



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**“Diseño e implementación de un sistema automático de  
captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales  
3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con  
cámaras DSLR”**

**Autor:**

Torres Carrión, Carlos Luis

**Director:**

Msc. Gordón Garcés, Andrés Marcelo



# RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en el diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR, este sistema permite, con objetos de hasta 20mm, deducir el número de fotografías necesarias para realizar un apilamiento de enfoque y realizar de forma automática tanto el movimiento de la cámara como la captura de la fotografía, esto, hasta obtener el número de imágenes calculadas según: la dimensión del objeto, la apertura del diafragma en el que se obtenga mayor nitidez con una profundidad de campo aceptable, el factor de magnificación y el círculo de confusión.

Con estas imágenes se procede a realizar apilamiento de enfoque y posteriormente reconstrucción tridimensional mediante fotogrametría para obtener el modelo digital del objeto estudiado, su forma, color y textura.

Para el correcto funcionamiento del sistema se requiere tener un espacio con una luz distribuida de manera uniforme sobre el objeto, la iluminación y todos los componentes son controlados por un HMI de manera que se tenga un proceso automático, cómodo para el usuario, estético y robusto.



# Planteamiento del problema

## Problemas:

A lo largo de la historia se ha tenido la necesidad de replicar y reproducir de una u otra forma objetos de interés, y las formas de hacerlo han ido cambiando.

En la actualidad la evaluación de formas tridimensionales por distintos métodos juega un papel muy importante gracias a su naturaleza no invasiva y al amplio rango de campos de observación, resolución y precisión que ofrecen. Por esta razón es una herramienta importante actualmente utilizada en aplicaciones industriales. (Robayo et al., 2003)

La rápida evolución de los sistemas de fabricación y los ciclos de vida de los productos cada vez más cortos, sistemas diseñados por terceros de los cuales no se tenga los diseños originales, la necesidad de replicar objetos ya existentes, hace que la reconstrucción tridimensional se encuentre como una solución efectiva para este problema. (Parras et al., 2016)



# Planteamiento del problema

## Problemas:

Si se requiere estudiar objetos tales como piezas de maquetería, joyería, de producción artesanal, entre otros en los cuales los detalles no se pueden percibir fácilmente, se requiere técnicas que ayuden a la reconstrucción 3D de objetos de tamaño reducido.

Si los objetos a estudiar son relativamente pequeños como para que todo se pueda apreciar a simple vista, es necesario un equipo de fotografía que permita exponer pormenores que en otro momento se ignoran, aquí se puede mencionar al campo de fotografía denominado macrofotografía que es uno de los géneros más espectaculares porque revela detalles que incluso el ojo humano es incapaz de percibir. (Carrasco Jurado, 2017)

Para realizar reconstrucción 3D de objetos de tamaño reducido se requiere que el objeto estudiado por macrofotografía se encuentre completamente enfocado por este motivo se debe utilizar la técnica de apilamiento de enfoque para conseguirlo.



# Objetivos

## Objetivo General:

- Diseñar e implementar un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.



# Objetivos

## Objetivos específicos:

- Investigar el estado actual de la tecnología basado en la recolección de información a través de publicaciones e información técnica de los robots móviles para obtener parámetros de diseño
- Diseñar la estructura, dimensionando y seleccionando materiales de forma adecuada el cual permita trasladar un kilogramo de peso
- Modelar el robot móvil diferencial considerando el centro de masa de la plataforma como punto de interés para la obtención de la representación matemática del sistema
- Desarrollar los esquemas de control basados en algoritmos tradicionales e inteligentes para tareas de navegación autónoma y transporte de un robot móvil en espacios de trabajos parcialmente estructurados
- Validar la hipótesis a través de pruebas experimentales virtuales y reales con el objetivo de comprobar el desempeño de los algoritmos de control propuestos.



# Objetivos

## Objetivos específicos:

- Investigar y recopilar información de los equipos a utilizarse en el sistema automático de captura de imágenes, además de la fundamentación teórica de las técnicas de reconstrucción tridimensional y la técnica de apilamiento de enfoque, para delimitar los equipos a utilizar y determinar el tamaño de los objetos a estudiarse.
- Diseñar la parte mecánica y electrónica del sistema automático de captura de imágenes, para reconstruir modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.
- Utilizar la técnica de apilamiento de enfoque para generar imágenes plenamente nítidas del objeto de estudio.
- Realizar la reconstrucción tridimensional utilizando un software que permita realizar fotogrametría, para obtener la reconstrucción 3D de objetos seleccionados para el estudio.
- Realizar pruebas de reconstrucción tridimensional, utilizando el sistema automático de captura de imágenes.



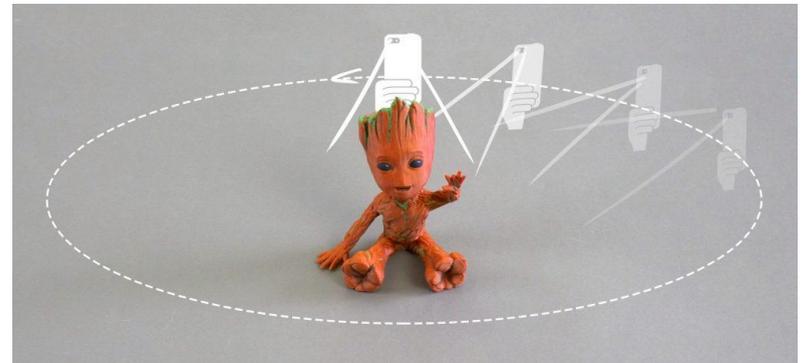
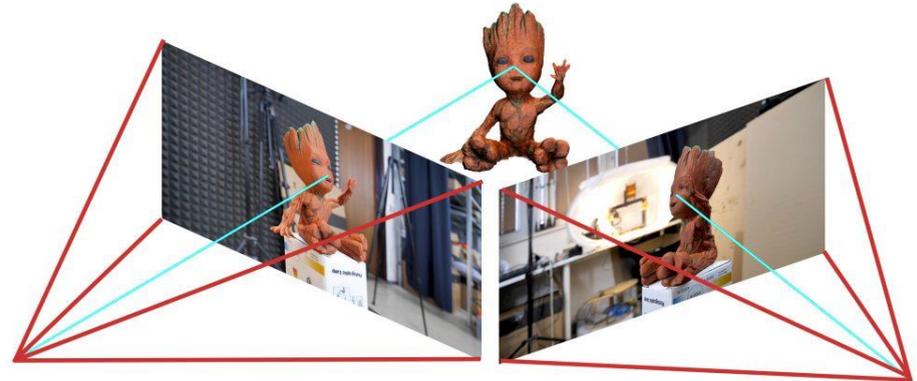
# MARCO TEÓRICO

