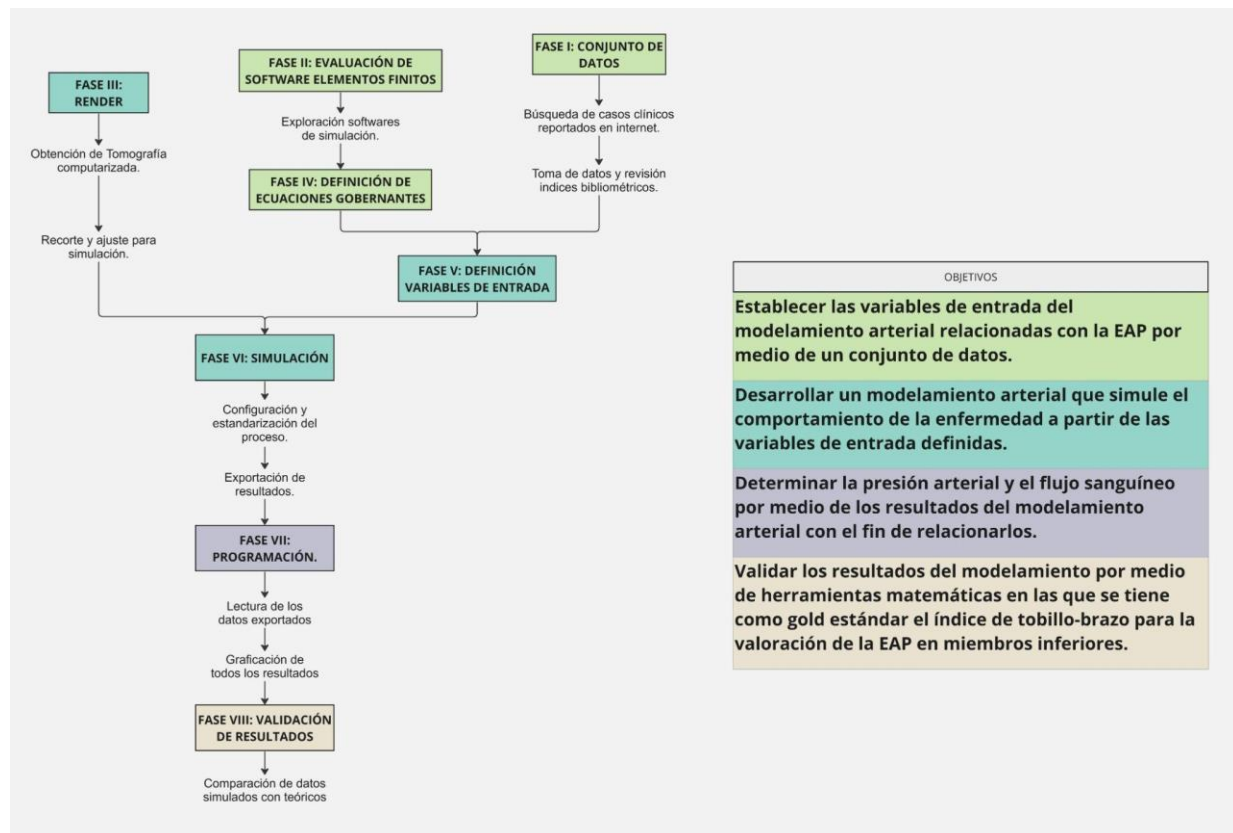


# DESARROLLO DE UN MODELAMIENTO REPRESENTATIVO DE LA OBSTRUCCIÓN ARTERIAL COMO HERRAMIENTA DE EXPLORACIÓN EN LA PROGRESIÓN DE LA ENFERMEDAD ARTERIAL PERIFÉRICA, POR MEDIO DE LA PRESIÓN ARTERIAL, EL ÍNDICE TOBILLO-BRAZO Y LA CURVA DE FLUJO SANGUÍNEO.

