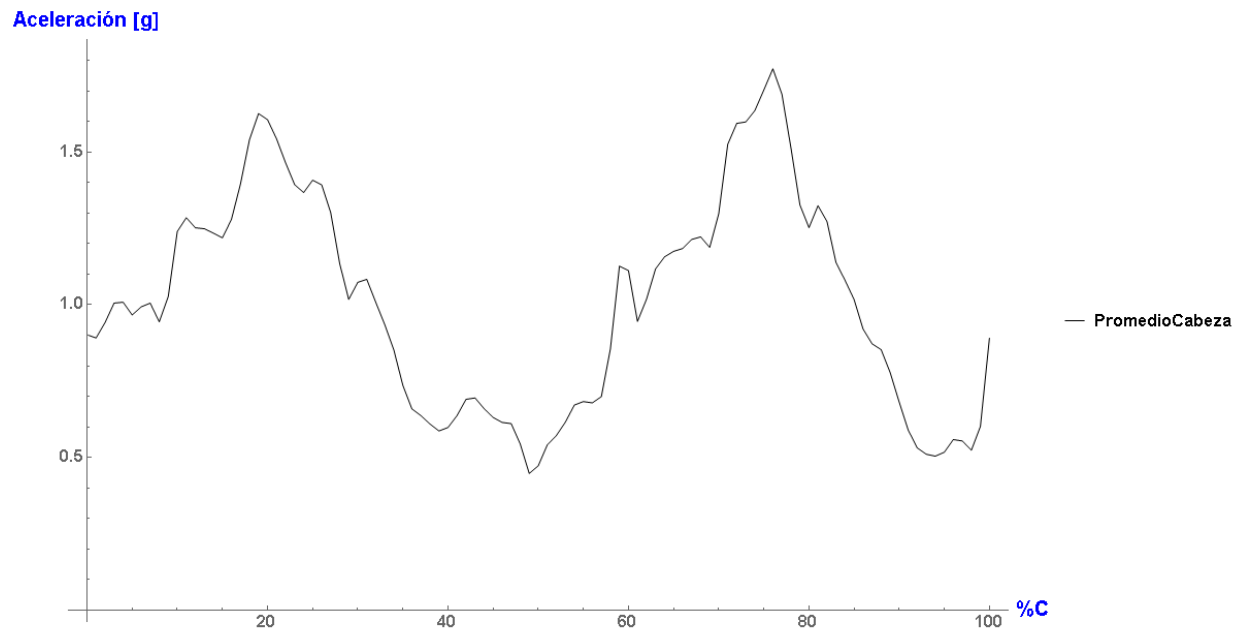


Figura B. 24 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 6 prueba G.

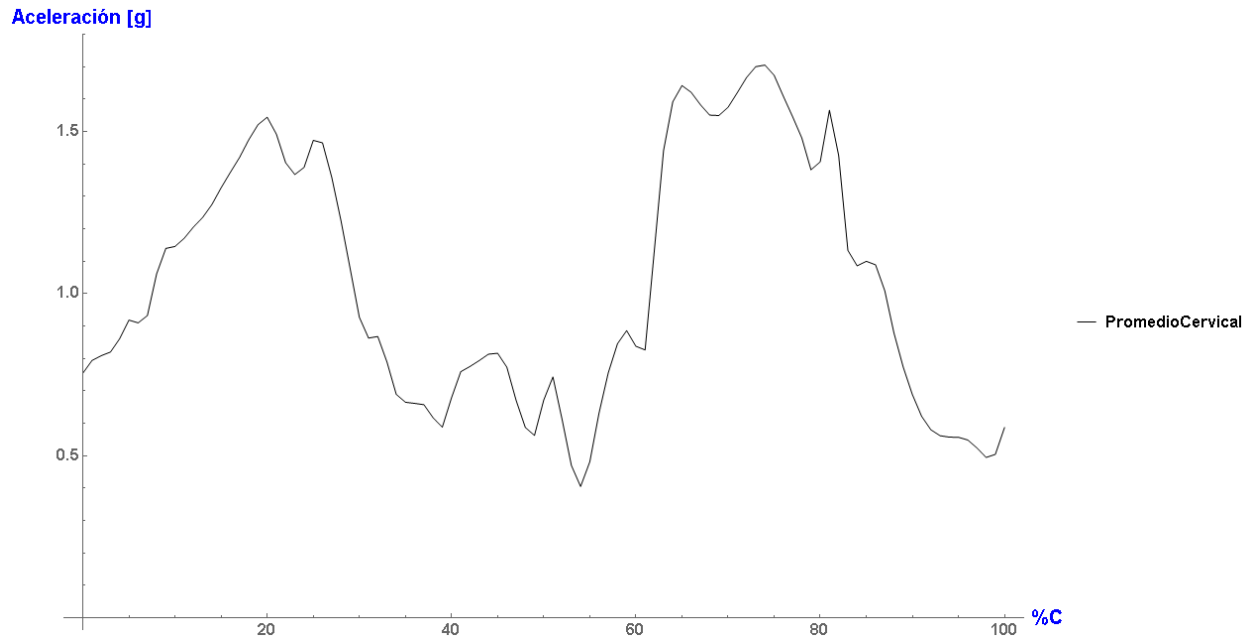


Figura B. 25 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 6 prueba G.