## Reconstrucción tridimensional



Modelo en 3 dimensiones

## Fotogrametría



¿Cómo se hace?



# MARCO TEÓRICO

## DSLR

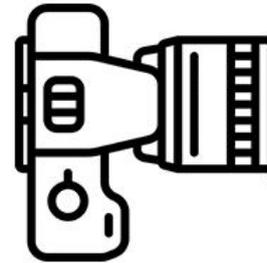


## Macrofotografía



## Apilamiento de enfoque

Foco fijo y variación de distancia



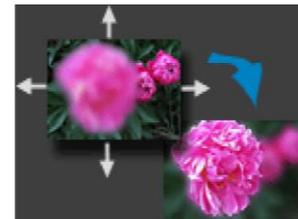
Zona de foco



Foto 1



1. Captura



2. Alineado



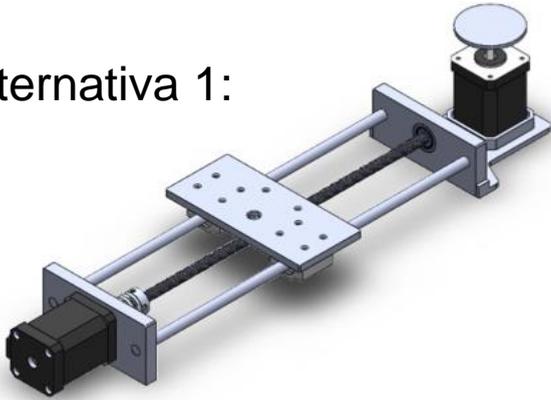
3. Unión



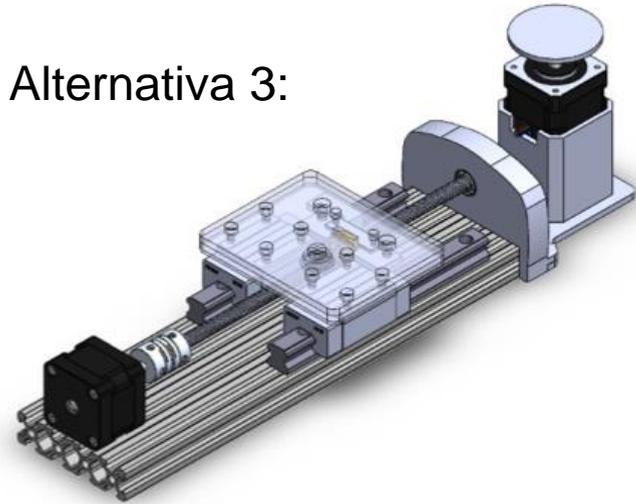
# Selección de componentes

## Carril de enfoque

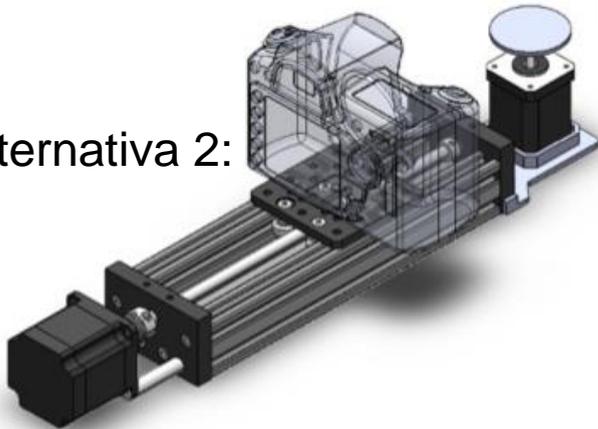
Alternativa 1:



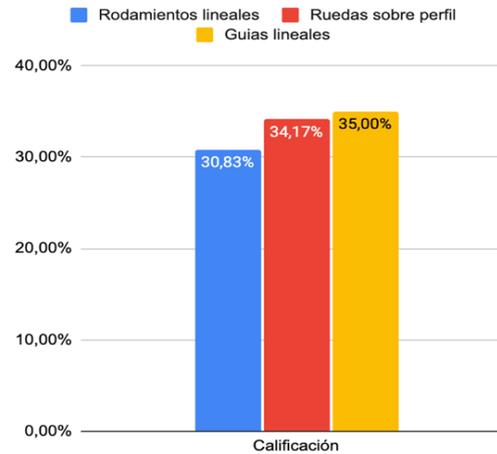
Alternativa 3:



Alternativa 2:



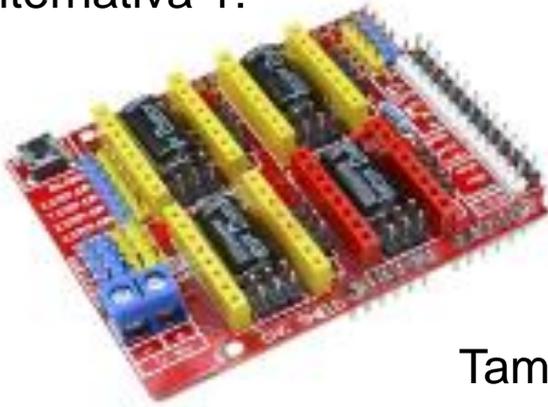
Holgura > Implementación > Disponibilidad > Costo