Valentina Castañeda Velasquez - Daniel Martínez Lara

## ANEXOS.

En el presente documento se expondrán los resultados a través de anexos, la mayoría de los cuales son hipervínculos que conducen al resultado correspondiente. Para comprender la relación entre estos resultados, se presenta una metodología compuesta por 8 fases interrelacionadas.



### FASE I: CONJUNTO DE DATOS

Se recopilaron casos clínicos de EAP con variables relevantes de 50 estudios de caso encontrados en revistas médicas, se analizaron estas revistas para su calidad y frecuencia de citación, además que solo se seleccionaron 11 casos para simulación, basándose en la inclusión de todas las variables necesarias las cuales son el Índice Tobillo-Brazo (ITB), el porcentaje de estenosis y la presión arterial (sistólica y diastólica).

Para observar el conjunto de los 50 casos clínicos ([Haga clic aquí](#)), los 11 casos clínicos con sus variables utilizadas son los siguientes (En el anexo de 50 casos clínicos están señalados con verde):

Caso	ITB	Estenosis	PA-Sistólica	PA-Diastólica
1	0.69	90%	140	100
2	0.5	90%	160	80
3	0.83	80%	160	90
4	0.75	90%	140	80
5	0.23	80%	160	74
6	0.69	70%	175	100
7	0.65	80%	122	80
8	0.8	70%	136	86
9	0.5	80%	130	90
10	0.4	90%	140	90
11	0.83	80%	160	90

## FASE II: EVALUACIÓN DE SOFTWARE ELEMENTOS FINITOS

Se evaluaron varios softwares de elementos finitos para simular el flujo sanguíneo arterial, considerando su capacidad para obtener resultados precisos y su compatibilidad con las ecuaciones y propiedades de los materiales involucrados. Se realizaron tutoriales de aplicación en ANSYS Engineering Simulation, COMSOL Multiphysics y SimVascular para evaluar sus capacidades. Después de considerar diversas opciones y realizar una matriz pugh, se eligió ANSYS como el software principal para el proyecto, los resultados de la matriz se observan a continuación.

	Ansysis	Comsol	SimVascular
Puntuación Total	51	41	41
Puntuación Total ponderada	108	87	83

Para observar la matriz ([Haga clic aquí](#))

## FASE III: RENDER

Al obtener el render se enfrentó a desafíos con el tamaño del modelo y la calidad de la malla. Finalmente, se decidió modelar solo la arteria femoral para cumplir con los límites de nodos de ANSYS Student, además de haber conseguido un render obtenido a través de tomografía computarizada. Se realizaron obstrucciones en diferentes porcentajes para simular la progresión de la enfermedad. Luego, se procedió al mallado del modelo, definiendo las condiciones de frontera y el tamaño de los elementos para lograr resultados confiables y optimizar el consumo computacional, este último requisito de mallado se basó en un protocolo de pruebas realizado.

Los renders que se colocarán en el siguiente enlace son únicamente compatibles con SpaceClaim de ANSYS debido a su formato único (Haga\_clic\_aquí).

Para observar el protocolo de pruebas de geometría y mallado (Haga\_clic\_aquí).

#### FASE IV: DEFINICIÓN DE ECUACIONES GOBERNANTES

En esta sección de la metodología, se aborda la aplicación de la teoría físico-matemática al modelo de simulación arterial desarrollado. Se detallan las ecuaciones gobernantes, incluyendo la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes, adaptadas para modelar la sangre como un fluido incompresible no newtoniano. Se explica el modelo de Carreau utilizado para modelar la viscosidad de la sangre, así como el modelo de Windkessel para simular el flujo pulsátil en las arterias.

Para descargar la UDF del modelo de Windkessek (Haga clic aquí)

#### FASE V: DEFINICIÓN VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada en la simulación arterial son el porcentaje de estenosis, la presión arterial sistólica braquial y el área total de superficie del dominio del fluido. Se ajustan directamente en ANSYS Fluent mediante pruebas sucesivas. Es esencial verificar y convertir las unidades de medida para obtener resultados precisos.