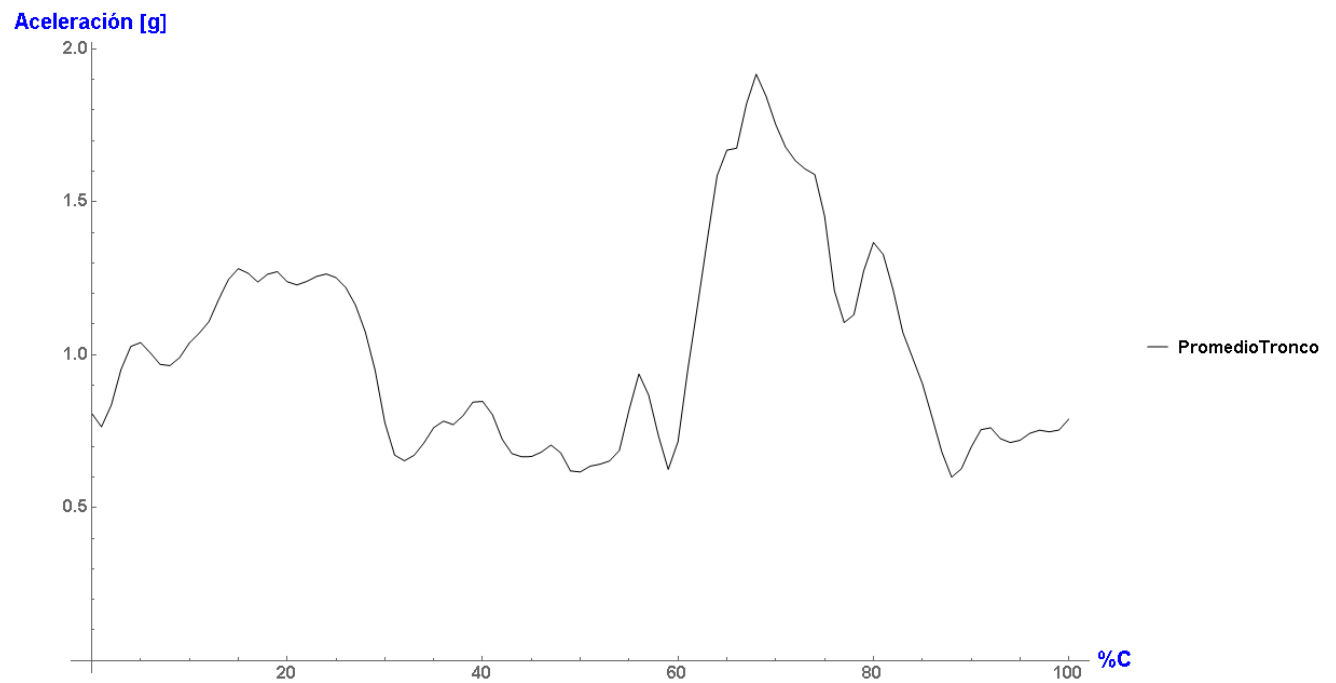


Figura B. 26 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 6 prueba G.

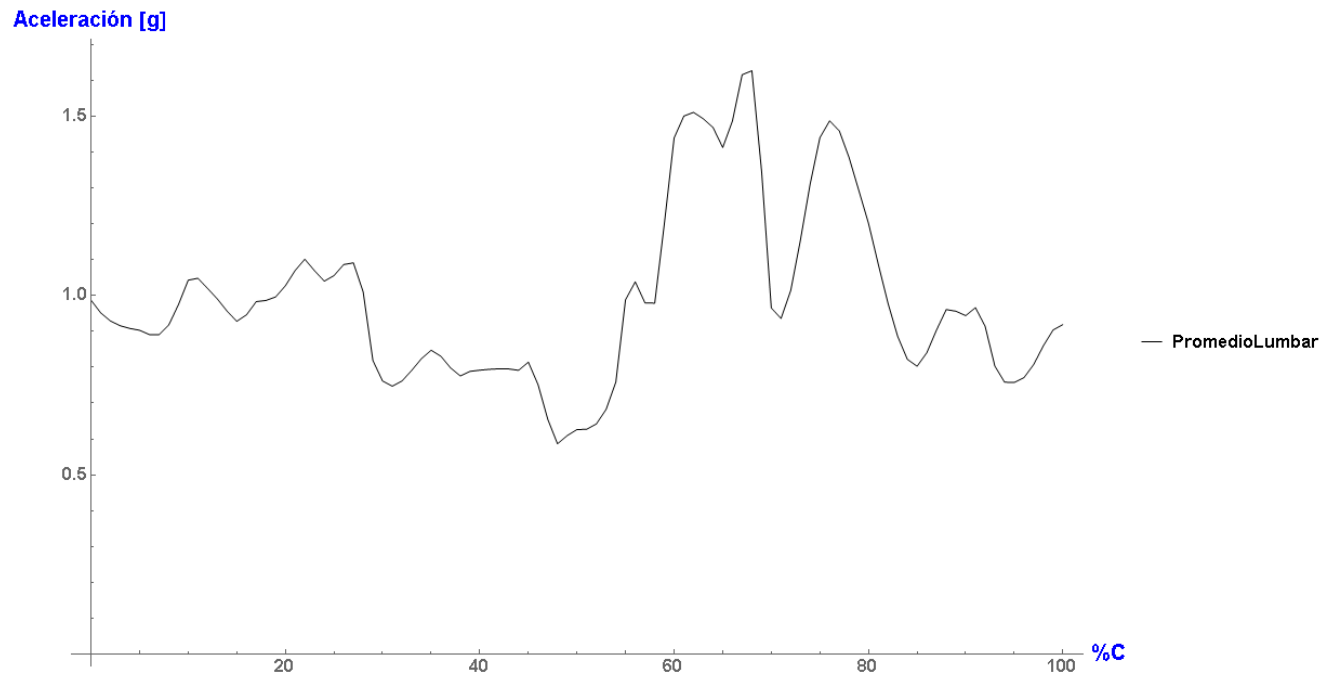


Figura B. 27 representación gráfica de la aceleración para la zona lumbo sacra en el movimiento escardado del individuo 6 prueba G.