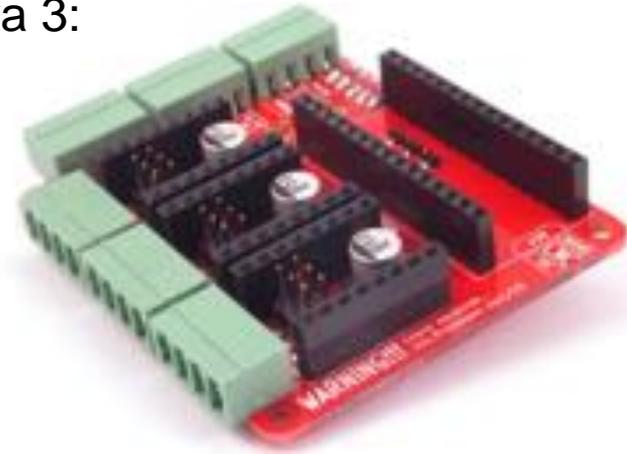
# Selección de componentes

## Tarjeta controladora

Alternativa 1:

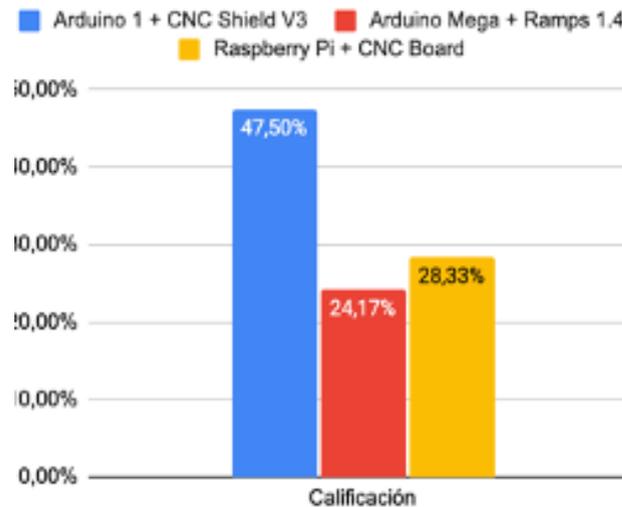


Alternativa 3:



Tamaño > Costo > Facilidad de programación > Disponibilidad

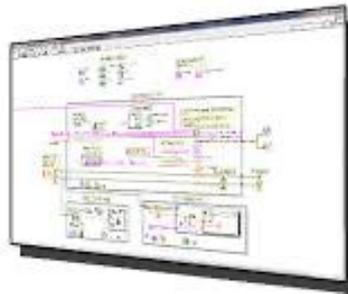
Alternativa 2:



# Selección de componentes

## HMI

Alternativa 1:

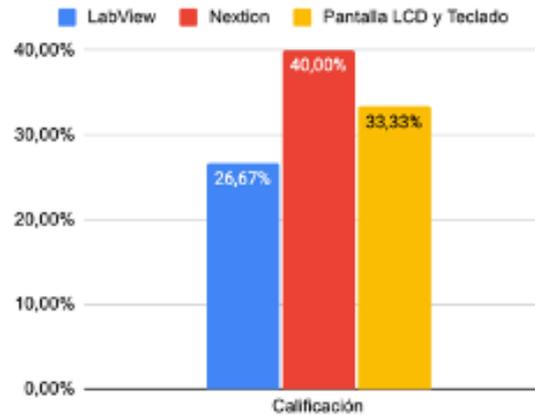


Alternativa 3:



Alternativa 2:

Autonomía del sistema > Tamaño > Usabilidad > Costo



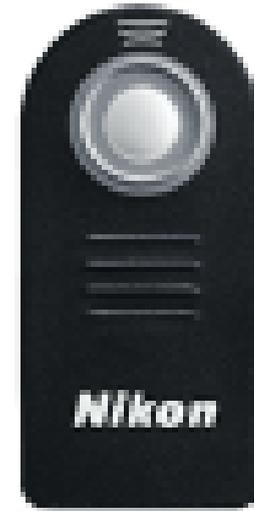
# Selección de componentes

## Captura de imágenes

Alternativa 1:



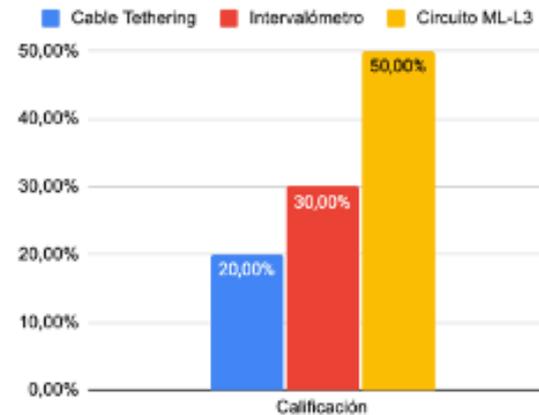
Alternativa 3:



Alternativa 2:

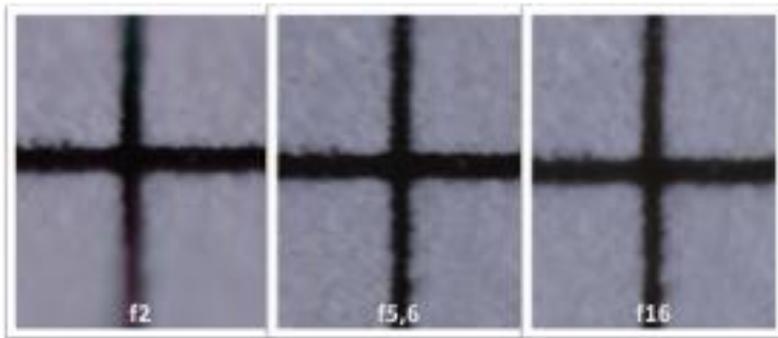
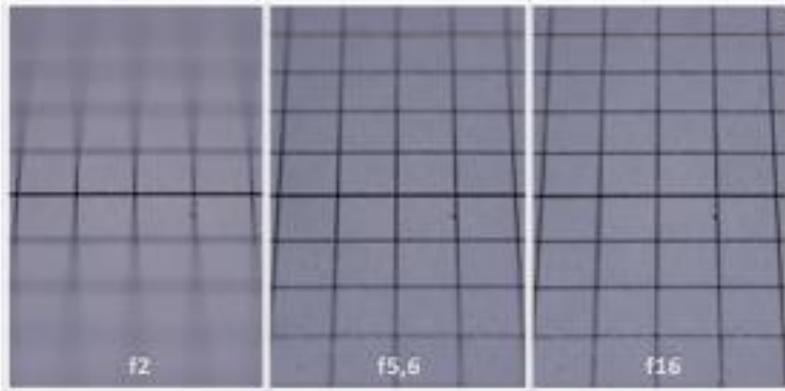