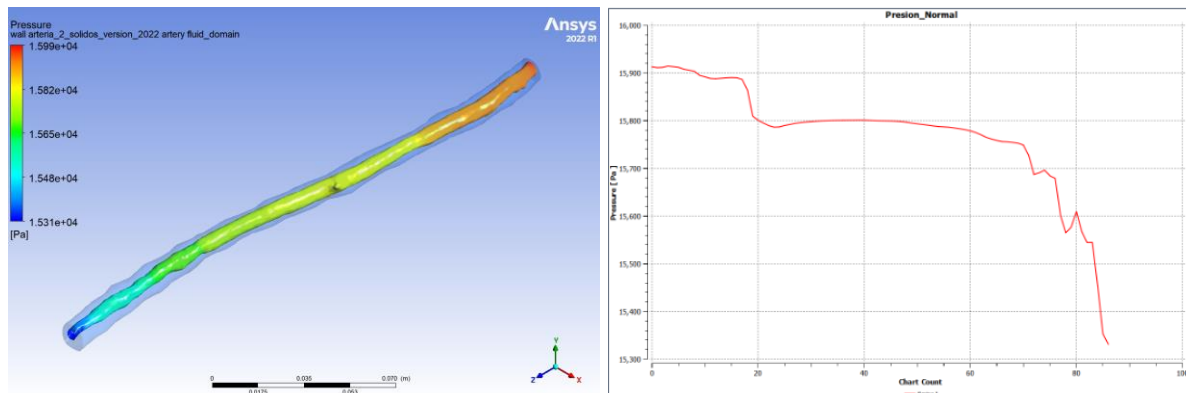
#### FASE VI: SIMULACIÓN.

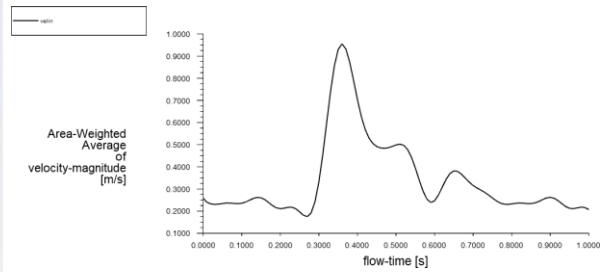
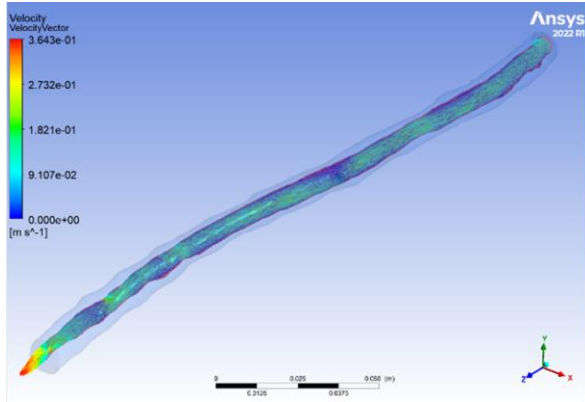
Se realizaron 42 simulaciones divididas en dos grupos: porcentaje de estenosis y casos clínicos. Cada grupo incluyó simulaciones con presión y velocidad como condiciones de frontera de entrada.

Se obtuvieron 106 resultados gráficos, sin embargo, a modo de prueba solo se seleccionaron los respectivos a estenosis del 0% y 90%. La evaluación de la calidad de las simulaciones se basó en un protocolo de pruebas de simulación que se encuentra en el siguiente enlace (Haga clic aquí).