- **Prueba H**

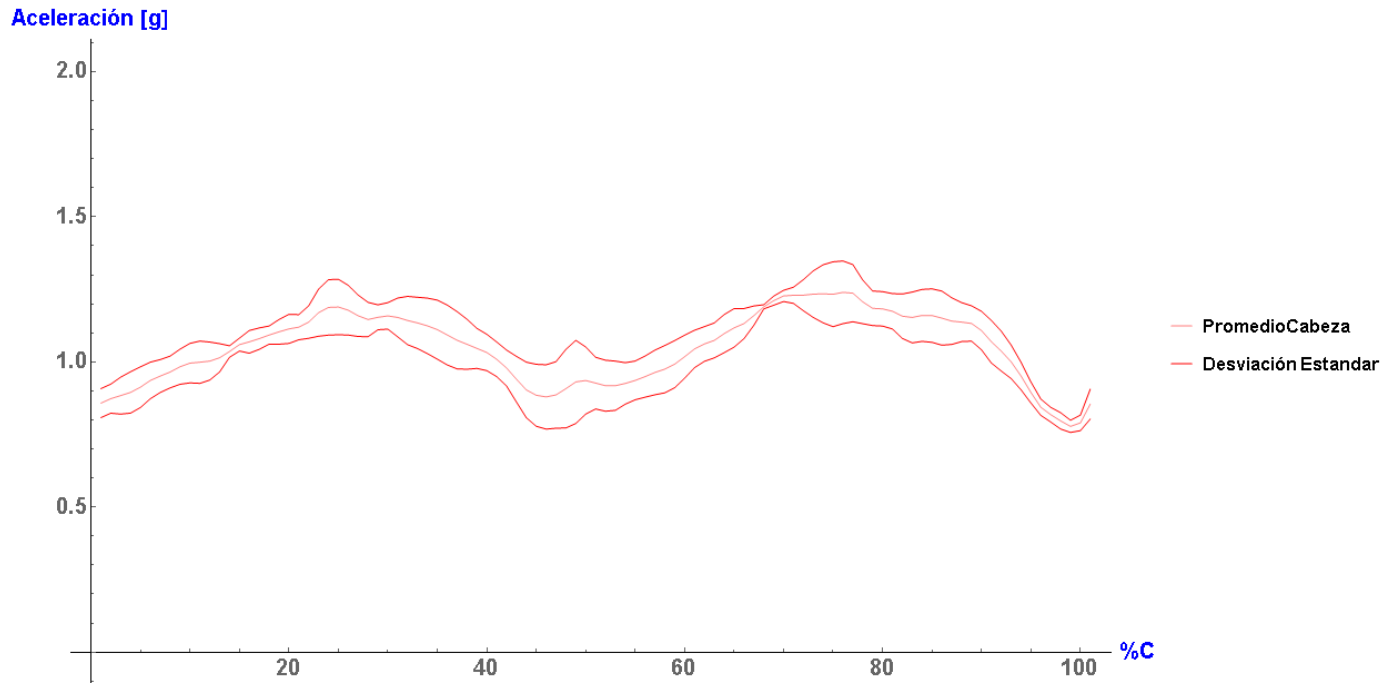


Figura B. 28 representación gráfica de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado del individuo 7 prueba H.