Compacto > Autonomía > Usabilidad > Costo

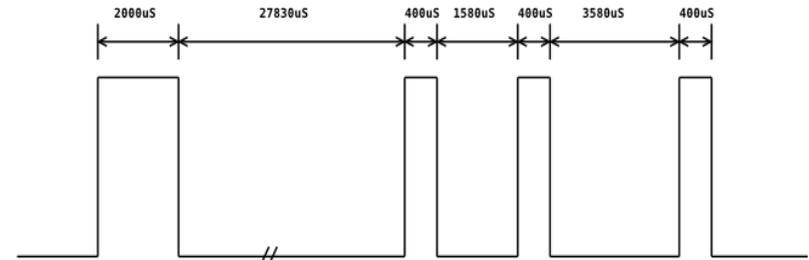
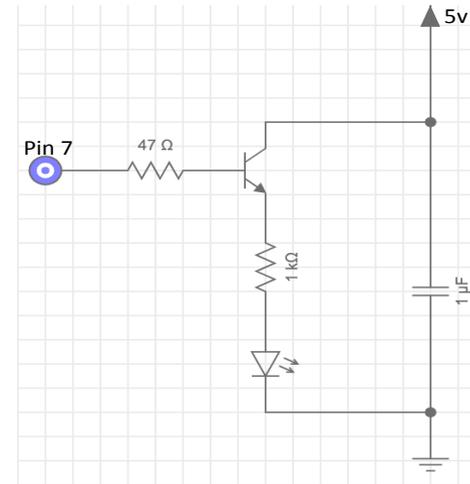


# Selección de componentes

Apertura efectiva del diafragma.



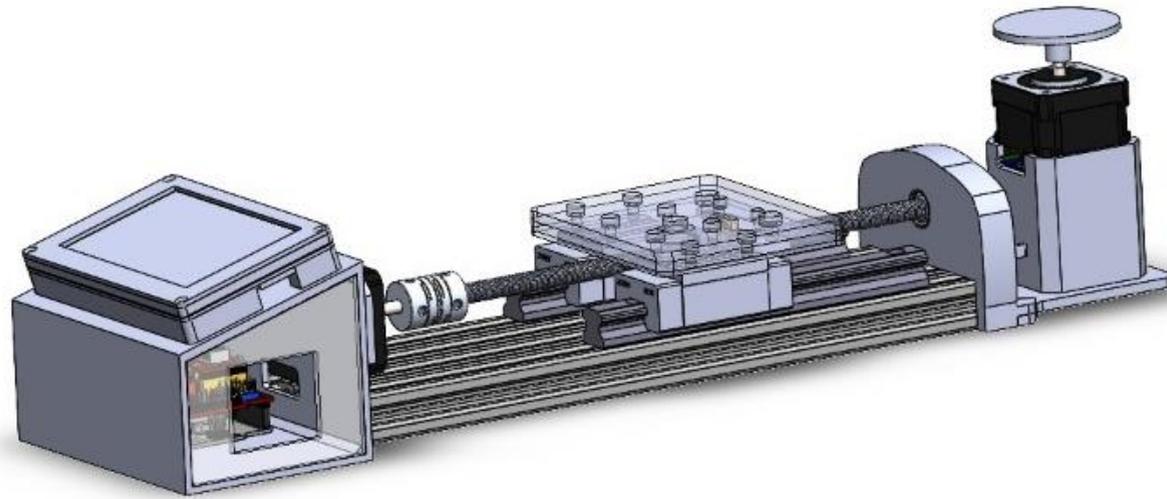
Captura de la trama



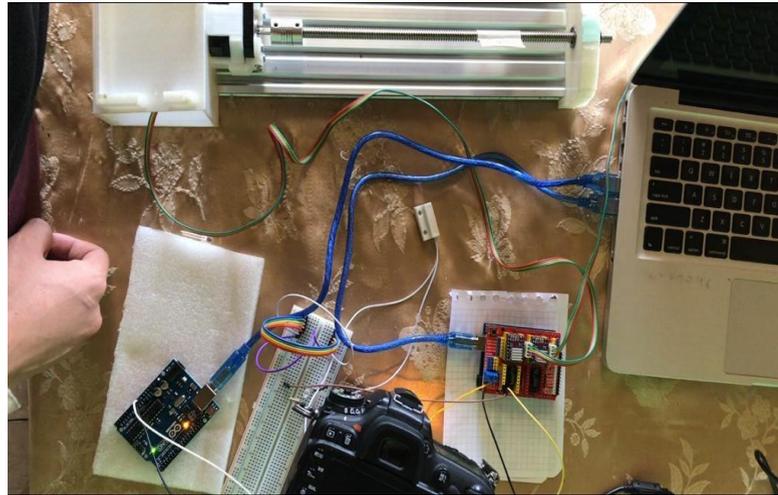
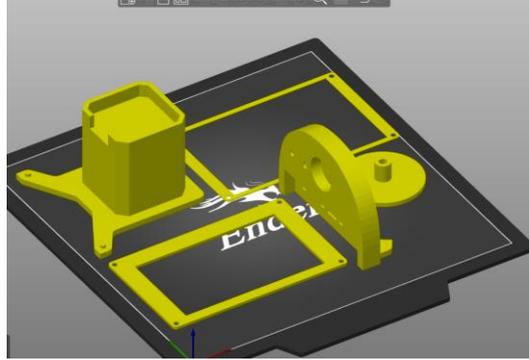
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Selección de componentes