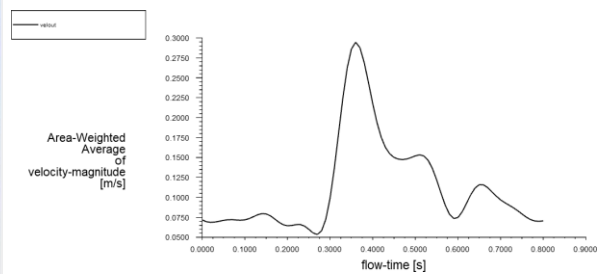
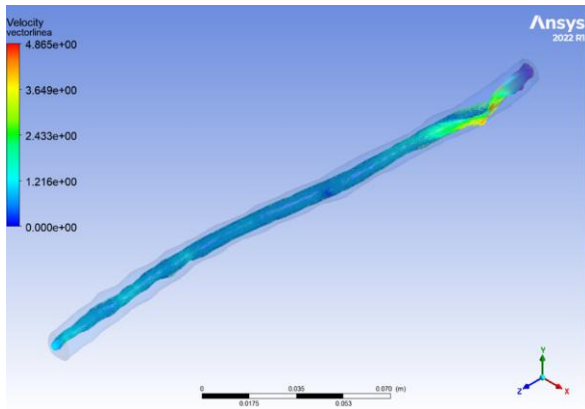
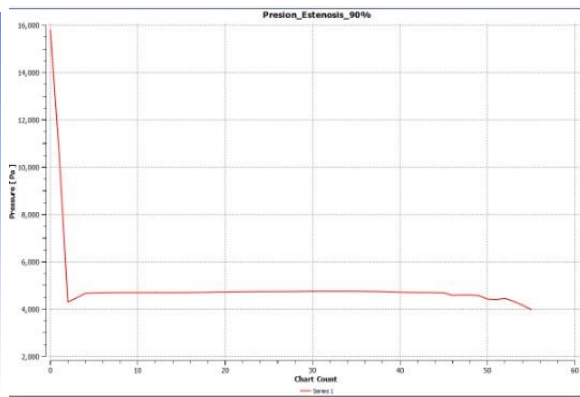
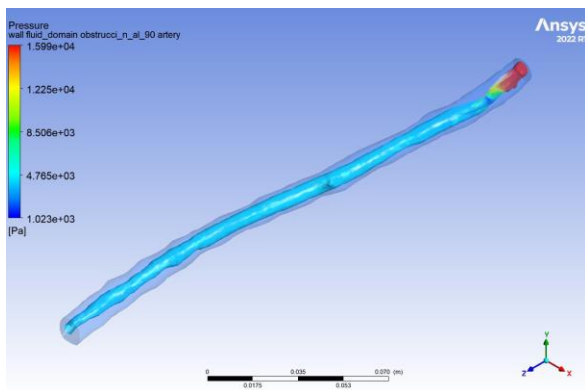
Los resultados obtenidos son: Mapa de colores representativo de presión, Gráfica de presión a lo largo de la arteria, Mapa de colores representativo de velocidad, Vídeo del comportamiento de flujo sanguíneo, Gráficas de flujo sanguíneo entrada y salida.

#### Estenosis 0%





## Estenosis 90%



Si bien en las imágenes anteriores no se observan bien, a continuación, se ponen todos los enlaces para observar todos los resultados de cada simulación.

## SIMULACIONES DE ESTENOSIS

- 0% (Haga\_clic\_aquí)
- 10% (Haga\_clic\_aquí)
- 20% (Haga\_clic\_aquí)
- 30% (Haga\_clic\_aquí)
- 40% (Haga\_clic\_aquí)

- 50% (Haga\_clic\_aquí)
- 60% (Haga\_clic\_aquí)
- 70% (Haga\_clic\_aquí)
- 80% (Haga\_clic\_aquí)
- 90% (Haga\_clic\_aquí)

### **SIMULACIONES CASOS CLÍNICOS**

- Caso 1 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 2 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 3 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 4 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 5 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 6 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 7 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 8 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 9 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 10 (Haga\_clic\_aquí)
- Caso 11 (Haga\_clic\_aquí)

### **FASE VII: PROGRAMACIÓN.**

Python es la opción preferida para analizar resultados de simulación con ANSYS debido a su compatibilidad con librerías específicas, facilidad de manipulación de datos y flexibilidad en análisis. MATLAB también es viable pero más exigente en hardware y de pago. C tiene limitaciones en lectura de archivos CSV y carece de soporte específico para ANSYS, los resultados de la matriz pugh se ven a continuación:

	Matlab	Python	C
Puntuación Total	311	40	22
Puntuación Total ponderada	56	78	46

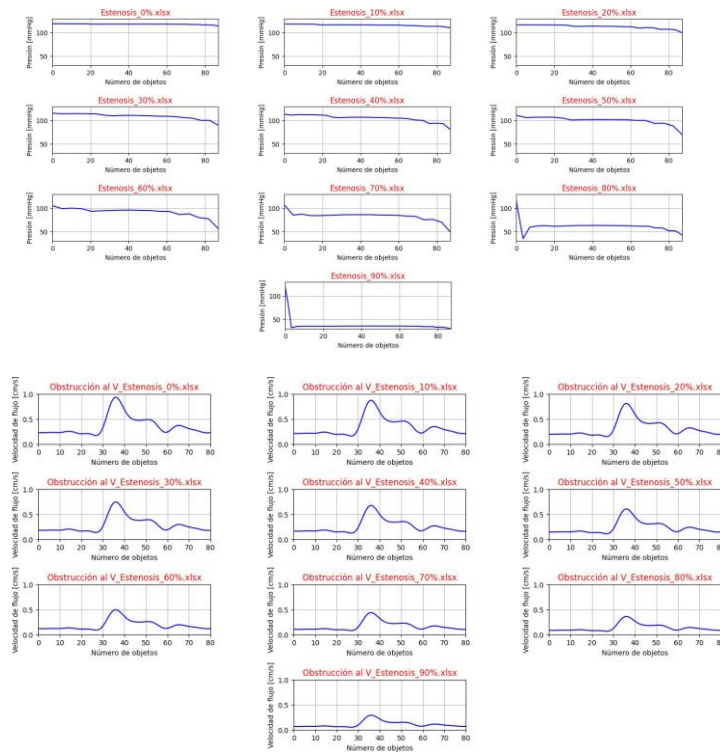
Para observar la matriz completa (Haga\_clic\_aquí).

De las 11 simulaciones de casos clínicos y 10 de porcentaje de estenosis, al ser una gran cantidad de resultados se decidió exportar los datos de ANSYS para poder visualizarlos de una mejor manera y cambiar unidades en caso de ser necesario.

Si se desea ejecutar la programación se debe seguir el enlace proporcionado y descargar todos los documentos contenidos en la carpeta designada. Una vez completada la descarga, se deberá ejecutar en Python el archivo denominado "Programación General".

- Porcentaje de estenosis: para descargar o observar directamente la programación realizada (Haga\_clic\_aquí), en caso de querer ejecutar la programación y observar los resultados obtenidos (Haga\_clic\_aquí).
- Casos clínicos: para descargar o observar directamente la programación realizada (Haga\_clic\_aquí), en caso de querer ejecutar la programación y observar los resultados obtenidos (Haga\_clic\_aquí).

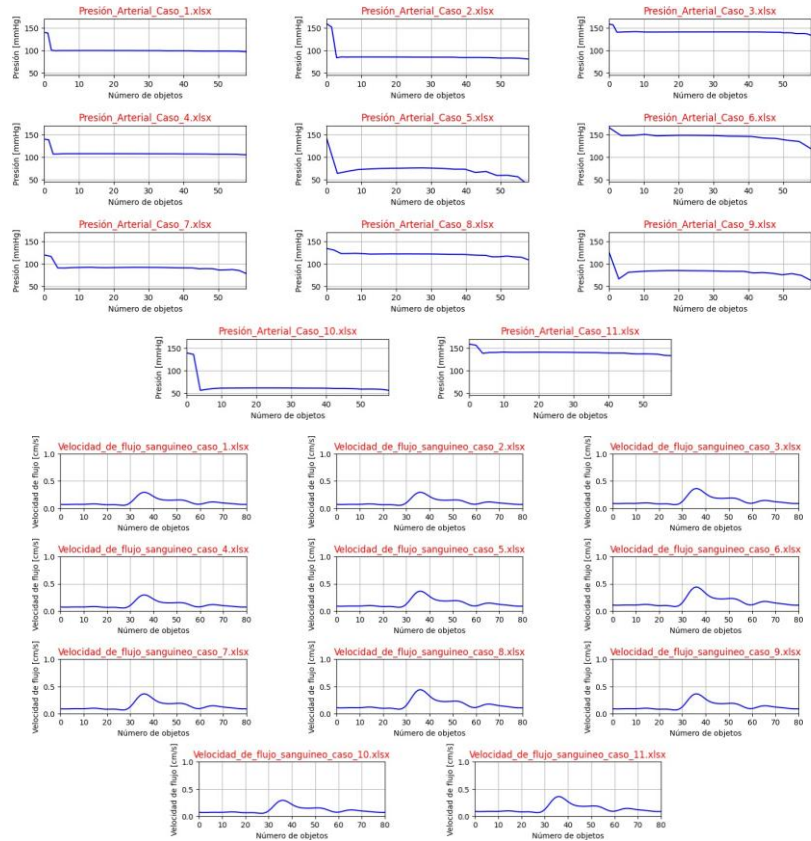
## Resultados programación obtenidos para Estenosis