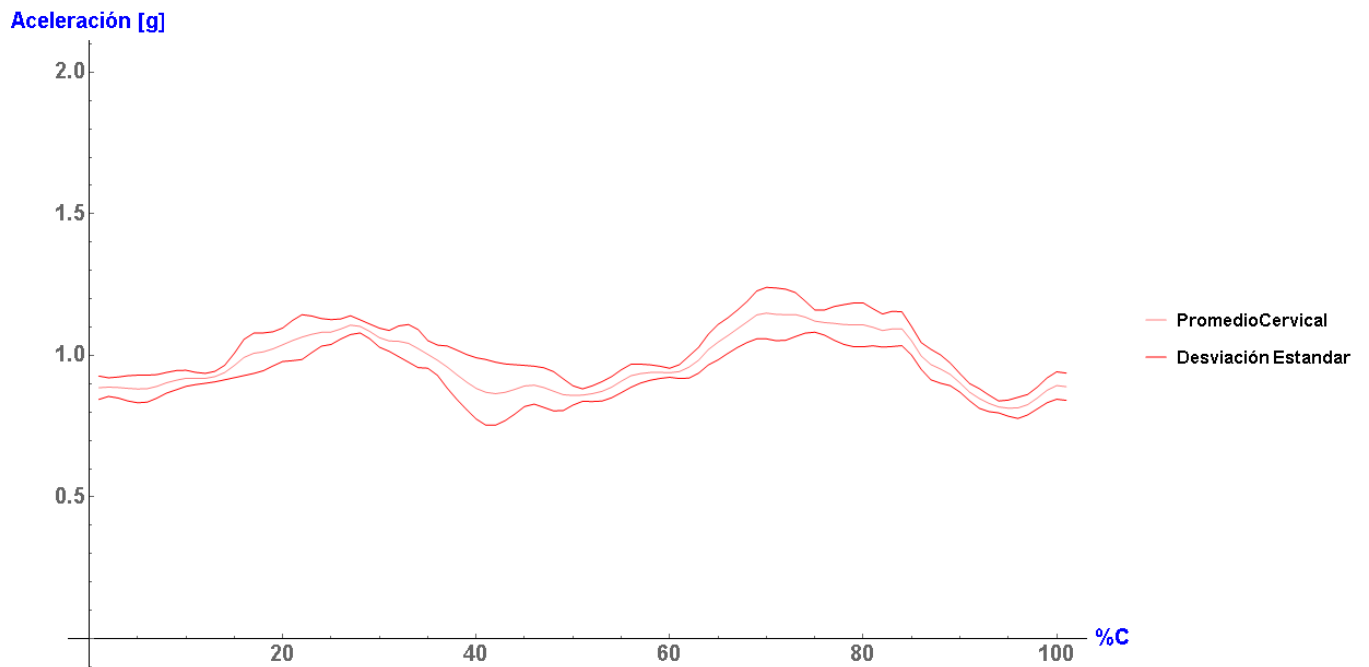


Figura B. 29 representación gráfica de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado del individuo 7 prueba H.



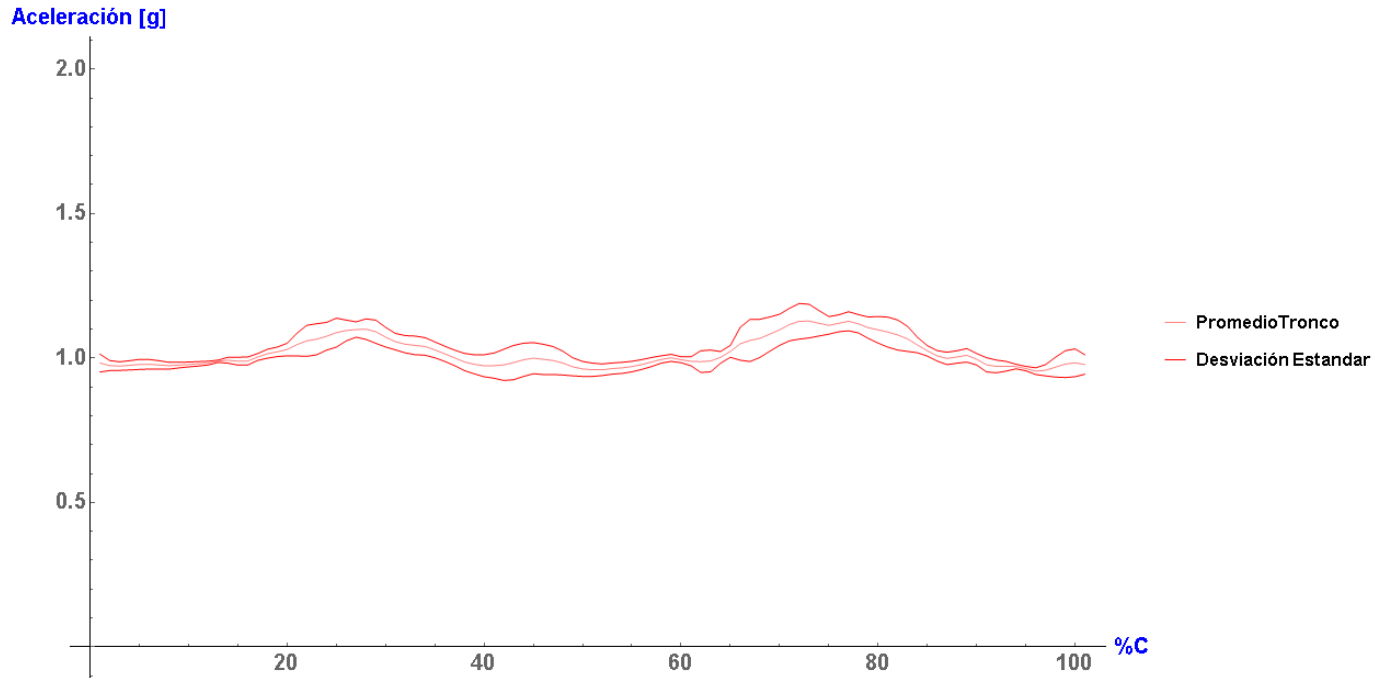


Figura B. 30 representación gráfica de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado del individuo 7 prueba H.