## Diseño Final

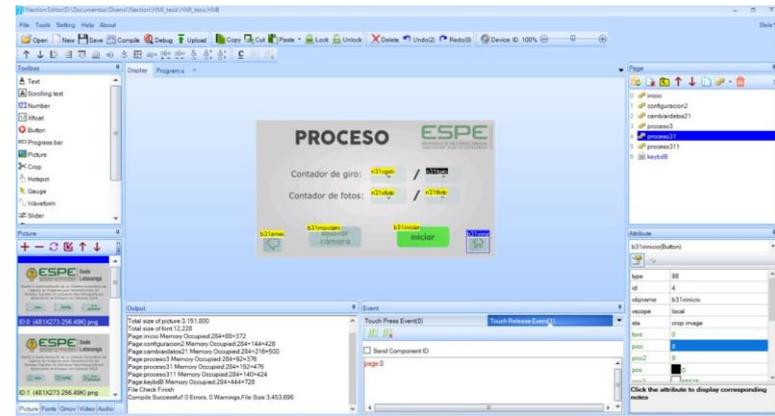
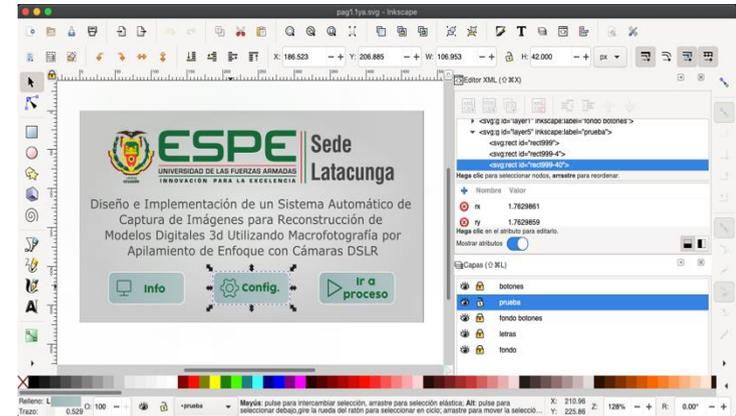
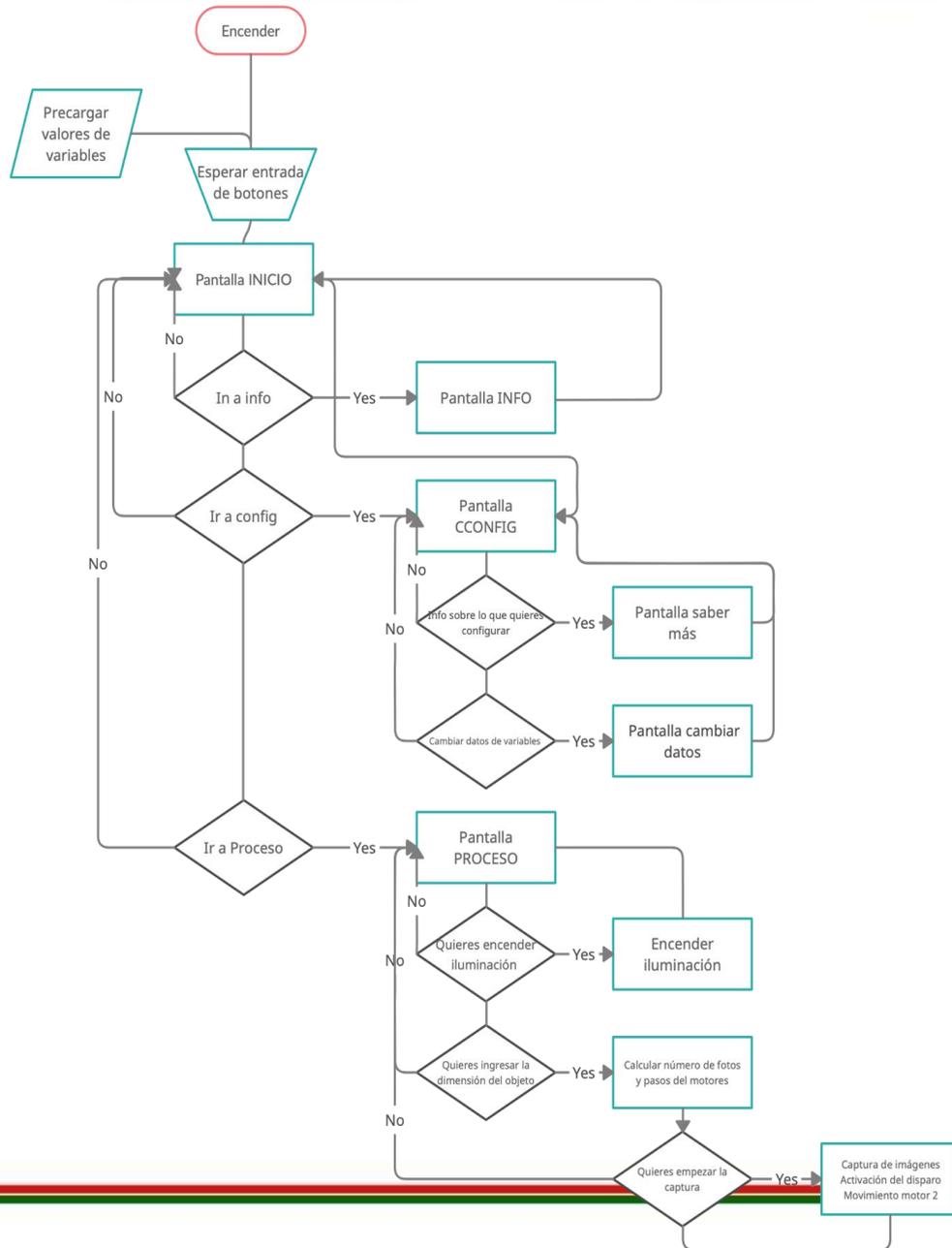