El Estenosis\_0%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 114.996 mmHg  
 El Estenosis\_10%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 110.434 mmHg  
 El Estenosis\_20%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 100.011 mmHg  
 El Estenosis\_30%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 89.862 mmHg  
 El Estenosis\_40%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 80.718 mmHg  
 El Estenosis\_50%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 69.859 mmHg  
 El Estenosis\_60%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 56.234 mmHg  
 El Estenosis\_70%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 49.704 mmHg  
 El Estenosis\_80%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 42.630 mmHg  
 El Estenosis\_90%.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 29.857 mmHg

El Estenosis\_0%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.96  
 El Estenosis\_10%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.92  
 El Estenosis\_20%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.83  
 El Estenosis\_30%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.75  
 El Estenosis\_40%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.67  
 El Estenosis\_50%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.58  
 El Estenosis\_60%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.47  
 El Estenosis\_70%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.41  
 El Estenosis\_80%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.36  
 El Estenosis\_90%.xlsx, Tiene un ITB de: 0.25

## Resultados programación obtenidos para Casos clínicos



El Presión\_Arterial\_Caso\_1.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 96.663 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_2.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 80.352 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_3.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 133.263 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_4.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 105.009 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_5.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 36.805 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_6.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 118.421 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_7.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 78.330 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_8.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 108.676 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_9.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 62.971 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_10.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 56.083 mmHg  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_11.xlsx, Tiene una presión arterial después de la obstrucción de: 133.087 mmHg

El Presión\_Arterial\_Caso\_1.xlsx, Tiene un ITB de: 0.69  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_2.xlsx, Tiene un ITB de: 0.5  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_3.xlsx, Tiene un ITB de: 0.83  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_4.xlsx, Tiene un ITB de: 0.75  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_5.xlsx, Tiene un ITB de: 0.23  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_6.xlsx, Tiene un ITB de: 0.68  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_7.xlsx, Tiene un ITB de: 0.64  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_8.xlsx, Tiene un ITB de: 0.8  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_9.xlsx, Tiene un ITB de: 0.48  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_10.xlsx, Tiene un ITB de: 0.4  
 El Presión\_Arterial\_Caso\_11.xlsx, Tiene un ITB de: 0.83

La interfaz gráfica en cuestión tiene un manual de usuario el cuál explica cómo descargar e instalar la misma para verlo ([Haga clic aquí](#)).  
 En caso de necesitar el link directo de descarga este se encuentra ([Haga clic aquí](#)), además de un video con comprobación del funcionamiento de la interfaz.

**PROGRESIÓN DE LA ENFERMEDAD ARTERIAL PERIFÉRICA**

La presente herramienta comprende una serie de resultados de simulaciones realizadas a un modelamiento arterial representativo de la EAP, con el fin de explorar la progresión de la enfermedad, por medio de la presión arterial, el ITB y la curva de flujo sanguíneo.

LA EAP refiere a una enfermedad arterosclerótica que afecta principalmente a las arterias que suministran sangre a las extremidades.

Esta enfermedad afecta a millones de personas en el mundo, donde aproximadamente el 50% no son diagnosticadas, debido a que no se presenta una sintomatología específica.



**Iniciar**

Castañeda V & Martínez D

**PROGRESIÓN DE LA ENFERMEDAD ARTERIAL PERIFÉRICA**

La progresión de la enfermedad arterial periférica (EAP) está estrechamente relacionada con el grado de estenosis en las arterias afectadas.

Por ello, en cada recuadro encontrará los resultados relacionados con cada grado de obstrucción, desde el 0% al 90%.

10 %  
20 %  
30 %  
40 %  
50 %

60 %  
70 %  
80 %  
90 %

**Inicio** **Casos Clínicos**

Castañeda V & Martínez D

**CASOS CLÍNICOS**

Este apartado de casos clínicos comprende a los resultados de simulaciones en las que se tuvo en cuenta las variables de casos clínicos reales, con el fin de correlacionar la progresión de la enfermedad.

Los casos presentan obstrucciones mayores al 70%.

Caso 1  
Caso 2  
Caso 3  
Caso 4  
Caso 5

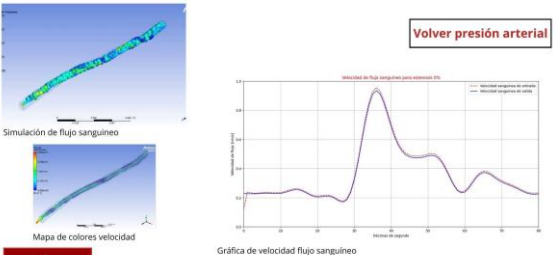
Caso 6  
Caso 7  
Caso 8  
Caso 9  
Caso 10  
Caso 11

**Inicio** **Grado Estenosis**

Castañeda V & Martínez D

**Estenosis 0%**

**Flujo sanguíneo**



Simulación de flujo sanguíneo

Mapa de colores velocidad

**Volver**

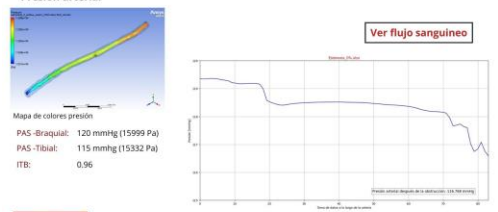
**Volver presión arterial**

Gráfica de velocidad flujo sanguíneo

Castañeda V & Martínez D

**Estenosis 0%**

**Presión arterial**



Mapa de colores presión

PAS - Braquial: 120 mmHg (15999 Pa)  
PAS - Tibial: 115 mmHg (15332 Pa)  
ITB: 0.96

**Volver**

**Ver flujo sanguíneo**

Gráfica de presión arterial a lo largo del modelo

Castañeda V & Martínez D

**FASE VIII: VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

El proyecto utilizó métodos cuantitativos (coeficiente de correlación de Spearman) y cualitativos (opiniones de profesionales) para validar y analizar resultados de simulación sobre la Enfermedad Arterial Periférica (EAP).

Se encontraron correlaciones significativas entre datos teóricos y simulados, especialmente en relación con el Índice Tobillo-Brazo (ITB) y la presión arterial. Los profesionales valoraron positivamente la herramienta utilizada para explorar la progresión de la EAP, destacando la necesidad de una interfaz amigable y considerando una mayor variabilidad en las simulaciones. El análisis de simulación mostró comportamientos esperados en arterias con estenosis variada, como cambios en el gradiente de presión y la velocidad del flujo sanguíneo, utilizando representaciones visuales como mapas de colores y gráficos para interpretar estos fenómenos mecánicos.

Para observar los datos de entrada utilizados en la correlación de Spearman (Haga clic aquí) y para ver los datos de salida de la correlación (Haga clic aquí)

Para observar y descargar la programación utilizada para obtener la gráfica de correlación (Haga clic aquí)



Para ver los resultados del formulario de usabilidad de interfaz médica ([Haga clic aquí](#))

Para ver y descargar el Protocolo de Pruebas de Usabilidad. ([Haga clic aquí](#))