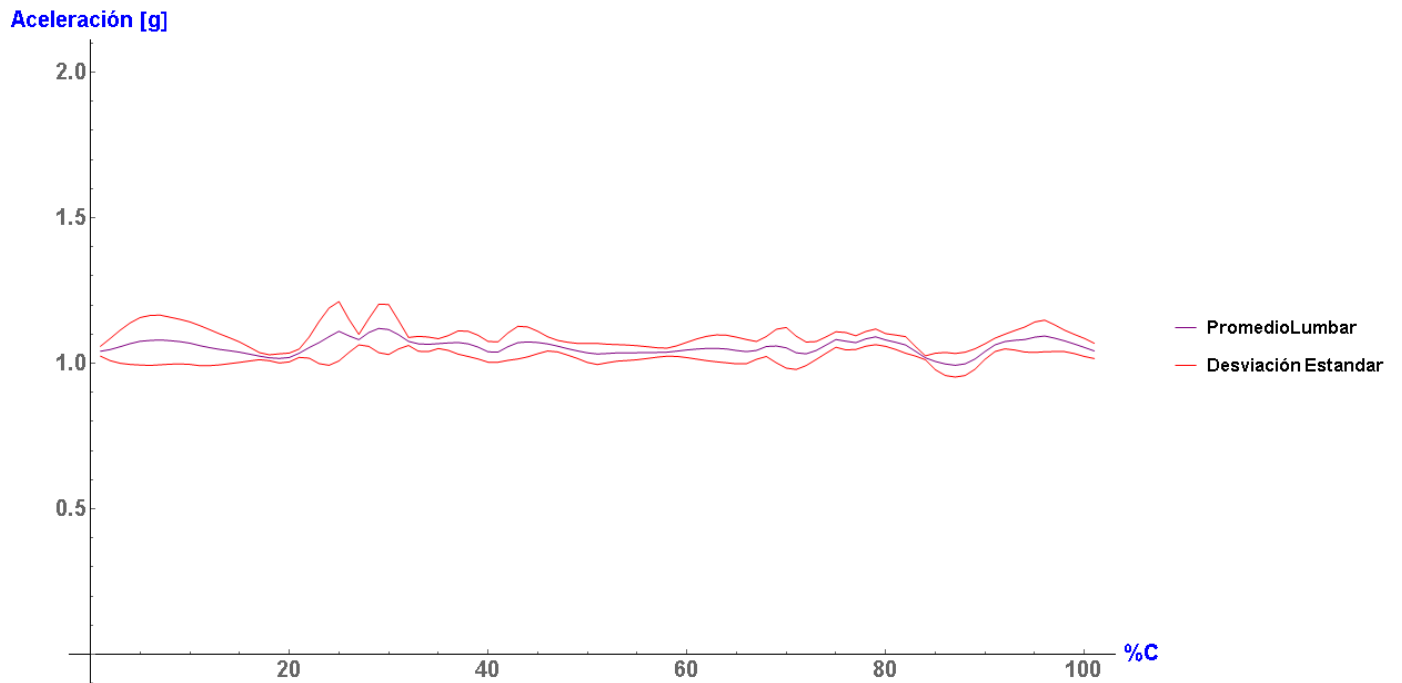


Figura B. 31 representación gráfica de la aceleración para la zona lumbosacra en el movimiento escardado del individuo 7 prueba H.

## Apéndice C

### Gráficos totales de la segunda experimentación

- **Resultados gráficos.**

Se plasma a continuación los resultados globales de todas las pruebas, unificando la técnica mediante la actuación de la aceleración en el ciclo del escardado.

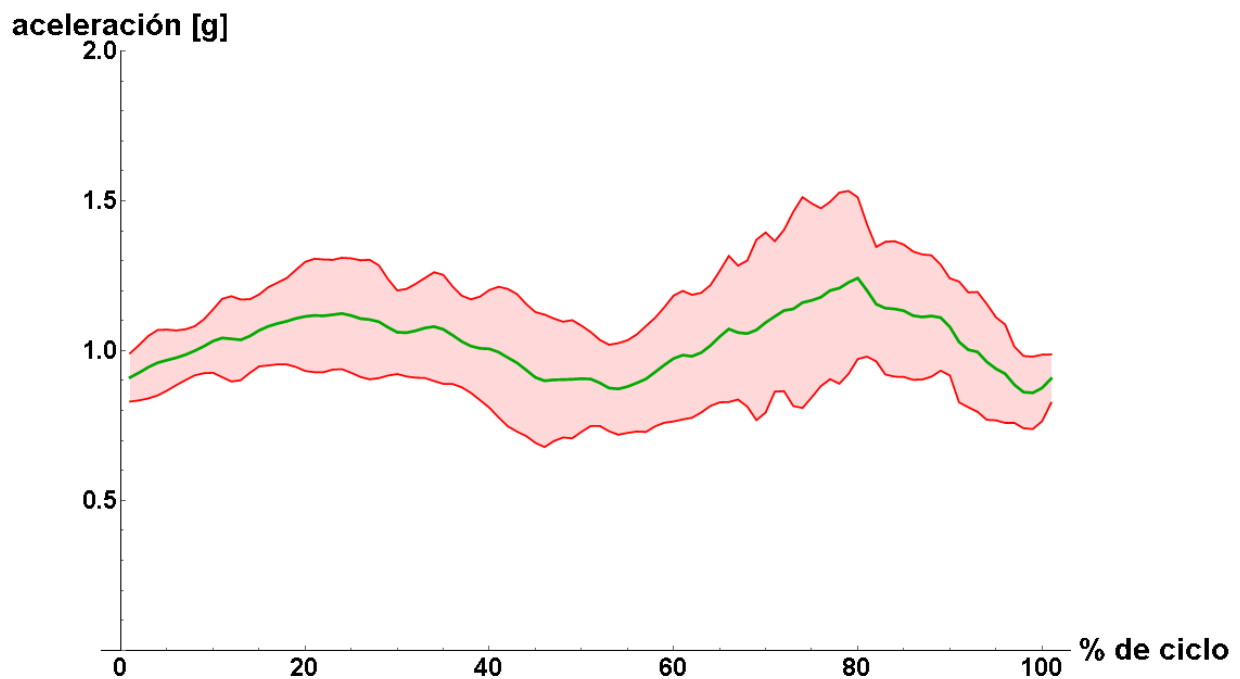


Figura D. 1 representación gráfica total de la aceleración para el centro de la cabeza en el movimiento escardado.