# Construcción del sistema



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Programación HMI



# Cálculo de movimientos

$$Pdc = 2 \cdot c \cdot f \cdot \frac{m + m}{m \cdot m}$$

$f$  = la apertura efectiva del diafragma

$m$  = el factor de magnificación del lente utilizado

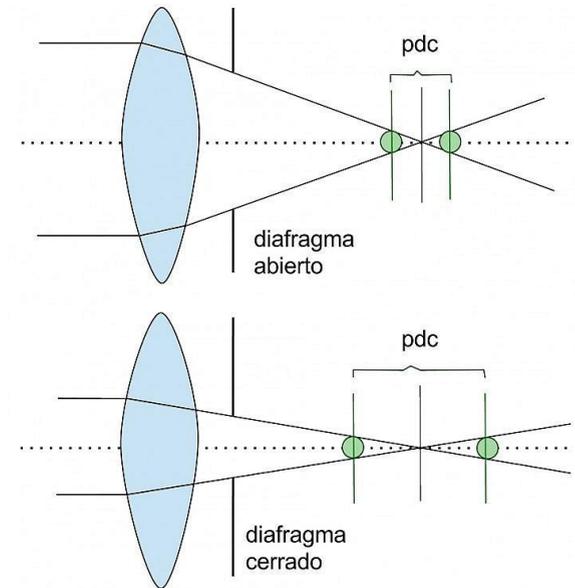
$c$  = el círculo de confusión

$c$  = círculo de confusión

$d_o$  distancia de observación

$d_s$  diagonal del sensor

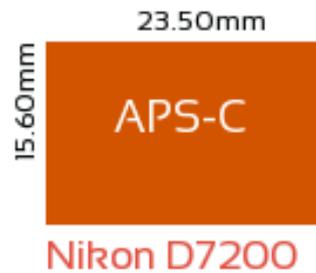
$d$  diagonal de la copia



$$c = \frac{d_o \cdot d_s}{d \cdot 1760}$$

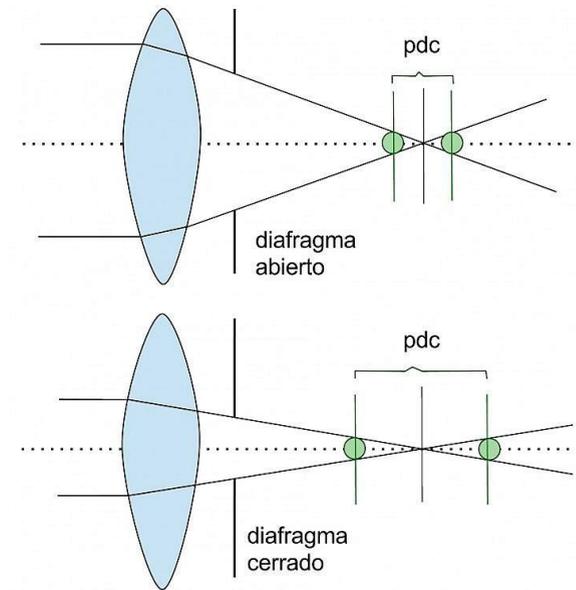


# Cálculo de movimientos



$Pdc = 0,448mm \rightarrow 45steps \rightarrow 80\%$

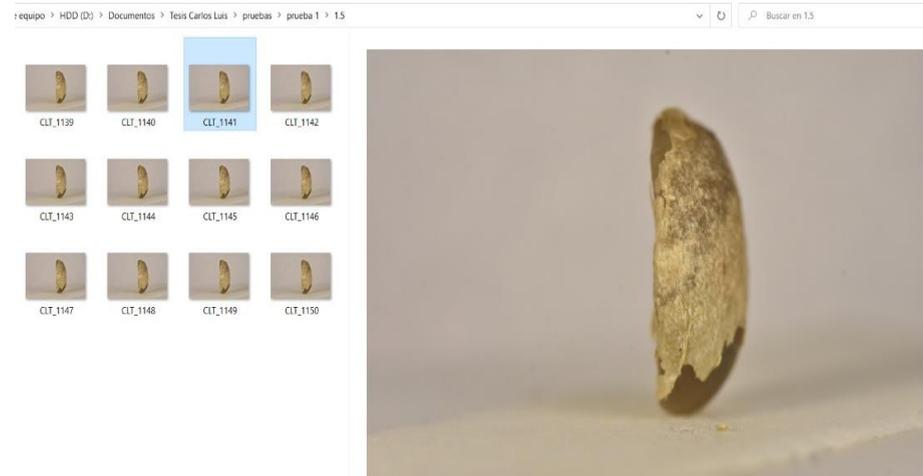
$$c = \frac{d_o}{d \cdot 60}$$



# PRUEBAS DEL SISTEMA

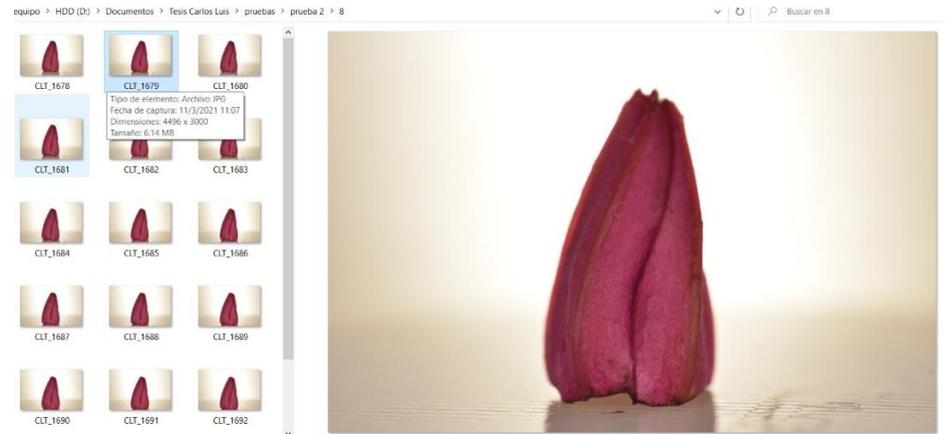
- Captura de 12 fotografías 6 veces
- Captura de 20 fotografías 16 veces
- Captura de 36 fotografías 20 veces

#	#Fotos	
	SI	NO
1	X	
2	X	
3	X	
4		X
5	X	
6	X	

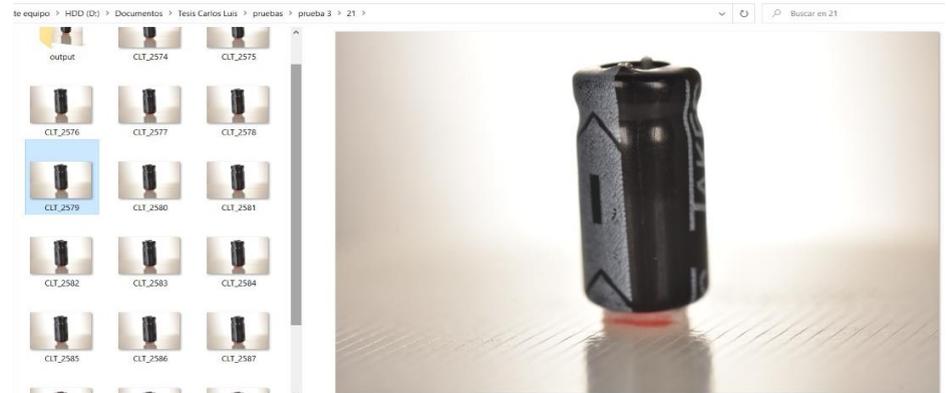


# PRUEBAS DEL SISTEMA

#Captura	#Fotos	
	SI	NO
1	x	
2	x	
3		x
4	x	
5	x	
6	x	
7	x	
8	x	
9	x	
10	x	
11		x
12	x	
13	x	
14		x
15	x	
16	x	



#C aptura	#Fotos		#C aptura	#Fotos	
	SI	NO		SI	NO
1	x		11	x	
2		x	12	x	
3	x		13	x	
4	x		14	x	
5	x		15	x	
6	x		16	x	
7	x		17	x	
8	x		18	x	
9	x		19	x	
10	x		20	x	



# PRUEBAS DEL SISTEMA

Documentos > Tesis Carlos Luis > pruebas > prueba 1 > salida > Ensayo 1

Buscar en Ensayo 1



prueba 2 > salidas > ensayo 2

Buscar en ensayo 2

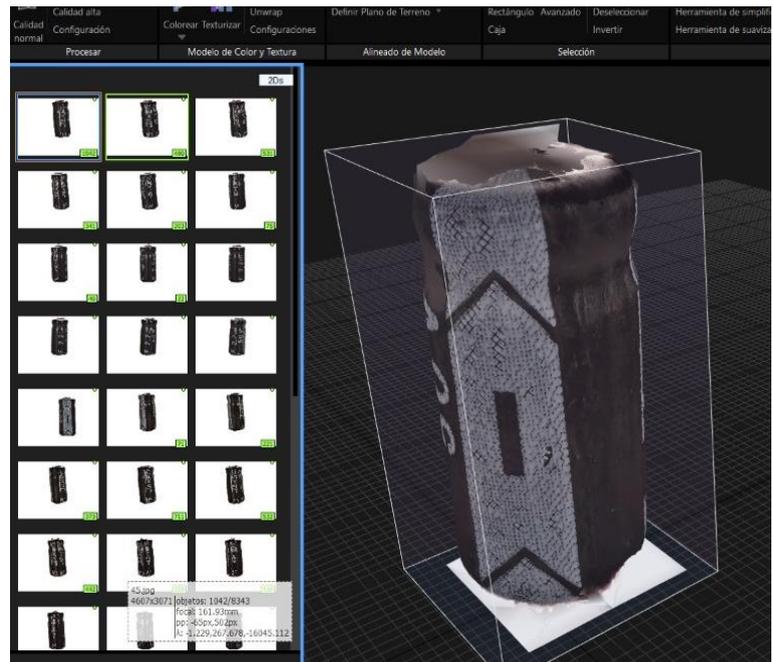
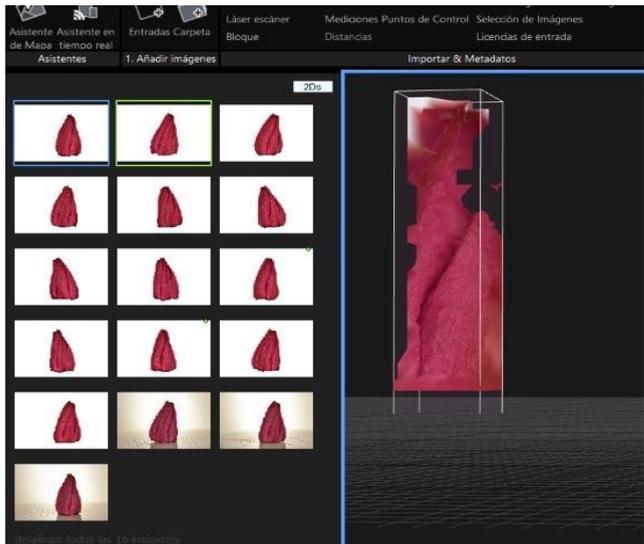
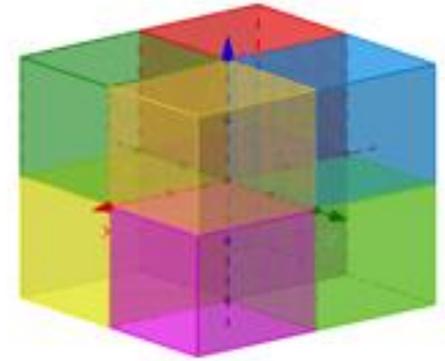
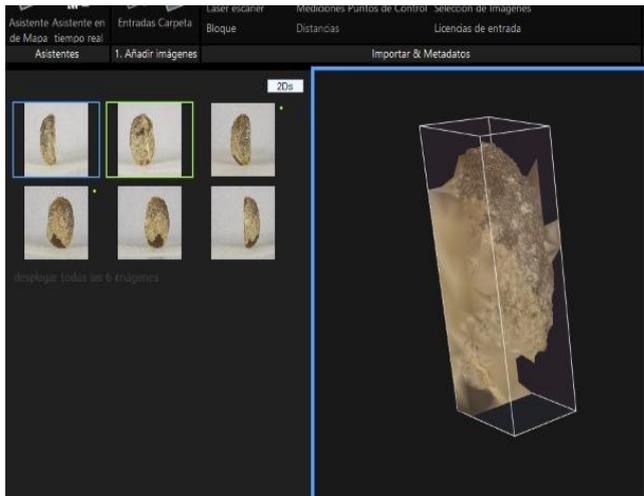