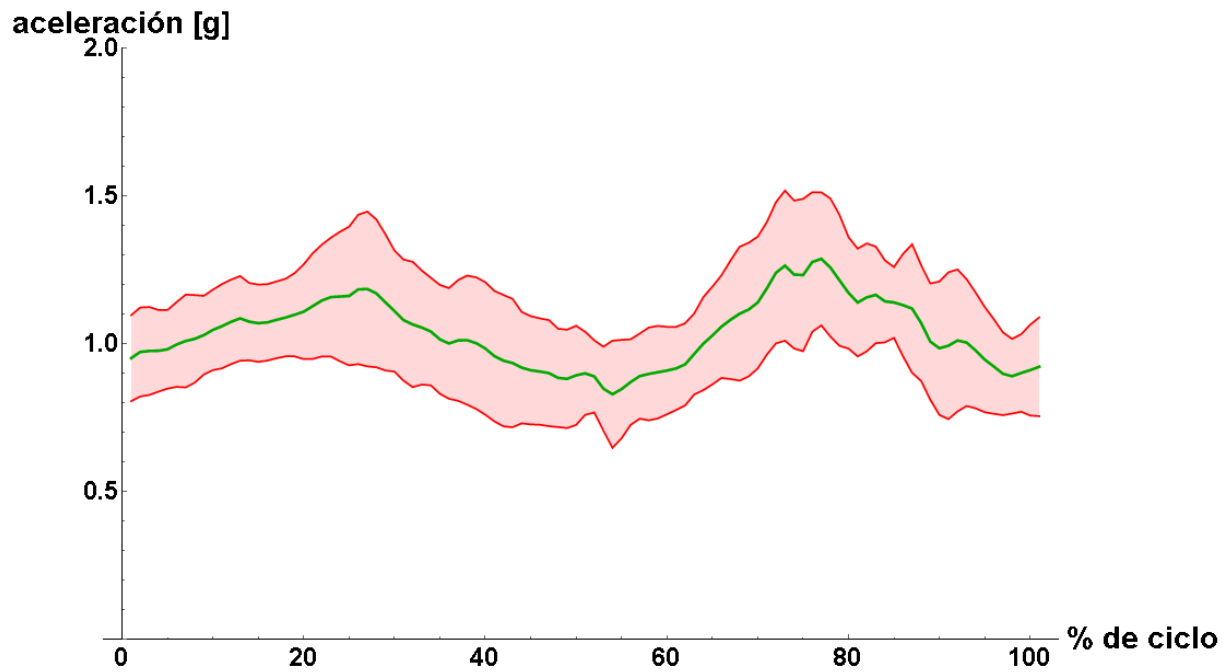


Figura D. 2 representación gráfica total de la aceleración para la cervical 7 en el movimiento escardado.

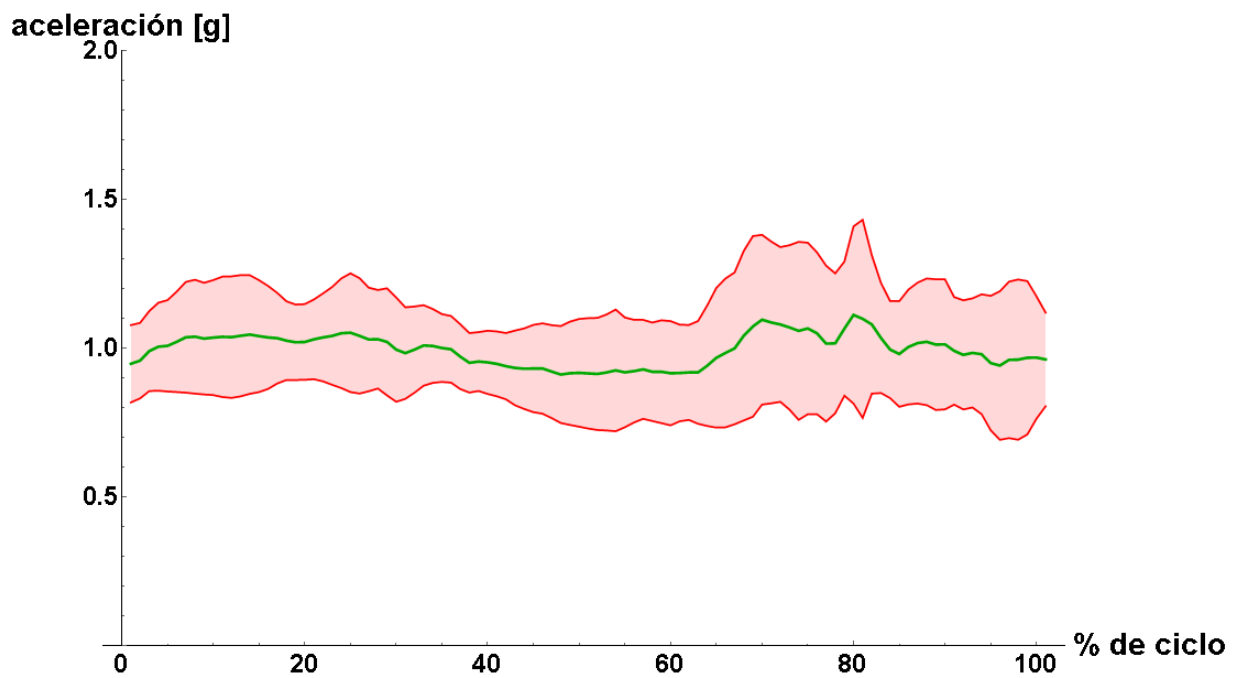


Figura D. 3 representación gráfica total de la aceleración para el centro del tronco en el movimiento escardado.

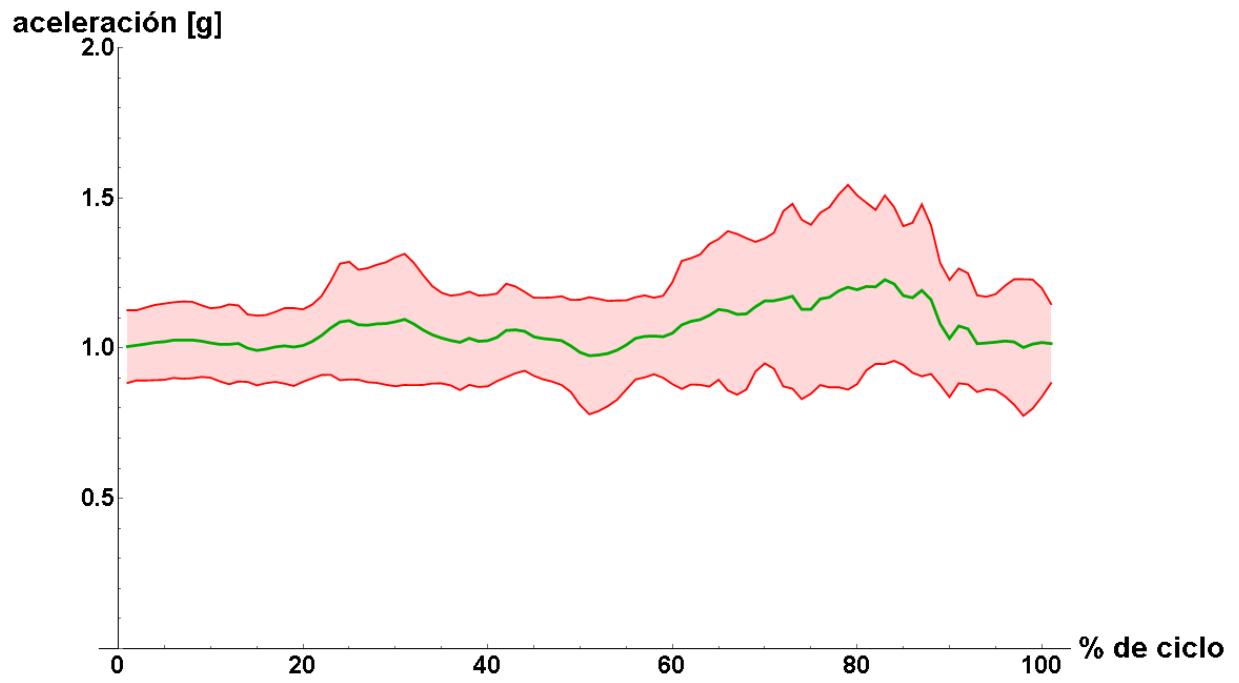


Figura D. 4 representación gráfica total de la aceleración para la zona lumbosacra en el movimiento escardado.

# Bibliografía

---

1. Prevention Work Team *Prevención de Riesgos Ergonómicos* 2007.
2. Andrés Felipe Trejos Ocampo, John Elkin Heredia Marín, *Estudio del Costo y Principales Causas del Ausentismo Laboral en las Empresas Afiliadas a la ANDI SECCIONAL RISARALDA-QUINDIO*, in *Facultad de Ingeniería Industrial*. 2010, Universidad Tecnológica de Pereira
3. Antonio López, *Diccionario Enciclopédico in Monitor*, CULTURAL, Editor. 2001: España.
4. *Diccionario de la Real Academia Española*
5. *Tomo 1*, in *Gran Enciclopedia Salvat*, Salvat editores, Editor. 2000. p. 69.
6. Oficina Internacional del Trabajo *Seguridad y Salud en la Agricultura*. 2000. 24.
7. José Manuel Salas Oroño, *TIPOS DE AGRICULTURAS Y TIPOS DE AGRICULTORES*, Universidad Nacional de Tucumán, Editor. 2007.
8. Dr. Matthew A. McMahon, Dr. Alberto Valdés, *ANÁLISIS DEL EXTENSIONISMO AGRÍCOLA EN MÉXICO SAGARPA*, Editor. 2011: México.
9. Peter Hurst, *Trabajadores agrícolas y su contribución a la agricultura y el desarrollo rural sostenibles*, OIT, Editor. 2007. p. 108.
10. Jaime Guarnan, Juan Lerdón, *CARACTERIZACION Y TIPIFICACION DE AGRICULTORES USUARIOS DEL CENTRO DE GESTION EMPRESARIAL DE PAILLACO*, Facultad de Ciencias Agrarias, Editor. 1998: Chile.
11. Instituto Regional de seguridad y salud en el trabajo, *Trastornos Musculo-Esqueléticos en el Trabajo*, Comunidad de Madrid, Editor.: España.
12. Dra. Barbara Griefhahn Dr. Alwin Luttman, *Prevención de los Trastornos Musculo-esqueléticos en el lugar de trabajo*. 5 ed, ed. Organización Mundial de la Salud. 2004.
13. Portal Multimedia para la promoción de la ergonomía en el sector agrario. *Categorías Profesionales*. 2015; Available from: [http://agrario.ibv.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=134](http://agrario.ibv.org/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=134).
14. MSA (Mutualité Sociale Agricole), *Le risqué d'accident dessalariés agricoles*, Le risqué d'accident dessalariés agricoles, Editor. 1996: Francia.
15. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, *Prevención de los trastornos musculoesqueléticos de origen laboral*, in *Revista de la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo*. 2001: Belgium.
16. Instituto Mexicano del Seguro Social, *Información sobre Accidentes y Enfermedades de Trabajo, Nacional 2004-2013*, Instituto Mexicano del Seguro Social, Editor. 2013: México.
17. Instituto Mexicano del Seguro Social, *Información sobre Accidentes y Enfermedades de Trabajo, Puebla 2004-2013*, Instituto Mexicano del Seguro Social, Editor. 2013: México.
18. Keith L. Moore, Arthur F. Dailey, *Anatomía con Orientación Clínica* séptima edición ed. 2013.
19. Kenneth Saladin, *ANATOMÍA, FISILOGÍA, La UNIDAD entre FORMA y FUNCIÓN*. sexta ed. 2013, México.
20. Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor H. Jacobo Armendáriz, Mtra. Yolanda Torres Pères, *Laboratorio de Ergonomía para Ingeniería Mecánica e Industrial*, PAPIME, Editor. 2009, UNAM, Facultad de Ingeniería: México.
21. Pérez de la Plaza, Fernández Espinosa, *Auxiliar de Enfermería*. sexta edición ed, ed. Mc Graw Hill. 2001, España.
22. Rocio Martín-Gil Parra, *Huesos y Músculos*, in *Anatomía Humana*.
23. Mosby's Nursing Consult. *Costocondritis*. 2015 [cited 2015; Available from: <http://www.nursingconsult.com/nursing/patient-education/print?rand=0.5&quickprint=true&handoutId=71362&docId=10087&instructions=&fmt=textImages&clr=fullColor&size=normal>.
24. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud del Trabajo. *Trastornos musculoesqueléticos en la agricultura*. 2015; Available from: <http://www.beswic.be/es/sector/agriculture/msds>.
25. Elisa March Leuba, *Rotoscopia y captura de movimiento. Una aproximación general a través de sus técnicas y procesos en la postproducción*, in *MÁSTER EN POSTPRODUCCIÓN DIGITAL*. 2013, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA: España. p. 103.

26. Anxo Beltrán Álvarez, et al. *MoCap (Captura de movimientos)*. 1:[Available from: <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/Peliculas/Mocap/index.htm>.
27. Ashish Sharma, Mukesh Agarwal, Anima Sharma, *MOTION CAPTURE PROCESS, TECHNIQUES AND APPLICATIONS*. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication 2013. 1: p. 8.
28. David John Sturman. *A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation*. 1999; 1:[Available from: [http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/animation/character\\_animation/motion\\_capture/history1.htm](http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/animation/character_animation/motion_capture/history1.htm).
29. Pedro Nogueira, *Motion Capture Fundamentals* Programa Doutoral em Engenharia Informática, 2011.
30. John Nicholls Anzola Mauricio Gómez , Daniel Barrero *Sistemas de Captura de Movimiento – EXOCAP 2003*. 5.
31. Devices Supported, *DRM103 Designer Reference Manual*. 2009.
32. Draft Federal Information Processing Standards Publication 183 *INTEGRATION DEFINITION FOR FUNCTION MODELING (IDEFO)*. 1993.
33. SUPERINTENDENCIA NACIONAL DE ADMINISTRACIÓN TRIBUTARIA, *Guía de referencia para el Uso del IDEFO*, NPDA - NSIGAD, Editor. 2011.
34. Dr. Jesus Manuel Dorador and R. I. M. Young *Application of IDEFO, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models*. COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING, 2000. **13**, 430-445.
35. Arabshahi S, Barton DC *Finite Elements in Analysis and Design*. Towards integrated design and analysis', 1991.
36. *Lista completa de articulaciones del cuerpo humano y su clasificación*. . Available from: [http://members.tripod.com/anatomia\\_usach/anatomia4.htm](http://members.tripod.com/anatomia_usach/anatomia4.htm).
37. Maria del Carmen Ramos Nava, *Guía para descarga y activación de Wolfram Mathematica*. 2015: Universidad Nacional Autónoma de México.
38. Edgar Lopategui Corsino, *Determinación del índice de masa corporal*. 2008.
39. Lucía Ferreira González, *Clasificación del sobrepeso y la obesidad*. 2008.
40. González Villalpando C, Morín R Rivera Dommarco, *Práctica Médica Efectiva, Obesidad en el adulto*. 2003. **5**.
41. Y. Rosales Ricardo, *Antropometría en el diagnóstico de pacientes obesos; una revisión*. 2012.