Output > sin fondo > ensayo 3

Buscar en ensayo 3



# PRUEBAS DEL SISTEMA



# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

## HIPÓTESIS PROPUESTA

¿El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR?

## HIPÓTESIS NULA

- **Ho:** El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes no permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

## HIPÓTESIS ALTERNATIVA

- **Hi:** El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.



# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

## Datos obtenidos de las pruebas

# Fotos para reconstrucción	Reconstruye	No reconstruye	Total pruebas
4	0	2	2
10	1	2	3
16	3	1	4
20	5	0	5
32	5	0	5
	14	5	19

$$0R \rightarrow \frac{14 * 2}{19} = 1,47$$

$$2NR \rightarrow \frac{5 * 2}{19} = 0,52$$

$$1R \rightarrow \frac{14 * 3}{19} = 2,21$$

$$2NR \rightarrow \frac{5 * 3}{19} = 0,78$$

$$3R \rightarrow \frac{14 * 4}{19} = 2,94$$

$$1NR \rightarrow \frac{5 * 4}{19} = 1,05$$

$$5R \rightarrow \frac{14 * 5}{19} = 3,68$$

$$0NR \rightarrow \frac{5 * 5}{19} = 1,31$$

$$5R \rightarrow \frac{14 * 5}{19} = 3,68$$

$$0NR \rightarrow \frac{5 * 5}{19} = 1,31$$

### Cálculo de grados de libertad

$$n = (f - 1)(c - 1)$$

$$n = (5 - 1)(2 - 1)$$

$$n = 4$$



# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

## Cálculo de Ji-cuadrado

$$\lambda^2_{calc} = \sum \frac{(f_{real} - f_{teórica})^2}{f_{teórica}}$$

$$\lambda^2_{calc} = \frac{(0-1,47)^2}{1,47} + \frac{(1-2,21)^2}{2,21} + \frac{(3-2,94)^2}{2,94} + \frac{(5-3,68)^2}{3,68} + \frac{(5-3,68)^2}{3,68} + \frac{(2-0,52)^2}{0,52} + \frac{(2-0,78)^2}{0,78} + \frac{(1-1,05)^2}{1,05} + \frac{(0-1,31)^2}{1,31} + \frac{(0-1,31)^2}{1,31}$$

$$\lambda^2_{calc} = 11,69$$

DISTRIBUCION DE  $\chi^2$

Grados de libertad	Probabilidad											
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001	
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83	
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82	
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27	
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47	
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52	
6	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46	
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32	
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12	
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88	
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59	
	No significativo								Significativo			

$$\lambda^2_{tabla} = 9,49$$

$$\lambda^2_{calculado} > \lambda^2_{tabla}$$

$$11,69 > 9,49$$

$$\therefore \cancel{H_0} \quad H_i$$



# CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.
- En la investigación teórica se recopiló información de los componentes necesarios a utilizarse en el sistema, además de que se investigó la fundamentación teórica de las técnicas de reconstrucción tridimensional y la técnica de apilamiento de enfoque, delimitando el tamaño de las muestras a estudiarse de unas medidas de 20mm de largo x 13mm de alto.
- Los componentes del sistema automático de captura de imágenes fueron seleccionados por el método de Pugh, dando valores ponderados a cada criterio de selección, eligiendo así la mejor entre las alternativas planteadas.



# CONCLUSIONES

- Se utilizó la técnica de apilamiento de enfoque con el software libre CombineZP, para generar imágenes completamente nítidas de al menos 3 objetos de estudio.
- Utilizando el software Reality Capture se realizó fotogrametría de objetos estudiados, dando como resultado la reconstrucción de los mismos.
- Se realizó pruebas de reconstrucción tridimensional utilizando el sistema automático captura de imágenes, obteniendo un resultado satisfactorio en los modelos generados.



# RECOMENDACIONES

- Medir correctamente los objetos a reconstruir, otorgándoles al menos un milímetro de seguridad para tener la certeza de que todas las imágenes estarán correctamente encuadradas.
- Asegurarse que la cámara este en modo recepción de infrarrojo para que se puedan tomar automáticamente las imágenes, de la misma forma a pesar del excelente alcance del sistema de captura automático se tiene que evitar que al momento de observar el proceso o manipular elementos se bloquee el emisor IR de la cámara.
- Para crear un modelo digital de buena calidad, se recomienda realizar al menos 20 pasos en una vuelta del objeto, es decir, al menos 20 apilamientos de enfoque.
- Tomar en consideración las recomendaciones para realizar fotogrametría, como por ejemplo evitar superficies brillantes, transparentes, reflectantes y objetos que sean de un solo color o sean matriciales, es decir, que las formas se repitan varias veces en su superficie; procurar que los objetos sean ricos en textura y color.



Muchas gracias!



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA