

MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EXTRACCIÓN DE PLUGS EN NÚCLEOS  
PRESERVADOS EN MANGAS UTILIZANDO IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA  
AXIAL COMPUTARIZADA.

YESSENIA BERMÚDEZ PINZÓN  
OSCAR MAURICIO HERRERA NÚÑEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2019

MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EXTRACCIÓN DE PLUGS EN NÚCLEOS  
PRESERVADOS EN MANGAS UTILIZANDO IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA  
AXIAL COMPUTARIZADA.

YESSENIA BERMÚDEZ PINZÓN

OSCAR MAURICIO HERRERA NÚÑEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera de Petróleos

Director

GUSTAVO ANDRÉS VALLE TAMAYO

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector

JUAN DAVID BADILLO REQUENA

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2019

## DEDICATORIA

*A Dios por dar en mi fe y motivación, cuando no había más salida que atribuir las difíciles circunstancias como designios de Dios. A mis padres Amalia Pinzón Vanegas y Hernando Bermúdez Beltrán, porque, siempre creyeron en mí, siempre me reciben y me despiden con una sonrisa y un abrazo, porque durante mis 23 años de vida han estado cada día a mi lado de manera incondicional, agradezco infinitamente por su confianza. A mi hermana Laura, por ser cómplice, por brindarme la oportunidad de ser tía y compartir el crecimiento de mis bellos sobrinos, Santiago y Yeison; son mi ilusión.*

*A mi abuela, mi protectora, Librada Beltrán, porque en los recuerdos de mi niñez siempre está presente, con sus palabras de orgullo.*

*A mis amigos, con los cuales llevar las cargas académicas era una dicha, ya que, en cada día de traspaso, en cada día de preocupación, siempre reíamos a carcajadas por lo bueno o lo no tan bueno que estaba sucediendo, ellos entenderán. Con ustedes puedo asegurar firmemente que este recorrido fue maravilloso.*

*A mi compañero de tesis, mi colega, mi amigo, mi compañero de viaje, Oscar Herrera, Si no hubiésemos conformado equipo juntos probablemente ya estaríamos graduados. Sin tu iniciativa yo no me habría introducido en el desarrollo de esta tesis, porque para ti era un reto, y me enseñaste a no temerle a los retos, gracias por tu paciencia y cariño.*

CON AMOR  
**YESSANIA BERMÚDEZ PINZÓN**

*A mis padres HÉCTOR JULIO HERRERA MEDINA y ROSA AMELIA NÚÑEZ SOCHA, por darme la vida, por cuidarme y criarme como persona, por ser una prioridad en sus vidas, por su apoyo económico y moral durante todo mi proceso educativo, por confiar ciegamente en mí y mis aspiraciones universitarias, por protegerme ante las adversidades, por estar siempre a mi lado, incluso a los 370 km de distancia que nos separaban, por defenderme siempre, por creer en mis capacidades como estudiante, por su acompañamiento diario desde el día que decidí inscribirme en esta universidad hasta el día de hoy.*

*Además de dedicar este logro a ustedes, es una oportunidad para dar las GRACIAS por su infinito amor y ser siempre mi apoyo y mi motivación.*

*A mis hermanos Julio y Lorena por la compañía en esta ciudad.*

*A mi tía Lina por ser mi segunda madre y protectora, a mis demás tías y familiares que siempre estuvieron pendientes de mí y mi proceso en la universidad.*

*A mis amigos y compañeros que hicieron este proceso junto a mí y compartieron día tras día las alegrías y las dificultades en este camino.*

*A mi compañera de tesis y compañera de vida, Yessenia Bermúdez, por creer en este proyecto, por confiar ciegamente en mí, por ser mi luz, mi cómplice y mi apoyo emocional desde el día que la conocí, por sus consejos, por su paciencia, cariño y dedicación en todos los proyectos que hemos compartido juntos, por ayudarme a mejorar como persona y enseñarme la importancia de hacer las cosas con amor y disciplina.*

CON AMOR  
**OSCAR MAURICIO HERRERA NÚÑEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra Universidad, por permitirnos cumplir nuestro gran primer sueño, por volver lo inalcanzable alcanzable, por ser nuestro hogar por más de 5 años.

A nuestro director de tesis el Ing. Gustavo Valle Tamayo, por su disposición para ayudarnos en todo el proceso de la realización de este proyecto, por su paciencia en los momentos en los que ni nosotros mismos teníamos idea de lo que hacíamos, siempre siendo un buen guía, sin su ayuda este proyecto no hubiese sido posible.

A nuestro codirector el Geólogo Juan Badillo Requena, por guiarnos en la realización del modelo computacional, por brindarnos su ayuda de manera incondicional.

A nuestro gran amigo Andrés, por brindarnos sus conocimientos y asesoría en programación y así facilitar el desarrollo de este proyecto.

A la mamá de Oscar que cada día nos acosaba por culminar este gran proyecto.

## CONTENIDO

Pág.

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                                  | 16 |
| 1. OBJETIVOS.....                                                   | 18 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL.....                                           | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                      | 18 |
| 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....            | 19 |
| 2.1 CONCEPTOS GENERALES.....                                        | 19 |
| 2.2 FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....                                    | 20 |
| 2.3 PALABRAS CLAVE PARA LA FILTRACIÓN.....                          | 22 |
| 2.3.1 Filtración por título .....                                   | 23 |
| 2.3.2 Filtración por resumen.....                                   | 23 |
| 2.3.3 Filtración por texto completo .....                           | 23 |
| 2.3.4 Extracción de la información .....                            | 23 |
| 2.3.5 Síntesis de la búsqueda.....                                  | 23 |
| 2.4 INTERROGANTES PLANTEADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.....             | 24 |
| 2.5 BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE RESULTADOS.....                         | 25 |
| 2.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....                                 | 28 |
| 2.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                                    | 30 |
| 3. VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA PARA EL MODELO COMPUTACIONAL ..... | 31 |
| 3.1 INGENIERÍA DE SOFTWARE.....                                     | 31 |
| 3.2 MODELO DE DESARROLLO DEL SOFTWARE.....                          | 32 |
| 4. METODOLOGÍA SELECCIONADA.....                                    | 35 |
| 4.1 METODOLOGÍA UNO.....                                            | 36 |
| 4.1.1 Variables de entrada.....                                     | 39 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2 Variables de salida y sus interacciones .....                                            | 44 |
| 4.2 METODOLOGÍA DOS.....                                                                       | 46 |
| 4.2.1 Variables de entrada.....                                                                | 48 |
| 4.2.2 Variables de salida y sus interacciones. ....                                            | 51 |
| 5. PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO SELECCIONADO PARA EL<br>DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL..... | 56 |
| 5.1 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN .....                                                            | 59 |
| 5.2 ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS.....                                                            | 65 |
| 5.3 FUNCIONAMIENTO DEL APLICATIVO .....                                                        | 66 |
| 6. COMPARACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL CON DATOS<br>REALES DE TOMOGRAFÍA.....          | 69 |
| 6.1 METODOLOGÍA NÚMERO UNO. ....                                                               | 71 |
| 6.2 METODOLOGÍA NÚMERO DOS.....                                                                | 74 |
| 7. CONCLUSIONES .....                                                                          | 79 |
| 8. RECOMENDACIONES .....                                                                       | 80 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                                              | 81 |
| ANEXOS .....                                                                                   | 83 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                               | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Esquema explicativo de las etapas de la búsqueda y refinación de la información. ....                               | 22   |
| Figura 2. Esquema de filtración de la información y su número de resultados en cada etapa. ....                               | 24   |
| Figura 3. Representación gráfica del número de estudios presentados Vs año de publicación. ....                               | 26   |
| Figura 4. Representación gráfica del número de estudios Vs Tópico de la investigación. ....                                   | 28   |
| Figura 5. Estructura del modelo del desarrollo del software .....                                                             | 34   |
| Figura 6. Ejemplo de contacto litológico, llevado a 90 grados respecto a la horizontal .....                                  | 36   |
| Figura 7. Diagrama de flujo para la metodología uno. ....                                                                     | 37   |
| Figura 8: Imagen explicativa para hallar la profundidad a la cual extraer el plug...                                          | 38   |
| Figura 9. Ilustración para el cálculo de la variable diámetro externo de la manga.                                            | 40   |
| Figura 10. Ilustración para el cálculo de la profundidad inicial y final de la capa de interés. ....                          | 41   |
| Figura 11. Ilustración para el cálculo del ángulo de giro en el corte XY.....                                                 | 42   |
| Figura 12. Ilustración para el cálculo de la distancia entre el borde externo de la manga y el borde externo del núcleo. .... | 43   |
| Figura 13. Diagrama de flujo para la metodología dos. ....                                                                    | 47   |
| Figura 14. Imagen cilíndrica, con un punto máximo en $\frac{1}{4}$ de la imagen. ....                                         | 48   |
| Figura 15. Calculo del buzamiento aparente usando la imagen XZ/YZ. ....                                                       | 50   |
| Figura 16. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte XZ. ....                                                       | 54   |
| Figura 17. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte YZ. ....                                                       | 54   |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18. Mockup utilizado para el diseño del software. ....                     | 57 |
| Figura 19. Definición de elemento canvas para las imágenes radiales. ....         | 60 |
| Figura 20. Estilo de los contenedores de imágenes. ....                           | 61 |
| Figura 21. Cálculo del buzamiento real usando Javascript. ....                    | 62 |
| Figura 22. Distribución de carpetas asociadas al desarrollo del aplicativo. ....  | 65 |
| Figura 23. Diagrama de flujo del modelo computacional. ....                       | 68 |
| Figura 24. Imagen XY del ejemplo dado .....                                       | 70 |
| Figura 25. Imagen del corte vertical y el corte cilíndrico del ejemplo dado. .... | 70 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                            | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Número de estudios correspondientes a cada año de publicación. ....                                               | 26   |
| Tabla 2. Número de estudios correspondientes a cada tópico de la<br>investigación. ....                                    | 27   |
| Tabla 3. Guía para la orientación del sentido de giro en un corte.....                                                     | 43   |
| Tabla 4. Guía para el sentido de la rotación, teniendo en cuenta la concavidad de<br>la senoide. ....                      | 51   |
| Tabla 5. Resultados obtenidos a partir de la metodología número uno aplicando<br>datos reales. ....                        | 71   |
| Tabla 6. Resultados Obtenidos de la Metodología número uno aplicando el modelo<br>computacional propuesto.....             | 72   |
| Tabla 7. Porcentaje de error y porcentaje de precisión de cada variable. ....                                              | 73   |
| Tabla 8. Resultados obtenidos aplicando la metodología número 2, con el<br>procedimiento de Narváez y Pereira (2016). .... | 75   |
| Tabla 9. Resultados obtenidos aplicando la metodología número 2, con el modelo<br>computacional.....                       | 76   |
| Tabla 10. Porcentaje de error y porcentaje de precisión de cada variable. ....                                             | 77   |

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| Anexo A. Tutorial de uso..... | 83 |
|-------------------------------|----|

## RESUMEN

**TITULO:** MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EXTRACCIÓN DE PLUGS EN NÚCLEOS PRESERVADOS EN MANGAS UTILIZANDO IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA\*

**AUTORES:** YESSSENIA BERMÚDEZ PINZÓN  
OSCAR MAURICIO HERRERA NÚÑEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** tomografía axial computarizada, extracción de plugs, ingeniería software, modelo computacional.

### DESCRIPCIÓN

En este documento, se presenta el desarrollo de un modelo computacional aplicado a la extracción de plugs utilizando imágenes de tomografía axial computarizada de rayos x, este modelo determina la profundidad a la cuál debe ser extraído el plug y el ángulo que se debe rotar la manga que contiene al núcleo para obtener una muestra representativa del yacimiento de interés, este modelo está basado en una metodología propuesta en la literatura.

Se analizan las variables que intervienen en la metodología seleccionada y de este modo se clasifican en variables de entrada y salida, así como sus interacciones, para proceder a la programación del código fuente y analizar la funcionalidad del modelo computacional haciendo uso de imágenes de tomografía.

Este modelo facilita la aplicación de la única metodología existente para la extracción de plugs haciendo uso de tomografía axial computarizada; para la programación de este modelo se usó como base metodológica la ingeniería del software y se realizó una comparación de resultados entre un ejercicio solucionado de la literatura, datos reales y los datos arrojados por el modelo computacional, también se desarrolló una guía práctica como soporte de la herramienta, en la cual se establecen claramente un paso a paso para el uso del modelo computacional desarrollado.

---

\* Tesis de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Gustavo Andrés Valle Tamayo, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Juan David Badillo Requena, Geólogo

## ABSTRACT

**TITLE:** COMPUTATIONAL MODEL FOR THE EXTRACTION OF PLUGS IN SLEEVE-PRESERVED CORES USING COMPUTERIZED AXIAL TOMOGRAPHY IMAGES.\*

**AUTHORS:** YESSENIA BERMÚDEZ PINZÓN  
OSCAR MAURICIO HERRERA NUÑEZ\*\*

**KEY WORDS:** Computerized axial tomography, plugs extraction, software engineering, computational model.

### DESCRIPTION

In this document, is present the development of a computational model applied to the extraction of plugs using computerized tomography images of x-rays, this model determines the depth at which the plug should be extracted and the angle that the sleeve must be rotated that contains the nucleus to obtain a representative sample of the reservoir of interest, this model is based on a methodology proposed in the literature.

The variables that intervene in the selected methodology are analyzed and in this way they are classified into input and output variables, as well as their interactions, to proceed with the programming of the source code and analyze the functionality of the computational model using tomography images. This model facilitates the application of the only existing methodology for the extraction of plugs using computerized axial tomography;

For the programming of this model, the software engineering was used as a methodological basis and a comparison of results was made between a solved exercise of the literature, real data and the data thrown by the computational model. A practical guide was also developed to support the the tool, in which a step-by-step approach to the use of the computational model developed is clearly establishe.

---

\* Degree work

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Gustavo Andrés Valle Tamayo, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Juan David Badillo Requena, Geólogo.

## INTRODUCCIÓN

La caracterización de yacimientos se convierte en una actividad de gran significancia para modelar el comportamiento de los fluidos, para lo cual, se disponen de muestras de rocas representativas, llamadas núcleos, siendo estos, una muestra directa del yacimiento. El análisis del núcleo permite encontrar la cantidad de espacio ocupado por petróleo, gas y agua, la rapidez con que este petróleo y gas estará disponible para ser extraído por métodos convencionales y cuanto de este hidrocarburo puede ser recuperado por métodos no convencionales, además, permite conocer cuál es la mejor manera de diseñar esos medios de recuperación. Sin embargo, las pruebas en el laboratorio más importantes para determinar estas propiedades se le realizan a una extracción cilíndrica que se le hace al núcleo llamada plug, los cuales deben ser representativos de la sección del yacimiento que se evalúa.

El objetivo del análisis de estos plugs es obtener información del yacimiento y reducir la incertidumbre en la evaluación de este. Para encontrar formas de obtener esta información de manera rápida y confiable, en las últimas décadas, la tomografía axial computarizada se ha convertido en un medio de apoyo complementario para la caracterización del yacimiento, siendo una tecnología de rayos X que produce una imagen digital de la estructura interna de un corte transversal del núcleo, mediante la captación de datos de atenuación.

Por tal razón, la tomografía se posiciona como una buena alternativa para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas, debido a que permite la visualización de la composición interna del núcleo sin recurrir a técnicas destructivas, basándose en lo anterior, en la literatura se propuso una metodología para extraer los plugs, trabajando únicamente con las imágenes arrojadas por tomografía, desarrollando con ellas un algoritmo solución propuesto, dando como

resultado el ángulo de giro que se le debe dar a la manga y la profundidad a la cual la broca debe ser ubicada para extraer el/los plug/plugs conformado/conformados por un solo estrato de roca, siendo apto/aptos para realizar las pruebas necesarias para caracterizar el yacimiento y obtener resultados confiables cercanos a las propiedades reales del yacimiento.

En el presente trabajo se propone el desarrollo de un modelo computacional de la metodología propuesta en la literatura anteriormente mencionada, que permite cargar las imágenes del núcleo provenientes de la tomografía axial computarizada y realiza el algoritmo solución de manera interactiva con el usuario, dando como resultado el ángulo de giro que se le debe dar a la manga en la cual está contenido el núcleo y la profundidad a la cuál debe estar ubicada la broca para extraer el plug de un solo litotipo de roca.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL.**

Desarrollo de un modelo computacional para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Establecer las variables de entrada y salida del modelo computacional propuesto, determinando sus interacciones.
- Programar el algoritmo seleccionado para el desarrollo del modelo computacional.
- Comparar la herramienta computacional con datos reales de tomografía.

## **2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Para la presente investigación se hace una revisión bibliográfica de los diferentes tópicos necesarios para la realización del modelo computacional propuesto.

### **2.1 CONCEPTOS GENERALES<sup>1</sup>**

- Corazonamiento de núcleos: es un proceso diseñado para recuperar muestras de rocas desde una profundidad de tierra previamente planificada, para estudios geológicos y de ingeniería.
- Núcleos: son secciones rocosas extraídas del subsuelo provenientes del proceso de corazonamiento.
- Preservación de núcleos: es un intento de mantener las condiciones de la roca con las que salió del corazonamiento, hasta antes de su análisis y estudio.
- Preservación de núcleos en mangas: es un tipo de preservación que puede ser utilizado en todo tipo de núcleos, estas mangas pueden ser hechas de fibra de vidrio, plásticos, aluminio o materiales desechables.
- Slabbing: es el corte transversal que se realiza al núcleo con el fin de exponer su sedimentología, litología y características de la estratificación de este.

---

<sup>1</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended Practices for Core Analysis 40. Segunda edición, febrero de 1998.

- Plugs: son secciones cilíndricas de roca extraídos de los núcleos, con el propósito de ser utilizados en laboratorio para realizar una serie de pruebas y análisis, y así determinar algunas propiedades de la roca.
- Película continua: en los reportes de tomografía, hace referencia a que la información representada por medio de una imagen se pueda observar sin interrupciones.
- Buzamiento real: ángulo de inclinación de la línea de máxima pendiente de un plano inclinado; se mide en dirección perpendicular a la dirección de la capa.
- Buzamiento aparente: ángulo de inclinación de un plano, medido en una dirección NO perpendicular a la dirección de la capa; el buzamiento aparente siempre es menor que el buzamiento real.
- Tomografía axial computarizada (TAC): es una técnica no destructiva que proporciona imágenes en 3D de un núcleo, a través de barridos estrechamente espaciados que luego pueden ser cortados en cualquier orientación para generar una lámina virtual del núcleo, denominada “slab”.

## 2.2 FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Para la presente investigación se hace una revisión bibliográfica de los diferentes tópicos necesarios para la realización del modelo computacional propuesto.<sup>2</sup>

---

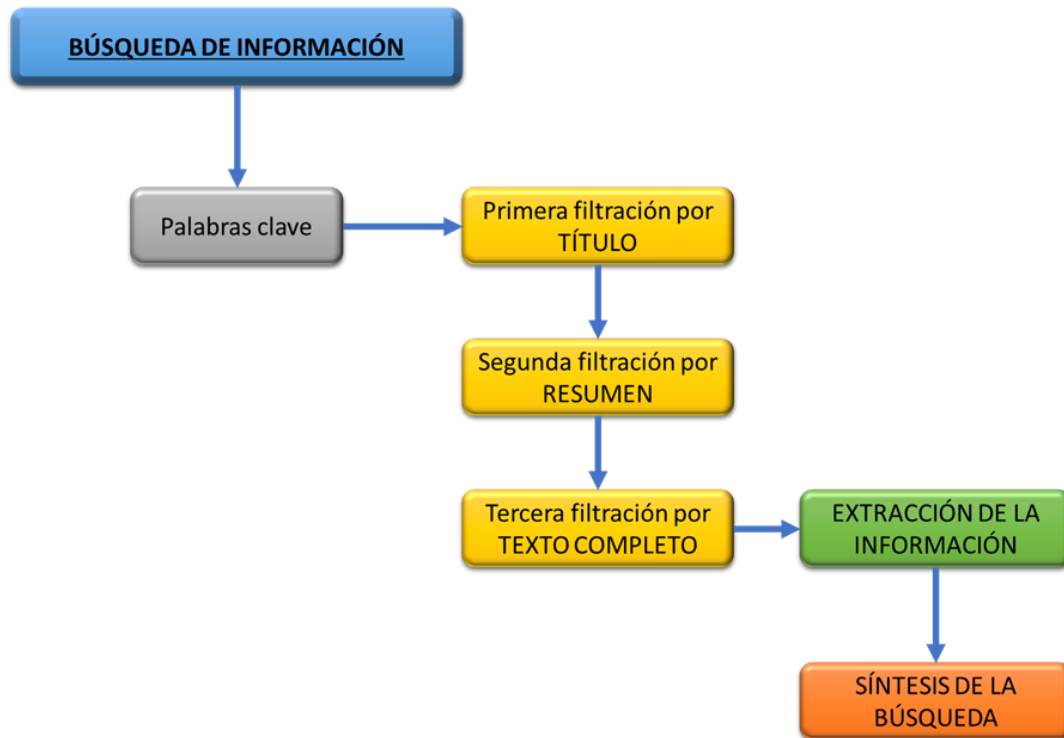
<sup>2</sup> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Biblioteca acceso remoto. 10 de 2018. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/menu>.

Inicialmente se usan los siguientes buscadores académicos:

- One Petro: esta herramienta es una biblioteca en línea de literatura técnica para la industria del petróleo, con las contribuciones de 20 socios editores y brinda acceso a más de 180,000 artículos.
- Google Académico (en inglés, Google Scholar): es un buscador de Google enfocado y especializado en la búsqueda de contenido y literatura científico-académica, indexa editoriales, bibliotecas, repositorios, bases de datos bibliográficas, entre otros.
- SciELO – Scientific Electronic Library Online (Biblioteca Científica Electrónica en Línea): es un modelo para la publicación electrónica cooperativa de revistas científicas en Internet, el modelo proporciona una solución eficiente para asegurar la visibilidad y el acceso universal a su literatura científica.
- AAPG JOURNALS - The American Association of Petroleum Geologists: acceso en línea publicaciones en texto completo editadas por la American Association of Petroleum Geologists, información retrospectiva desde 1980.
- ALFAOMEGA: biblioteca digital compuesta por 169 títulos de libros en español y texto completo de la Editorial AlfaOmega, que pueden ser consultados de forma virtual.

Luego, se realiza la búsqueda y la obtención de la información haciendo uso de las palabras clave y de los temas pertinentes para este proyecto, posteriormente se refina y filtra la información por título, resumen y texto completo, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema explicativo de las etapas de la búsqueda y refinación de la información.



Fuente: CHEN Yang, PENG liang, PARIS Avgeriou. A systematic mapping study on the combination of software architecture and agile development, The journal of systems and software111. 2016

### 2.3 PALABRAS CLAVE PARA LA FILTRACIÓN.

En la búsqueda de la información se tiene en cuenta las siguientes palabras clave que van directamente relacionadas con el tema de estudio, la búsqueda se realiza en idioma ingles en los buscadores mencionados en la sección 1.2.

- Análisis de núcleo

- Tomografía axial computarizada (TAC)
- Extracción de plugs
- Slabbing
- Preservación de núcleos
- Ingeniería software

**2.3.1 Filtración por título.** En esta etapa se realiza la primera filtración basándose en los resultados obtenidos utilizando las palabras claves de la primera fase.

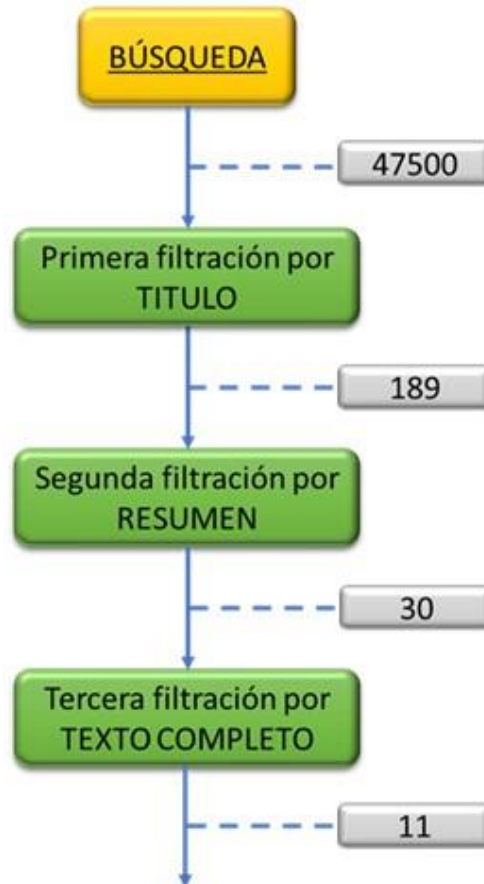
**2.3.2 Filtración por resumen.** En esta fase se refina la búsqueda leyendo los resúmenes de los documentos encontrados en la fase anterior para su posterior análisis y síntesis.

**2.3.3 Filtración por texto completo.** En esta última etapa de filtración se realiza una lectura completa del contenido de los documentos resultantes de la fase anterior y se seleccionan los relacionados a la investigación.

**2.3.4 Extracción de la información.** En este paso se extrae la información relevante que proporcione respuestas a los interrogantes planteados para esta investigación.

**2.3.5 Síntesis de la búsqueda.** Finalmente, la información extraída es sintetizada para responder los interrogantes y visualizarlos en diferentes formas para su comprensión.

Figura 2. Esquema de filtración de la información y su número de resultados en cada etapa.



Fuente: CHEN Yang, PENG liang, PARIS Avgeriou. A systematic mapping study on the combination of software architecture and agile development, The journal of systems and software111. 2016

## 2.4 INTERROGANTES PLANTEADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

RQ1. ¿Cómo se implementó la TAC en el análisis de núcleos?

RQ2. ¿Cómo se ha usado la TAC en análisis de núcleos?

RQ3. ¿Qué métodos existen actualmente para la extracción de plugs, que involucren la TAC?

RQ4. ¿Cómo aplicar la ingeniería de software para optimizar el proceso de extracción de plugs?

RQ5. ¿Qué desafíos tiene el análisis de núcleos en la actualidad?

## **2.5 BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE RESULTADOS.**

Para la realización de este proceso se hace una búsqueda de información y filtración, (ver figura 2), que arrojó como resultado 47500 documentos inicialmente, con la intención de refinar se hace el primer filtro por título obteniendo 189 documentos, posteriormente en el segundo filtro se obtienen 30 documentos para el análisis. Con la intención de continuar la filtración se hace una lectura por texto completo que da como resultado 11 documentos pertinentes para la síntesis de esta investigación.

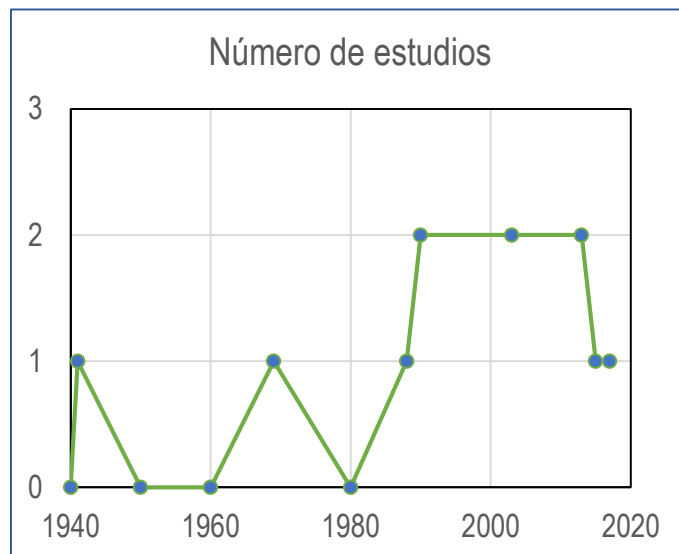
Estos 11 documentos se utilizan como la base de esta investigación, inicialmente se organizan en orden cronológico para visualizar la evolución de los temas investigados a lo largo del tiempo hasta la actualidad con la finalidad de conocer qué existe actualmente sobre el campo de investigación de los temas concernientes al presente trabajo.

Se observa en forma general que los 11 documentos encontrados (ver tabla 1) se han dividido desde 1941 hasta el 2017 en picos de 1 estudio y máximo 2 estudios (ver figura 3), esto evidencia la poca investigación que existe actualmente sobre los temas de interés del presente proyecto y de ahí radica su importancia.

Tabla 1. Número de estudios correspondientes a cada año de publicación.

| Año  | Número de estudios |
|------|--------------------|
| 1940 | 0                  |
| 1941 | 1                  |
| 1950 | 0                  |
| 1960 | 0                  |
| 1969 | 1                  |
| 1980 | 0                  |
| 1988 | 1                  |
| 1990 | 2                  |
| 2003 | 2                  |
| 2013 | 2                  |
| 2015 | 1                  |
| 2017 | 1                  |

Figura 3. Representación gráfica del número de estudios presentados Vs año de publicación.

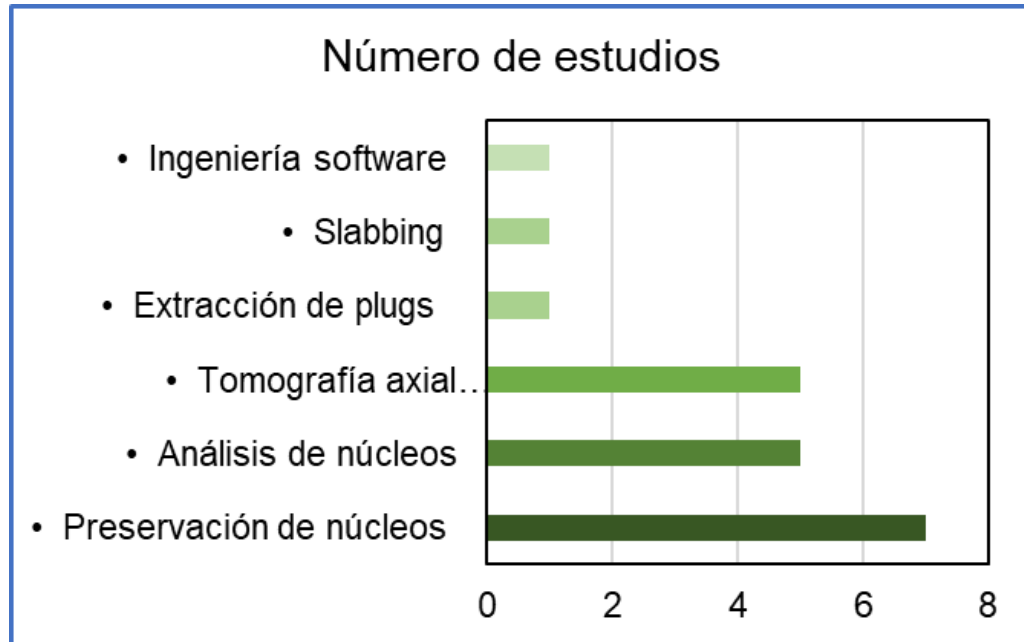


Posteriormente se realiza la selección de documentos en función de los tópicos de la investigación (ver tabla 2), se encuentra que existe un solo estudio que involucra a ingeniería de software, slabbing y extracción de plugs, en tomografía axial computarizada y análisis de núcleos se encuentran 5 estudios y para preservación de núcleos 7 estudios (ver figura 4), esto muestra que existe una diferencia marcada entre unos temas y otros, posteriormente se mezclan todos los tópicos para dar respuesta a los interrogantes previamente formulados.

Tabla 2. Número de estudios correspondientes a cada tópico de la investigación.

| Tópico de la investigación             | Número de estudios |
|----------------------------------------|--------------------|
| • Preservación de núcleos              | 7                  |
| • Análisis de núcleos                  | 5                  |
| • Tomografía axial computarizada (TAC) | 5                  |
| • Extracción de plugs                  | 1                  |
| • Slabbing                             | 1                  |
| • Ingeniería software                  | 1                  |

Figura 4. Representación gráfica del número de estudios Vs Tópico de la investigación.



## 2.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

En esta sección, luego de la búsqueda y selección de los resultados, se presentan las respuestas a los interrogantes planteados para esta investigación (ver 1.3.7) de la siguiente manera:

- RQ1. ¿Cómo se implementó la TAC en el análisis de núcleos?

La tomografía axial computarizada de rayos x se implementó en el análisis de núcleos como una herramienta complementaria, gracias a su potencial tecnológico se popularizó en 1988 con la caracterización de fluidos y fue avanzando como herramienta de análisis central hacia diferentes aplicaciones como: visualización de

la invasión del lodo, detección de fracturas, caracterización litológica y cálculo de propiedades de la roca.<sup>3</sup>

- RQ2. ¿Cómo se ha usado la TAC en análisis de núcleos?

La tomografía axial computarizada se ha usado en el análisis de núcleos como una herramienta de análisis central en el estudio de las rocas debido a que permite la inspección de su estructura interna de una manera no destructiva y la cuantificación indirecta de alguna de sus propiedades básicas, su uso para la determinación de la saturación in situ, por ejemplo, lo ha convertido en el método de elección para las pruebas de permeabilidad relativa.<sup>4</sup>

- RQ3 ¿Qué métodos existen actualmente para la extracción de plugs, que involucren la TAC?

Actualmente en el campo de la extracción de plugs solamente existe una metodología que fue desarrollada en 2017 por Narváez y Pereira como una tesis de grado en la cual plantea la tomografía axial computarizada como herramienta para la extracción de plugs, esta metodología plantea mejorar el proceso de extracción de plugs con el fin de obtener muestras representativas y de alta calidad.<sup>5</sup>

- RQ4 ¿Cómo aplicar la ingeniería de software para optimizar el proceso de extracción de plugs?

En esta investigación no se encontró un estudio que relacionara la extracción de plugs con la ingeniería de software, en consecuencia, a esto se resalta la

---

<sup>3</sup> HUNT K., Patricia, ENGLER Philip, BAJSAROWLCZ Caroline. Computed Tomography as a core analysis tool: applications, instrument evaluation, and image improvement techniques (Vols. SPE-16952-PA). Journal of petroleum technology. 1988

<sup>4</sup> ORTIZ, Andrés; P. J. Caracterización estática de rocas por medio de tomografía computarizada de rayos-X TAC. Revista fuentes, 13. junio de 2013

<sup>5</sup> NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016

importancia del proyecto planteado ya que es interesante cómo la ingeniería de software puede optimizar el proceso de extracción de plugs.

- RQ5 ¿Qué desafíos tiene el análisis de núcleos en la actualidad?

El desafío principal del análisis de núcleos en la actualidad sigue siendo el mismo que en años anteriores: “Reducir la incertidumbre en la evaluación de reservorios”, para esto es necesario la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a minimizar esta incertidumbre hasta el mínimo posible y así obtener resultados más fiables y cercanos a la realidad, así obtener análisis de núcleos de alta calidad.<sup>6</sup>

## **2.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta investigación se lleva a cabo una revisión bibliográfica de diferentes bases de datos electrónicas con el fin de verificar los antecedentes de nuestros temas de interés, entender su importancia y avances a lo largo del tiempo, cuantificar sus estudios, verificar que se ha hecho en el ámbito del proyecto, delimitar hasta donde se ha llegado y finalmente que aporte se le da con este proyecto; En consecuencia, se encuentra que, utilizando 11 estudios escogidos como referencia, solamente existe una metodología que incluya la tomografía axial computarizada en la extracción de núcleos (NARVÁEZ Y PERERIRA 2016), pero a su vez no existe ningún estudio que relacione lo anterior con la ingeniería de software y su importancia en la optimización de procesos, por consiguiente, desarrollar un modelo computacional de la metodología encontrada es pertinente.

---

<sup>6</sup> Ibid.

### **3. VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA PARA EL MODELO COMPUTACIONAL**

Para la realización del modelo computacional se escoge una metodología que relaciona la tomografía axial computarizada y la extracción de plugs, esta metodología es el resultado del análisis de la información obtenida en la sección 2, siendo esta investigación la única pertinente para el desarrollo del modelo computacional de este proyecto.

En el presente capítulo se muestran los tópicos necesarios correspondientes a la aplicación de la ingeniería de software para este proyecto, la metodología seleccionada, las variables de entrada, salida y sus interacciones. Teniendo en cuenta lo anterior se utiliza la ingeniería de software como una herramienta guía para el desarrollo del modelo computacional, inicialmente se realiza la identificación de las variables de entrada y salida que se ven involucradas en el proceso de programación.

#### **3.1 INGENIERÍA DE SOFTWARE**

La Ingeniería de software es la aplicación práctica del conocimiento científico al diseño y construcción de programas de computadora y a la documentación asociada requerida para desarrollar, operar y mantenerlos<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> LIS RINAUDO, Guillermo; PANTALEO, Ludmila. Ingeniería de software. Buenos Aires: ALFAOMEGA. 2015

En la industria petrolera el uso de software es de gran importancia ya que optimiza procesos y reduce costos. El desafío de entregar aplicaciones de software a la industria petrolera se ha intensificado por los rápidos avances en la tecnología informática, es el caso de la tomografía axial computarizada que ha sido implementada para obtener imágenes de rayos X y analizar la estructura interna de núcleos de perforación, para el tratamiento de estas imágenes es necesario el uso de un software específico para cada una de sus aplicaciones. Para este proyecto se desarrolla un modelo computacional de la metodología de Narváez y Pereira para la extracción de plugs usando tomografía axial computarizada, ya que en esta metodología los cálculos se realizan de manera manual y da cabida a error en los resultados, con la sistematización de la metodología se optimiza el proceso ganando tiempo y precisión en los resultados.

### **3.2 MODELO DE DESARROLLO DEL SOFTWARE<sup>8</sup>**

Para el desarrollo de un software es necesario el uso de una metodología en un marco de trabajo que se usa como guía de las actividades llevadas a cabo para la realización del mismo, donde se especifica las tareas, los productos a generar y las relaciones entre ambos. Esto permite organizar el proceso de desarrollo de software a través de la definición de pautas a seguir y restricciones a cumplir. Las reglas y limitaciones especificadas son propias de cada metodología. En consecuencia, existe una amplia variedad de metodologías definidas, cada una con ventajas y limitaciones inherentes al contexto de la aplicación.

---

<sup>8</sup> Ibid.

En este proyecto se usa una metodología conducida por planes en un modelo de cascada, que es un modelo de desarrollo lineal secuencial donde el proyecto de software es dividido en fases que deben proceder de forma secuencial.

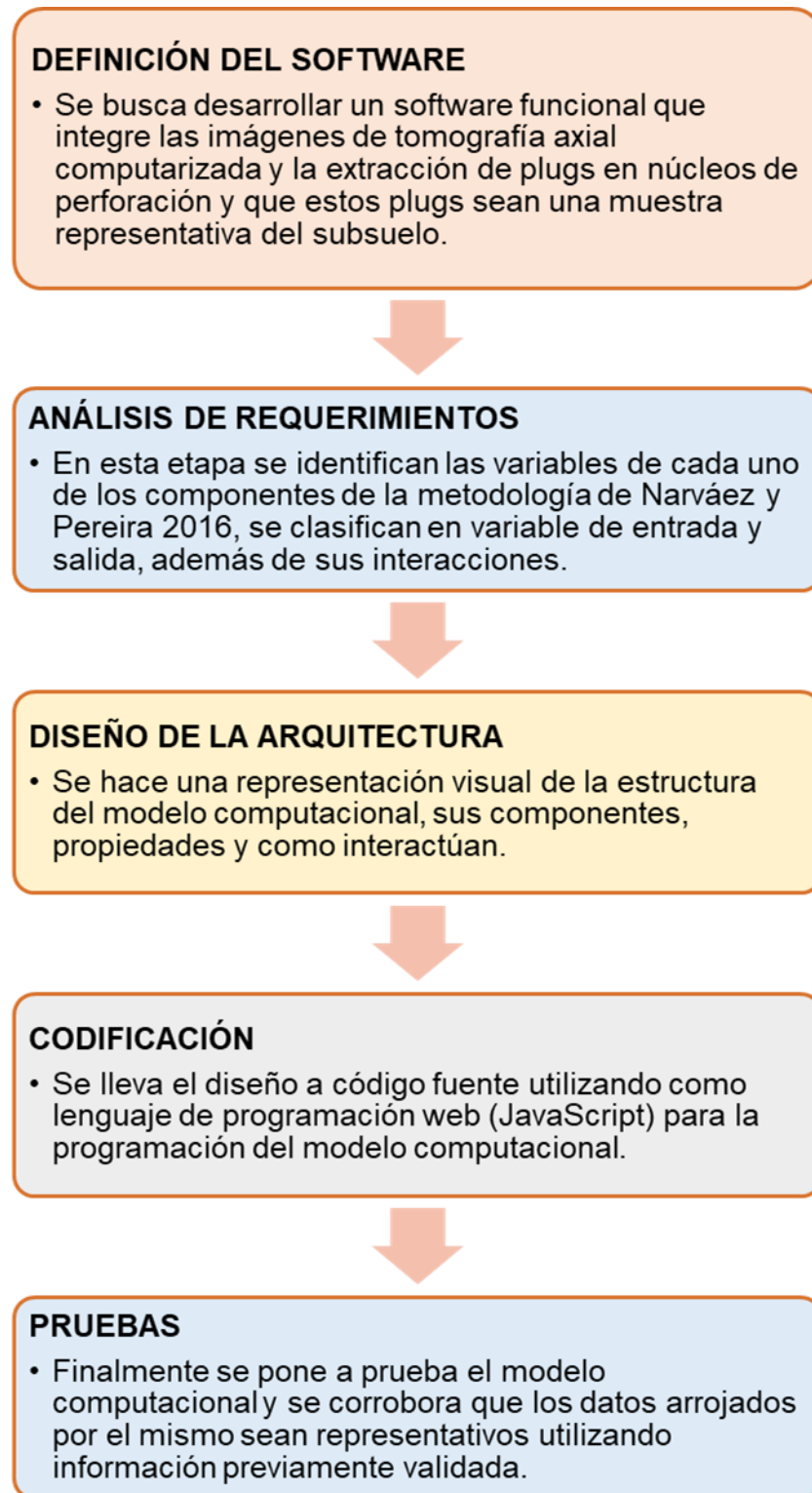
El proceso incluye una serie de etapas en el siguiente orden:

- Definición del software: corresponde a la visión del producto, sus aspectos desde el punto de vista comercial.
- Análisis de requerimientos: implica el entendimiento del dominio del producto a ser desarrollado; esto es, funciones, comportamiento y relación con sistemas externos. El principal objetivo de esta fase es achicar los riesgos de negocio.
- Diseño de la arquitectura: Es la forma en que la solución se implementará.
- Codificación: Corresponde a la implementación de la solución de acuerdo con cómo se ha estipulado durante el diseño de la arquitectura.
- Pruebas: Deben asegurar que el producto satisfaga los requerimientos, es decir, que cumplan con el comportamiento esperado. Los principales objetivos de esta fase son asegurar la calidad del producto y reducir los riesgos de falla de la aplicación en el entorno final de implantación.

Teniendo en cuenta el modelo anteriormente mencionado se aplica en el proyecto como se muestra en la figura 5.

En el proceso de la elaboración del presente modelo computacional se estableció la visión del software en el anteproyecto requerido para su aprobación. Continuando con el proceso de diseño tipo cascada se procede a establecer y detallar las variables involucradas en la metodología seleccionada.

Figura 5. Estructura del modelo del desarrollo del software



#### 4. METODOLOGÍA SELECCIONADA<sup>9</sup>

La base del modelo computacional es la metodología propuesta en la tesis desarrollada por Narváez y Pereira 2016, la cual a su vez se divide en dos metodologías. Para cada una de estas se establecen las variables de entrada, salida y sus interacciones.

En esta metodología seleccionada se realiza un proceso para mejorar la extracción de plugs utilizando como apoyo la tecnología de tomografía axial computarizada de rayos X, se usa un reporte de tomografía para el análisis detallado en la evaluación de núcleos y obtener la localización exacta para extraer muestras de roca (plugs) de una sola capa, de esta manera aprovechar óptimamente las muestras obtenidas del subsuelo que son costosas y difíciles de obtener.

Inicialmente se debe tomar como referencia la película continua y verificar si es posible dar uso de esta. Para ello, se debe tener en cuenta que la capa de interés ya definida se denote a la hora de visualizar la película. Para esto se divide la metodología en dos; i) la metodología uno, cuando la película continua se visualiza correctamente en la capa de interés; y ii) la metodología dos, cuando no es posible utilizar la película continua y la capa de interés no es distinguible fácilmente.

A continuación, se procede a realizar una síntesis de las anteriores metodologías enunciadas por Narváez y Pereira.

---

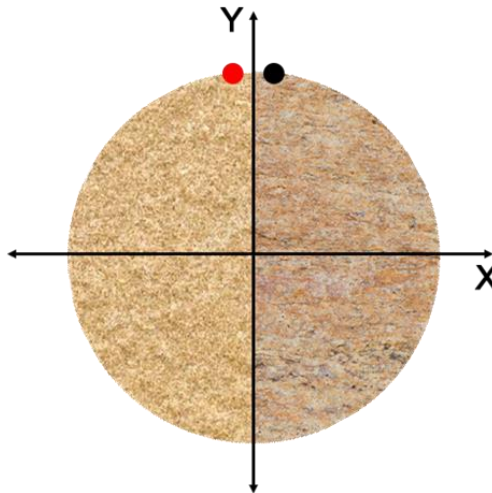
<sup>9</sup> NARVÁEZ NOVOA, PEREIRA SANTANA. Óp. Cit.

#### 4.1 METODOLOGÍA UNO

Inicialmente se verifica que se pueda usar la película continua en la imagen radial del reporte de tomografía, seguido a esto se analiza si el contacto entre las capas se encuentra paralelo al eje Y, si sucede esto, indica que la capa de interés ya se encuentra como filo y no se debe medir ningún buzamiento, de lo contrario se debe medir el rumbo de la capa de interés respecto al eje Y, ese rumbo medido es el ángulo que se necesita girar la manga para que el contacto litológico forme 90 grados con respecto a la horizontal como se ilustra en la figura 6.

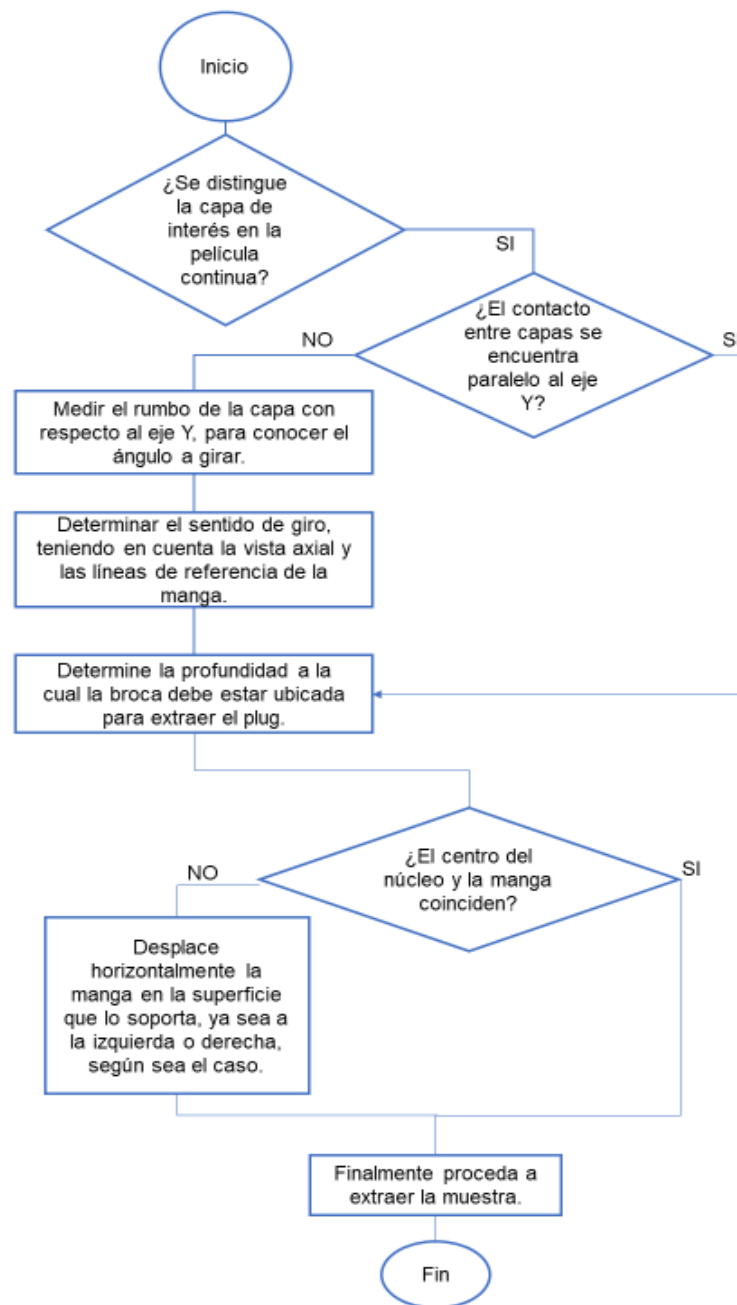
Luego de esto se debe proceder a la corrección del centro de la manga y el centro del núcleo si es necesario, como se muestra en el diagrama de flujo en la figura 7.

Figura 6. Ejemplo de contacto litológico, llevado a 90 grados respecto a la horizontal



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 69.

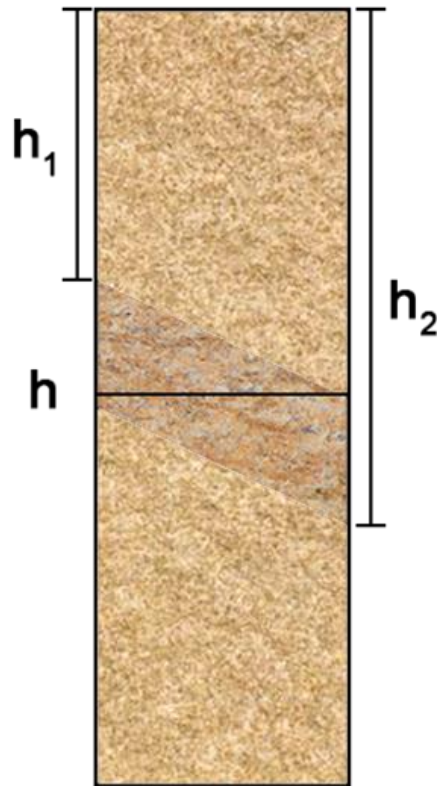
Figura 7. Diagrama de flujo para la metodología uno.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 69.

Posteriormente se determina la profundidad en el núcleo a la cual la broca debe estar ubicada para obtener el plug del centro de la capa de interés haciendo uso de la ecuación 1; y de esta forma asegurar que la muestra sea de un solo litotipo y cuente con una longitud equivalente al diámetro del núcleo, como se muestra en la figura 8. Finalmente se procede a extraer el plug.

Figura 8. Imagen explicativa para hallar la profundidad a la cual extraer el plug.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 70.

$$h = \frac{h_2 - h_1}{2} + h_1$$

**Ecuación 1**

Donde:

$h$ : Distancia adecuada para la extracción del plug.

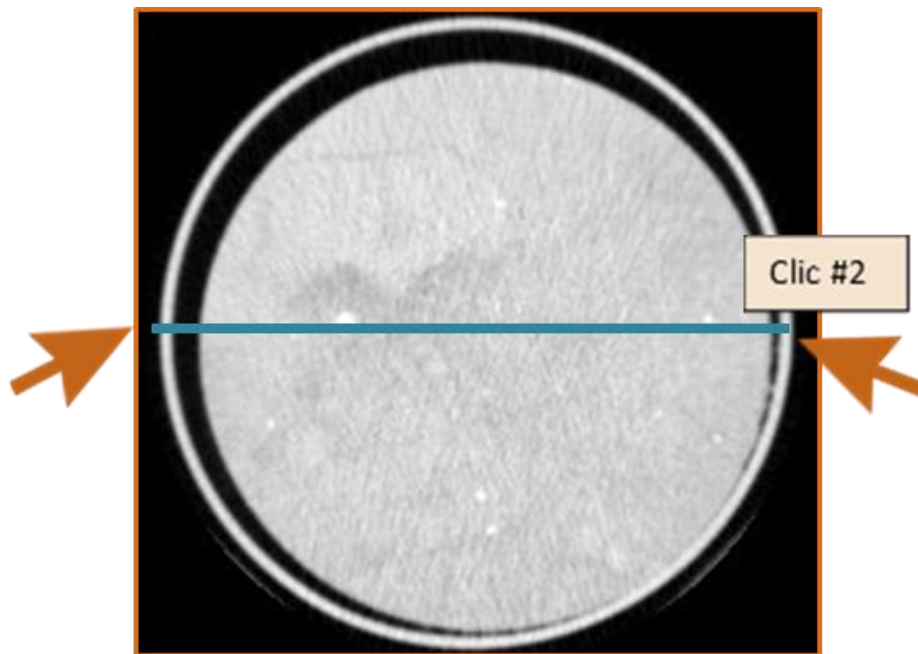
$h_1$ : Distancia que hay entre el tope del núcleo y el tope de la capa de interés.

$h_2$ : Distancia del tope del núcleo y la base de la capa de interés.

**4.1.1 Variables de entrada.** Una variable de entrada en términos informáticos es cualquier dato suministrado por el usuario, ya sea de manera directa o indirecta.

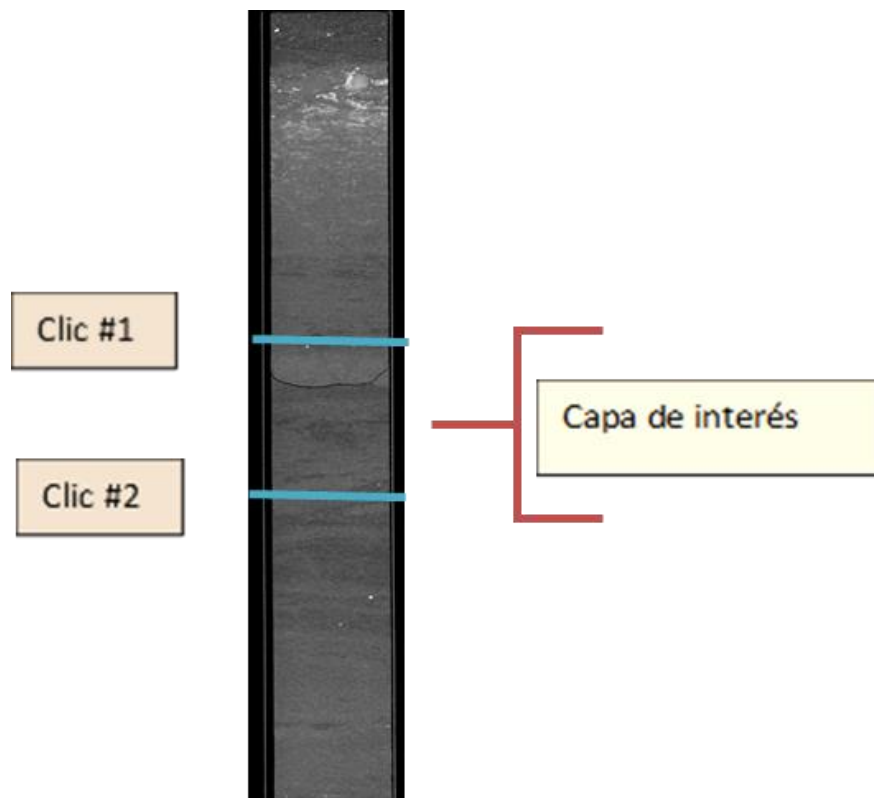
- Cargar imagen radial: En esta variable el usuario carga la imagen radial del reporte de tomografía al programa.
- Cargar imagen XZ/YZ: En esta variable el usuario carga la imagen XZ/YZ del reporte de tomografía al programa.
- Cargar cortes: En esta variable el usuario carga las imágenes de los cortes axiales de la vista XY del reporte de tomografía al programa.
- Tipo de imagen (XZ/YZ): En esta variable el usuario escoge cuál de los dos tipos de imagen cargó al programa XZ o YZ.
- Diámetro externo de la manga: El usuario ingresa esta variable con la ayuda de dos clics sobre la imagen del corte seleccionado en la vista XY donde represente el inicio y el final de la manga, (ver figura 9).

Figura 9. Ilustración para el cálculo de la variable diámetro externo de la manga.



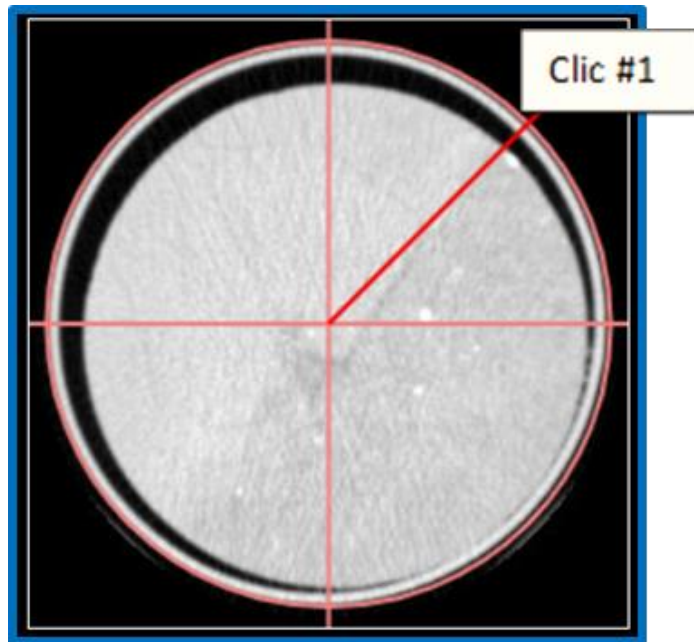
- Tope del núcleo: el usuario digita el valor de la variable en una casilla predeterminada al lado de la imagen radial.
- Profundidad inicial de la Capa de interés: el usuario ingresa esta variable con la ayuda de un clic sobre la imagen de la vista XZ o YZ donde representa el inicio de la capa de interés, (ver figura 10).
- Profundidad final de la capa de interés: el usuario ingresa esta variable con la ayuda de un clic sobre la imagen de la vista XZ o YZ donde representa el final de la capa de interés, (ver figura 10).

Figura 10. Ilustración para el cálculo de la profundidad inicial y final de la capa de interés.



- Selección de ángulo de giro en el corte XY: en esta variable el usuario hace clic en el contacto litológico para el cálculo del ángulo de giro, (ver figura 11).

Figura 11. Ilustración para el cálculo del ángulo de giro en el corte XY.



- Orientación del sentido de giro del corte: el usuario selecciona el sentido de giro del corte XY de acuerdo con el reporte de tomografía utilizado, teniendo en cuenta la guía de la tabla 3.
- Distancia medida entre el núcleo y la manga: el usuario hace dos clics para el cálculo de esta variable, el primer clic se hace desde el borde externo de la manga y el segundo clic en el borde externo del núcleo, (ver figura 12).

Figura 12. Ilustración para el cálculo de la distancia entre el borde externo de la manga y el borde externo del núcleo.

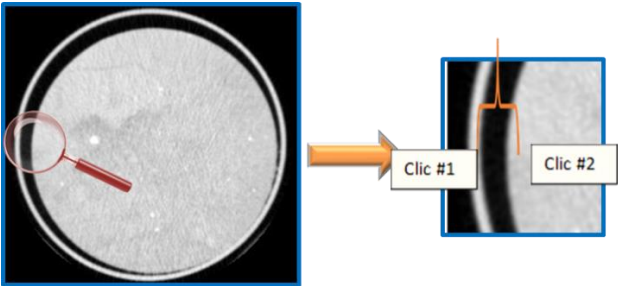


Tabla 3. Guía para la orientación del sentido de giro en un corte.

| Corte vertical<br>(Plano XZ-<br>Vista<br>Posterior) | Vista axial | Sentido de<br>giro<br>respecto a<br>la vista axial | Sentido de<br>giro respecto<br>a las líneas<br>de<br>orientación<br>de la manga |
|-----------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     |             | Hacia la<br>línea roja                             | Hacia la<br>línea roja                                                          |
|                                                     |             | Hacia la<br>línea roja                             | Hacia la<br>línea roja                                                          |

Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 59.

**4.1.2 Variables de salida y sus interacciones.** Una variable de salida es aquella que es calculada por la computadora en un proceso informático. Son datos derivados, es decir, obtenidos a partir de las variables de entrada.

Teniendo en cuenta las variables de entrada y de salida existen unas interacciones entre ellas que se deben tener en cuenta a la hora de programar el modelo computacional, a continuación, se describen cada una de estas interacciones.

- Base del núcleo: esta variable es calculada a partir de la variable de entrada “tope del núcleo”, esto lo hace interactuando con la imagen radial cargada por el usuario, usando la cantidad de pixeles que existen en la dimensión “alto de la imagen” y correlacionándolo con la distancia que representa en pies (ft).
- Longitud del núcleo: esta variable es calculada en base a las dimensiones de la imagen radial cargada, utilizando una relación entre la cantidad de pixeles que existen en la dimensión “alto de la imagen” y correlacionándolo con la distancia que representa en pies (ft).
- Diámetro del núcleo: esta variable es calculada a partir de la imagen cilíndrica del núcleo cargada por el usuario, interactúa con la dimensión “ancho” de la imagen radial, teniendo en cuenta que esta imagen representa un cilindro de perímetro  $2\pi r$ , con lo cual se realiza una igualdad matemática entre la cantidad de pixeles de la dimensión “ancho” y el perímetro del círculo inscrito del núcleo representado en la imagen radial.
- Calculo de la distancia del diámetro externo de la manga: esta variable es calculada con los datos obtenidos por los dos clics ingresados en la variable de entrada “cálculo de la distancia del diámetro externo de la manga en la vista XY”, interactuando con la cantidad de pixeles que existen en la distancia de los clics

que proporciona el usuario, arrojando como resultado el valor en pulgadas (in) que representa esta distancia.

- Espesor de la capa de interés: esta variable es calculada a partir de las variables de entrada profundidad inicial y final de la capa de interés.
- Profundidad inicial de la capa de interés: esta variable es el resultado de la correlación del clic dado por el usuario con respecto a la profundidad de la imagen XZ o YZ, interactuando con la cantidad de píxeles representados desde el tope de la imagen hasta el clic inicial proporcionado por el usuario, obteniendo como resultado el valor de la profundidad inicial de la capa de interés.
- Profundidad final de la capa de interés: esta variable es el resultado de la correlación del clic dado por el usuario con respecto a la profundidad de la imagen XZ o YZ, interactuando con la cantidad de píxeles representados desde el tope de la imagen hasta el clic final proporcionado por el usuario, obteniendo como resultado el valor de la profundidad final de la capa de interés.
- Profundidad para extraer el plug: esta variable es calculada teniendo en cuenta la capa de interés, el tope y la base, interactúan entre ellas de acuerdo con la ecuación 1.
- Angulo de giro: esta variable es calculada a partir de la variable de entrada “cálculo del ángulo de giro”, en el corte de la vista XY, haciendo uso del eje Y como referencia para hallar el ángulo hasta la posición indicada por el usuario.
- Distancia para desplazar entre el núcleo y manga: esta variable es calculada a partir de la correlación de las dimensiones de la imagen del corte cargado de la vista XY y la distancia proporcionada por los dos clics del usuario en la variable “cálculo de la distancia”, interactúan entre sí por medio de la cantidad de píxeles

que representan las distancias entre los clics que proporciona el usuario. Una vez se mida esta distancia se debe ingresar el dato en la ecuación 2.

$$D = |R - r - a|$$

**Ecuación 2**

Donde:

$D$ : distancia a desplazar

$R$ : radio externo de la manga

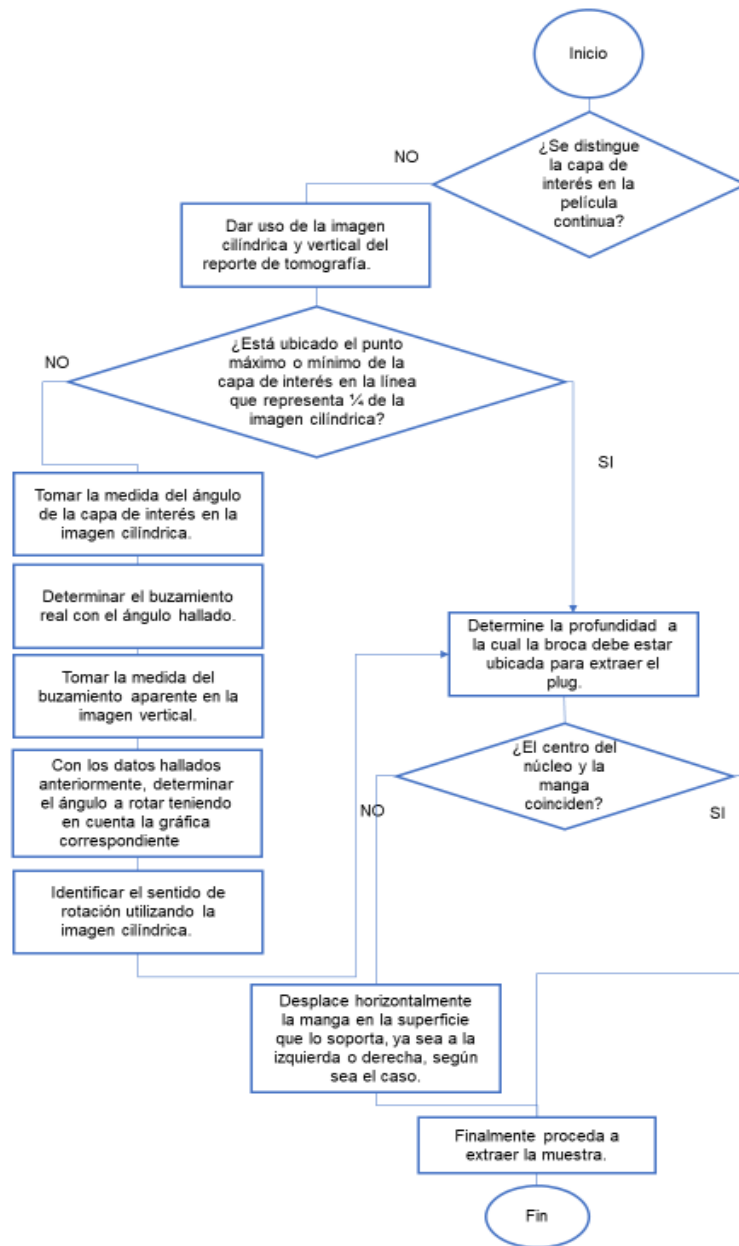
$r$ : radio del núcleo

$a$ : distancia medida

## **4.2 METODOLOGÍA DOS**

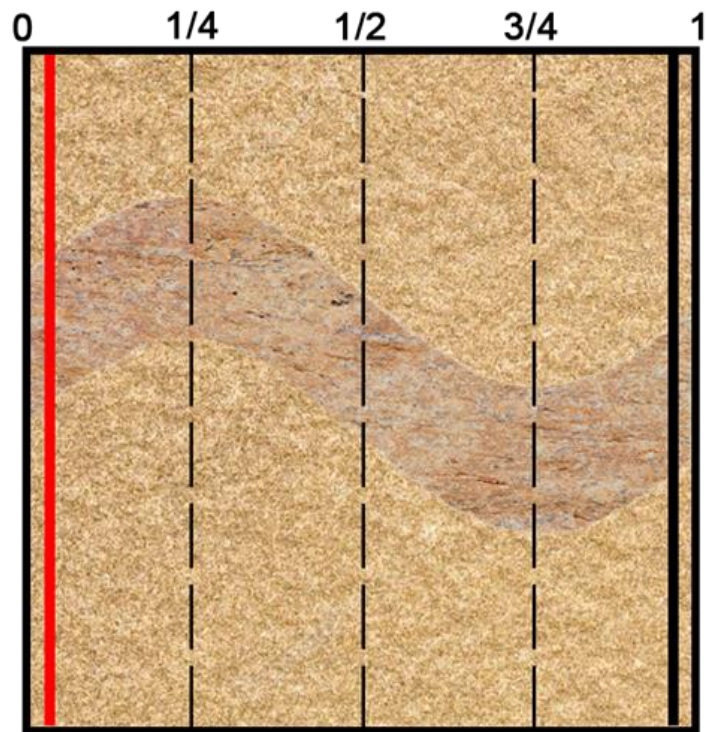
Esta metodología se usa cuando no es posible la visualización de la película continua, inicialmente se usa la imagen cilíndrica del reporte de tomografía y se localiza la capa de interés, en esta capa se analiza si el estrato de interés se encuentra como filo, para esto se utiliza una línea imaginaria localizada a  $\frac{1}{4}$  de la imagen y se analiza sobre esta si existe un punto máximo o mínimo de la senoide (ver figura 14), si no se cumple esta condición se deben calcular el buzamiento aparente y el buzamiento real para poder calcular el ángulo de giro y posteriormente calcular la profundidad a la cual se debe extraer el núcleo, además de la corrección del centro del núcleo con respecto al centro de la manga si es necesario, como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 13.

Figura 13. Diagrama de flujo para la metodología dos.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p.7 8.

Figura 14. Imagen cilíndrica, con un punto máximo en  $\frac{1}{4}$  de la imagen.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 62.

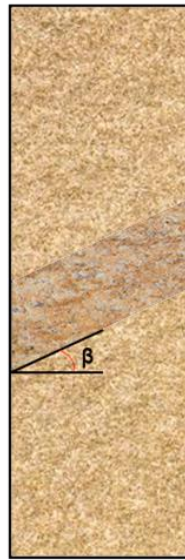
#### 4.2.1 Variables de entrada.

- Cargar imagen radial: en esta variable el usuario carga la imagen radial del reporte de tomografía al programa.
- Carga imagen XZ/YZ: en esta variable el usuario carga la imagen XZ/YZ del reporte de tomografía al programa.

- Carga cortes: en esta variable el usuario carga las imágenes de los cortes axiales de la vista XY del reporte de tomografía al programa.
- Tipo de imagen (XZ/YZ): en esta variable el usuario escoge cuál de los dos tipos de imagen subió al programa XZ o YZ.
- Diámetro externo de la manga: el usuario ingresa esta variable con la ayuda de dos clics sobre la imagen del corte seleccionado en la vista XY donde represente el inicio y el final de la manga. (ver figura 9).
- Espesor de la capa de interés: el usuario digita el valor de la variable en una casilla predeterminada.
- Tope del núcleo: el usuario digita el valor de la variable en una casilla predeterminada al lado de la imagen radial.
- Profundidad inicial de la Capa de interés: el usuario ingresa esta variable con la ayuda de un clic sobre la imagen de la vista XZ o YZ donde representa el inicio de la capa de interés. (ver figura 10)
- Profundidad final de la capa de interés: el usuario ingresa esta variable con la ayuda de un clic sobre la imagen de la vista XZ o YZ, donde representa el final de la capa de interés. (ver figura 10)
- Ángulo alfa de la imagen cilíndrica: el usuario selecciona con un clic el punto máximo y el punto mínimo en la imagen radial, cargada por el usuario para el cálculo del ángulo alfa.

- Buzamiento Aparente: haciendo uso de la imagen XZ o YZ cargada por el usuario se calcula el buzamiento aparente haciendo clic en el punto máximo y el punto mínimo del estrato formando un ángulo como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Calculo del buzamiento aparente usando la imagen XZ/YZ.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 73.

- Sentido de rotación: el usuario ingresa el sentido de rotación teniendo en cuenta la concavidad de la sinusoide. Como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Guía para el sentido de la rotación, teniendo en cuenta la concavidad de la senoide.

Si la senoide tiene concavidad hacia arriba, indica la presencia de un mínimo, ya sea de 0 - 1/4 o 1/4 – 1/2 de la imagen cilíndrica.

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| 0 – 1/4   | Gire hacia la derecha   |
| 1/4 – 1/2 | Gire hacia la izquierda |

Si la senoide tiene concavidad hacia abajo, indica la presencia de un máximo, ya sea de 0 – 1/4 o 1/4 – 1/2 de la imagen cilíndrica.

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| 0 – 1/4   | Gire hacia la derecha   |
| 1/4 – 1/2 | Gire hacia la izquierda |

- Distancia medida entre el núcleo y la manga: el usuario hace dos clics para el cálculo de esta variable, el primer clic se hace desde el borde externo de la manga y el segundo clic en el borde externo del núcleo. (ver figura 12).

#### 4.2.2 Variables de salida y sus interacciones.

- Base del núcleo: esta variable es calculada a partir de la variable de entrada “tope del núcleo”, esto lo hace interactuando con la imagen radial cargada por el usuario, usando la cantidad de pixeles que existen en la dimensión “alto de la imagen” y correlacionándolo con la distancia que representa en pies (ft).
- Longitud del núcleo: esta variable es calculada en base a las dimensiones de la imagen radial cargada, utilizando una relación entre la cantidad de pixeles que existen en la dimensión “alto de la imagen” y correlacionándolo con la distancia que representa en pies (ft).

- **Diámetro del núcleo:** esta variable es calculada a partir de la imagen cilíndrica del núcleo cargada por el usuario, interactúa con la dimensión “ancho” de la imagen radial, teniendo en cuenta que esta imagen representa un cilindro de perímetro  $2\pi r$ , con lo cual se realiza una igualdad matemática entre la cantidad de píxeles de la dimensión “ancho” y el perímetro del círculo inscrito del núcleo representado en la imagen radial.
- **Cálculo de la distancia del diámetro externo de la manga:** esta variable es calculada con los datos obtenidos por los dos clics ingresados en la variable de entrada “cálculo de la distancia del diámetro externo de la manga en la vista XY”, interactuando con la cantidad de píxeles que existen en la distancia de los clics que proporciona el usuario, arrojando como resultado el valor en pulgadas (in) que representa esta distancia.
- **Profundidad inicial de la capa de interés:** esta variable es el resultado de la correlación del clic dado por el usuario con respecto a la profundidad de la imagen XZ o YZ, interactuando con la cantidad de píxeles representados desde el tope de la imagen hasta el clic inicial proporcionado por el usuario, obteniendo como resultado el valor de la profundidad inicial de la capa de interés.
- **Profundidad final de la capa de interés:** esta variable es el resultado de la correlación del clic dado por el usuario con respecto a la profundidad de la imagen XZ o YZ, interactuando con la cantidad de píxeles representados desde el tope de la imagen hasta el clic final proporcionado por el usuario, obteniendo como resultado el valor de la profundidad final de la capa de interés.
- **Profundidad para extraer el plug:** esta variable es calculada teniendo en cuenta la capa de interés, el tope y la base, interactúan entre ellas de acuerdo con la ecuación 1

- Ángulo alfa: esta variable es calculada a partir de la información ingresada por el usuario al hacer clic en el punto máximo y el punto mínimo de la senoide en la imagen radial previamente cargada.
- Buzamiento Real: esta variable es calculada a partir del ángulo alfa e interactúan directamente con la ecuación 3 y 4.

$$B_z = \frac{-0.4221 + \sqrt{\frac{5.977 + \alpha}{41.667}}}{0.012}$$

**Ecuación 3**

Corrección para buzamientos menores o iguales a 20°

$$B_z = \frac{-0.728 + \sqrt{\frac{62.4363 - \alpha}{119.05}}}{-0.0042}$$

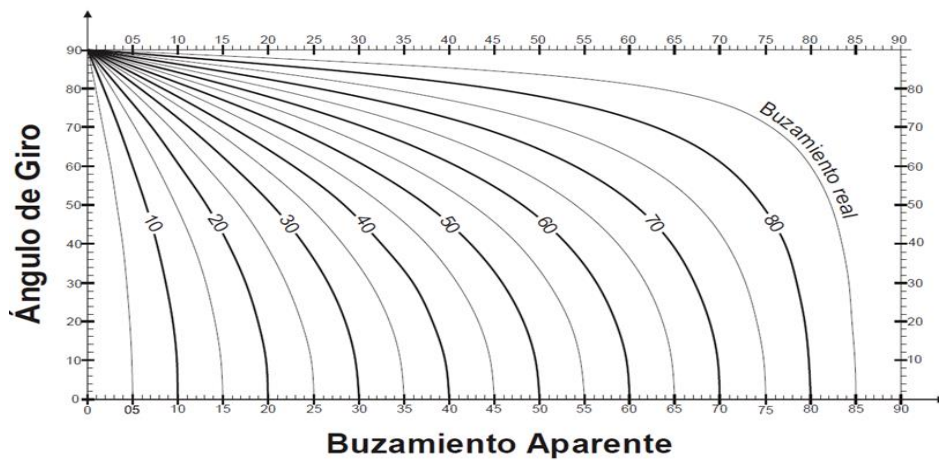
**Ecuación 4**

Donde:

$\alpha$  = Ángulo obtenido uniendo el punto más alto de la curva con el punto más bajo medido desde la horizontal.

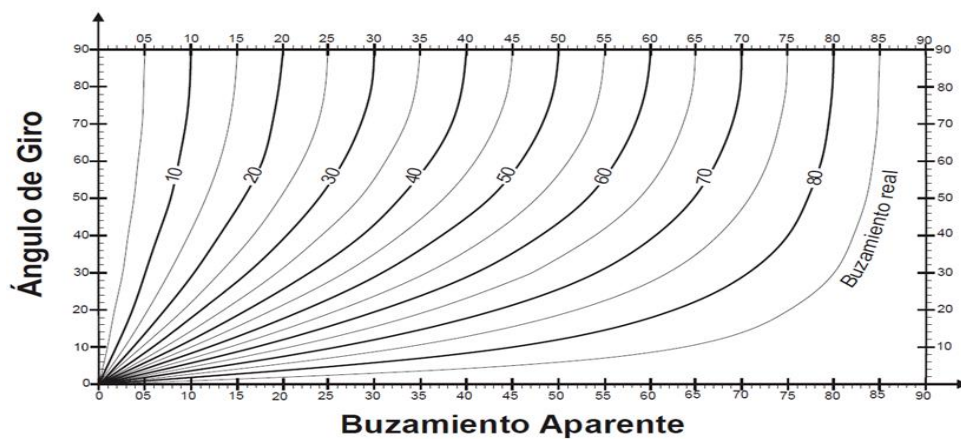
- Buzamiento aparente: esta variable se calcula utilizando la imagen XZ/YZ cargada previamente por el usuario e interactuando directamente con los clics que se usan para calcular el ángulo descrito en la figura 15.
- Angulo de giro: esta variable es calculada a partir de las variables buzamiento real y buzamiento aparente utilizando las gráficas de las figuras 16 y 17, para hallar el ángulo de giro, dependiendo de la vista de la imagen cargada XZ o YZ.

Figura 16. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte XZ.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 74.

Figura 17. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte YZ.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 75.

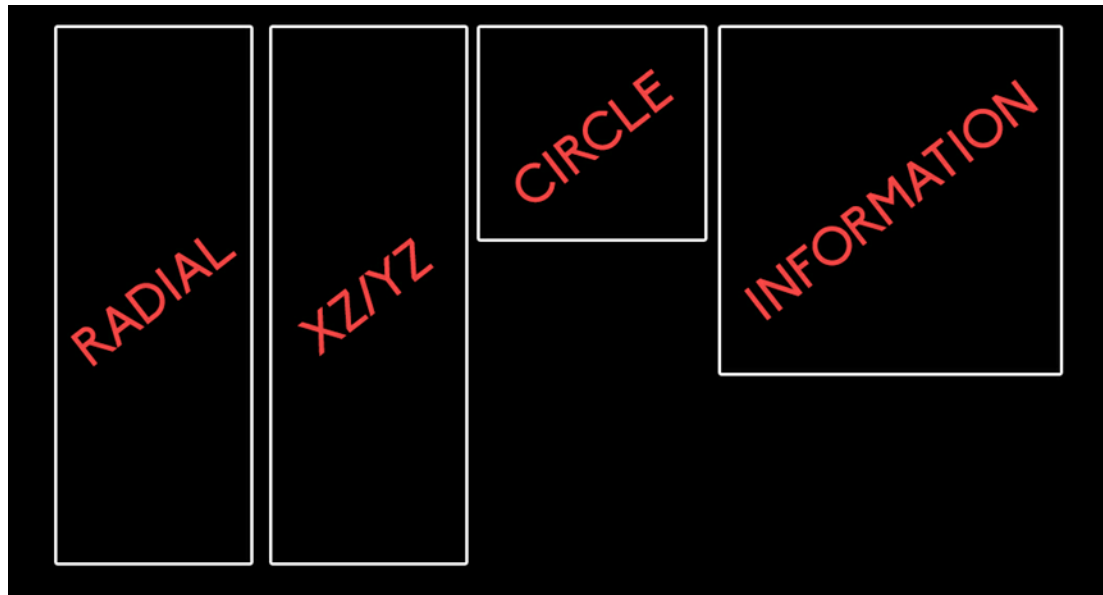
- Distancia para desplazar entre el núcleo y manga: esta variable es calculada a partir de la correlación de las dimensiones de la imagen del corte cargado de la vista XY y la distancia proporcionada por los dos clics del usuario en la variable “cálculo de la distancia”, interactúan entre sí por medio de la cantidad de píxeles que representan las distancias entre los clics que proporciona el usuario. Una vez se mida esta distancia se debe ingresar el dato en la ecuación 2.

## **5. PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO SELECCIONADO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL**

En este capítulo se muestra el proceso y funcionamiento básico del aplicativo teniendo en cuenta las bases programáticas que se usan para el desarrollo y su compilación. Para el desarrollo del proyecto se utiliza un modelo en cascada el cual se caracteriza por una serie de etapas a seguir las cuales se deben cumplir de forma sucesiva, a continuación, se muestra cada una de sus etapas para el desarrollo de cada etapa en el software:

- Especificación de requisitos: antes de iniciar con el desarrollo es necesario recolectar toda la información posible para que el desarrollo sea exitoso y no presente inconvenientes en la arquitectura al iniciar el desarrollo como tal, por lo cual se reunieron los recursos tales como imágenes, fórmulas y textos necesarios para así poder organizar el software antes de programarlo. También es muy importante el análisis de toda esta información para así definir un paso a paso en el software que haga que el resultado sea un aplicativo intuitivo para todo usuario que haga uso de éste.
- Diseño de software: para el diseño, se utiliza como base los softwares por consola, por lo que se planteó un modelo a blanco y negro con botones de color atractivos para el usuario, para éste diseño se realizaron primero ciertos modelos de mockups que definieron el espacio e uso de cada una de las funciones que incluye el aplicativo, el mockup final utilizado se puede ver en la figura 18.

Figura 18. Mockup utilizado para el diseño del software.



- Construcción o implantación del software: una vez definidos los requerimientos y teniendo como base un mockup para el diseño del software se prosigue a programar haciendo uso de las tecnologías web, se opta por realizar un software web en vez de un software de escritorio por razones de portabilidad, eficiencia, accesibilidad y eficacia, ya que el software es construido con tecnologías web que renderizan la página en tiempo real cada vez que se notifica un cambio, algo esencial para éste tipo de aplicativos que requieren que la información se esté mostrando todo el tiempo y que cada acción que se realice sobre las imágenes repercuta en la información mostrada al usuario.
- Integración: la fase de integración básicamente es el acoplamiento de las diferentes tecnologías para poder generar el software, ya que en los softwares web se suelen manejar distintas tecnologías para diferentes propósitos, más adelante se comenta cada una de las tecnologías utilizadas y en qué punto del aplicativo se encuentra su uso.

- Despliegue: el proceso de despliegue del aplicativo es subir el software web creado a un dominio y webhosting, herramientas fundamentales para que un sitio web sea público y accesible por cualquier usuario que tenga el enlace a éste, mientras el software estuvo en desarrollo se creó un webhosting local para poder hacer las pruebas y control de calidad del software.

Además del modelo de desarrollo, al momento de desarrollar el software se utilizó una metodología de programación por capas, donde se separó el software en dos partes, cliente y servidor, donde el cliente es la parte visual con la cual el usuario final interactúa con el aplicativo y el servidor es donde se procesan los datos suministrados por el usuario para poder así hacer cálculos y dar respuesta al usuario.

Generalmente en la metodología de programación por capas se divide en 3 capas cada software, la capa de presentación, la capa de negocio y la capa de datos, pero en este modelo de software sólo se manejó la capa de presentación y la capa de negocio de la siguiente forma:

- Capa de presentación: es toda la parte visual del aplicativo, todas las entradas que se le requieren al usuario para que el software haga sus procesos y retorne las respuestas a los valores introducidos por el usuario.
- Capa de negocio: en esta capa es donde se están haciendo todas las validaciones de la información suministrada y todos los cálculos que se deben realizar para así retornar la respuesta que el usuario está esperando.

No se implementó la capa de datos ya que no se hizo necesario el uso de una base de datos para el almacenamiento de la información debido a que el software es específico para el momento de uso y no para consultas futuras, pero en su mantenimiento podría contemplarse el incluir un motor de base de datos al proyecto,

teniendo en cuenta que esto incluye un mantenimiento superior, tiempo de desarrollo superior y costos más elevados a la hora del despliegue.

## **5.1 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**

Para la programación del algoritmo solución del modelo computacional se debe tener en cuenta las herramientas necesarias, es el caso de los lenguajes de programación que son el sistema de comunicación del software, específicamente para este proyecto, se tienen en cuenta los siguientes lenguajes de programación:

- **HTML:** sigla en inglés de HyperText Markup Language (lenguaje de marcas de hipertexto), hace referencia al lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web. Es un estándar que sirve de referencia del software que conecta con la elaboración de páginas web en sus diferentes versiones, define una estructura básica y un código (denominado código HTML) para la definición de contenido de una página web, como texto, imágenes, videos, juegos, entre otros. Es un estándar a cargo del World Wide Web Consortium (W3C) o Consorcio WWW, organización dedicada a la estandarización de casi todas las tecnologías ligadas a la web, sobre todo en lo referente a su escritura e interpretación. Se considera el lenguaje web más importante siendo su invención crucial en la aparición, desarrollo y expansión de la World Wide Web (WWW). Es el estándar que se ha impuesto en la visualización de páginas web y es el que todos los navegadores actuales han adoptado.

Principalmente se utiliza para definir las etiquetas que debe utilizar la página, donde cada etiqueta tiene una funcionalidad, entre las etiquetas utilizadas en el programa se destacan las etiqueta “canvas”, las cuales son un lienzo sobre el cuál se nos permite mediante la tecnología javascript (La cual se comenta más adelante), poder

plasmar imágenes, líneas o figuras geométricas sobre un contenedor rectangular y así mismo poder programar funciones que apliquen a éstos elementos definidos anteriormente (ver figura 19).

Figura 19. Definición de elemento canvas para las imágenes radiales.

```
<div class="wrapper" >
  <div class="panelRadial">
    <input type="file" id="imgLoaderRadial" name="imageLoader" ng-model="imgLoadr" style="opacity: 0; position: absolute; margin-left: -5000px;" >
    <button type="button" class="btn btn-info" ng-click="openImgLoaderRadial()">
    <span class="glyphicon glyphicon-search"></span> Subir Imagen Radial
  </button><br><br>
  <canvas id="canvasRadial"></canvas>
  <br>
  Muestra: {{radiusFt}} ft
</div>
<!-- FIN PANEL RADIAL -->
```

Fuente: Ruta: /index.html

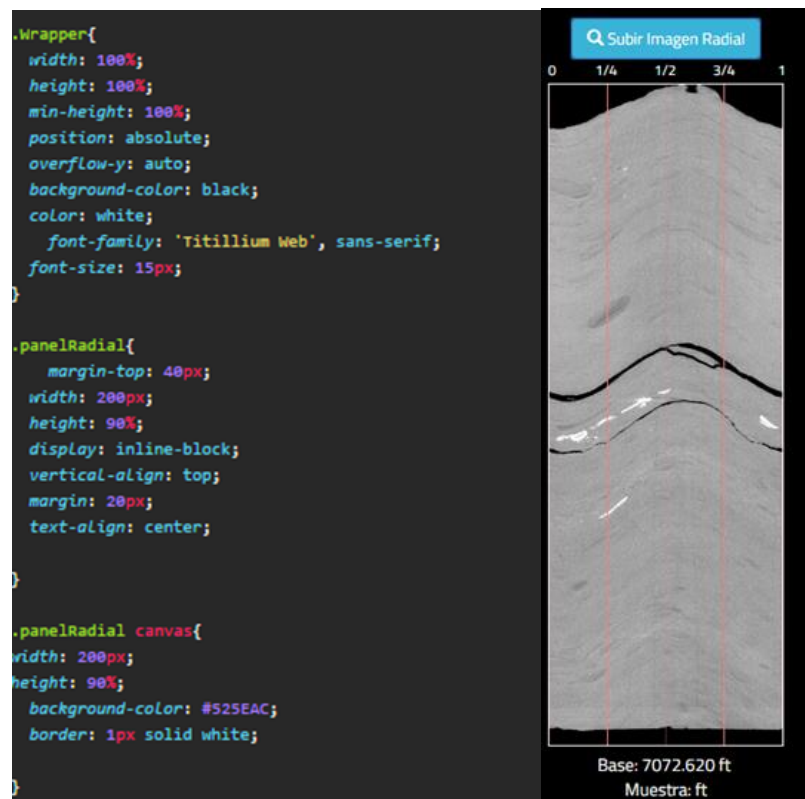
Pero para el funcionamiento de la etiqueta canvas es necesario hacer uso de la etiqueta input la cual permite al usuario la subida de archivos o texto para ser procesados y dar una respuesta ya sea en el canvas o una respuesta textual en la plataforma.

- CSS: siglas en inglés de Cascading Style Sheets, en español "Hojas de estilo en cascada", es un lenguaje de diseño gráfico para definir y crear la presentación de un documento estructurado escrito en un lenguaje de marcado. Es muy usado para establecer el diseño visual de los documentos web, e interfaces de usuario escritas en HTML o XHTML; el lenguaje puede ser aplicado a cualquier documento XML, incluyendo XHTML, SVG, XUL, RSS, etcétera.

Junto con HTML y JavaScript, CSS es una tecnología usada por muchos sitios web para crear páginas visualmente atractivas, interfaces de usuario para aplicaciones web, y GUIs para muchas aplicaciones móviles

Esta tecnología se encarga de que el aplicativo tenga una presentación decente, el css define el estilo en general de la página, desde botones, fuentes, texto y todo el contenido visual del software, un ejemplo de css puede verse en la figura 20.

Figura 20. Estilo de los contenedores de imágenes.



Fuente: Ruta: css/containers.css

En el ejemplo de la figura 20 se define el *Wrapper* como el fondo y fuente por defecto del software, y la clase *panelRadial* es la imagen que se contempla a la derecha, css aplica bordes blancos, color de fondo y demás atributos que hacen que el software se vea bien estéticamente.

- Javascript: JavaScript (abreviado comúnmente JS) es un lenguaje de programación interpretado, dialecto del estándar ECMAScript. Se define como orientado a objetos, basado en prototipos, imperativo, débilmente tipado y dinámico.

Se utiliza principalmente en su forma del lado del cliente, implementado como parte de un navegador web permitiendo mejoras en la interfaz de usuario y páginas web dinámicas, aunque existe una forma de JavaScript del lado del servidor.

Es utilizado en la realización de todos los procesos del aplicativo, con este lenguaje haciendo uso de un framework o librería llamada Angular, gracias a éste lenguaje se realizan todos los procesos de cálculos que contiene la aplicación, se dan respuestas en tiempo real y se valida que toda la información suministrada sea correcta (ver figura 21).

Figura 21. Cálculo del buzamiento real usando Javascript.

```
angleCalc = theta
angular.element(document.getElementById('angularElem')).scope().angleRadial = theta
if(parseFloat(angleCalc) <= 20){

    var raiz = Math.sqrt((62.4363-parseFloat(angleCalc)));

    var operacion = ((raiz/119.05)-0.728);

    operacion = operacion/(-0.0042);

}else{

    var raiz = Math.sqrt((5.977+parseFloat(angleCalc)));
    var operacion = ((raiz/41.667)-0.4221);

    operacion = operacion/(-0.012);

}
angular.element(document.getElementById('angularElem')).scope().buzamientoReal = parseFloat(operacion).toFixed(2)
```

Fuente: Ruta: js/uploader.jsl

- Angular: es un framework de JavaScript de código abierto, mantenido por Google, que se utiliza para crear y mantener aplicaciones web de una sola página. Su objetivo es aumentar las aplicaciones basadas en navegador con capacidad de Modelo Vista Controlador (MVC), en un esfuerzo para hacer que el desarrollo y las pruebas sean más fáciles.

La biblioteca lee el HTML que contiene atributos de las etiquetas personalizadas adicionales, entonces obedece a las directivas de los atributos personalizados, y une las piezas de entrada o salida de la página a un modelo representado por las variables estándar de JavaScript. Los valores de las variables de JavaScript se pueden configurar manualmente, o recuperados de los recursos JSON estáticos o dinámicos.

Esta librería permite añadir dinamismo a las páginas, es decir, hace que el sitio web se vuelva más interactivo para el usuario simulando un software o un aplicativo móvil, angular permite que la interfaz se actualice en tiempo real cuando el usuario que está haciendo uso del sitio web realice una acción, esto sin necesidad de recargar la página, por lo cual se trata como una tecnología de respuesta en tiempo real.

Además, todas las variables del software se almacenan haciendo uso de Angular, para que cuando un valor llegue a afectar una variable que está enlazada con otra, ambas variables actualicen sus valores en tiempo real y así el software sea preciso.

- PHP: acrónimo recursivo en inglés de PHP Hypertext Preprocessor (preprocesador de hipertexto), es un lenguaje de programación de propósito general de código del lado del servidor originalmente diseñado para el desarrollo web de contenido dinámico. Fue uno de los primeros lenguajes de programación del lado del servidor que se podían incorporar directamente en un documento HTML en lugar de llamar a un archivo externo que procese los datos. El código

es interpretado por un servidor web con un módulo de procesador de PHP que genera el HTML resultante.

PHP ha evolucionado por lo que ahora incluye también una interfaz de línea de comandos que puede ser usada en aplicaciones gráficas independientes. Puede ser usado en la mayoría de los servidores web al igual que en muchos sistemas operativos y plataformas sin ningún costo.

Fue creado originalmente por Rasmus Lerdorf en el año 1995. Actualmente el lenguaje sigue siendo desarrollado con nuevas funciones por el grupo PHP. Este lenguaje forma parte del software libre publicado bajo la licencia PHPv3\_01, es una licencia *Open Source* validada por *Open Source Initiative*. La licencia de PHP es del estilo de licencias BSD, esta licencia no tiene restricciones de copyleft asociadas con GPL; PHP ha evolucionado por lo que ahora incluye también una interfaz de línea de comandos que puede ser usada en aplicaciones gráficas independientes. Puede ser usado en la mayoría de los servidores web al igual que en muchos sistemas operativos y plataformas sin ningún costo.

Para el desarrollo del software se utilizó PHP como un lenguaje de programación para el manejo de subida de archivos, específicamente en la subida de los cortes, como tal php nos permite subir un archivo de tipo zip, desempaquetarlo y procesar los archivos que están dentro, en éste caso imágenes.

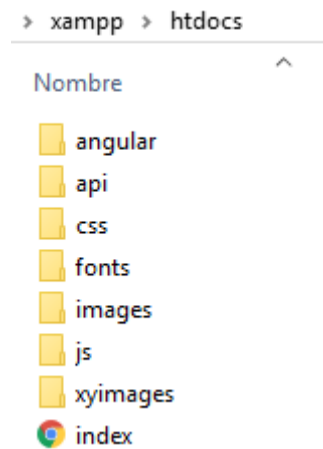
PHP recorre todas las imágenes dentro del archivo comprimido, verifica que sean imágenes y luego va tomando los nombres de cada imagen extrayendo únicamente los números en los nombres para poder así organizar las imágenes para luego ser procesadas en el software cuando el usuario elige el corte en la imagen radial.

- Entorno de Desarrollo(IDE) – Atom: para el desarrollo del aplicativo se tomó como editor de código “Atom”, el cual es un software libre que agiliza el desarrollo de los aplicativos haciendo sugerencia tanto para código HTML, CSS o Javascript.

## 5.2 ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS

El proyecto se encuentra organizado por carpetas que están asociadas a un lenguaje de programación específico, como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Distribución de carpetas asociadas al desarrollo del aplicativo.



- Angular: contiene los archivos del framework para poder ser utilizado sin la necesidad de internet
- Css: contiene todos los archivos del diseño del software

- Fonts: contiene las fuentes utilizadas para el software, la fuente que se utilizó para el desarrollo del software es “Quicksand”, la cual es gratuita y puede ser descargada desde Google Fonts
- Js: contiene todos los archivos javascript del software tanto librerías de uso rápido como jQuery, como las funcionalidades en general del aplicativo, los archivos que fueron desarrollados para el proyecto son los siguientes:
  - o App.js
  - o Controller.js
  - o Uploader.js
- Xyimages: es la carpeta contenedora de las imágenes XY, en esta carpeta se almacenarán las imágenes correspondientes a cada posible corte realizado en la imagen radial
- Index.html: es el archivo HTML base que contiene toda la aplicación, también actúa como ejecutable y es el primer archivo que los navegadores interpretan como página “Home” de un sitio web.

### **5.3 FUNCIONAMIENTO DEL APLICATIVO**

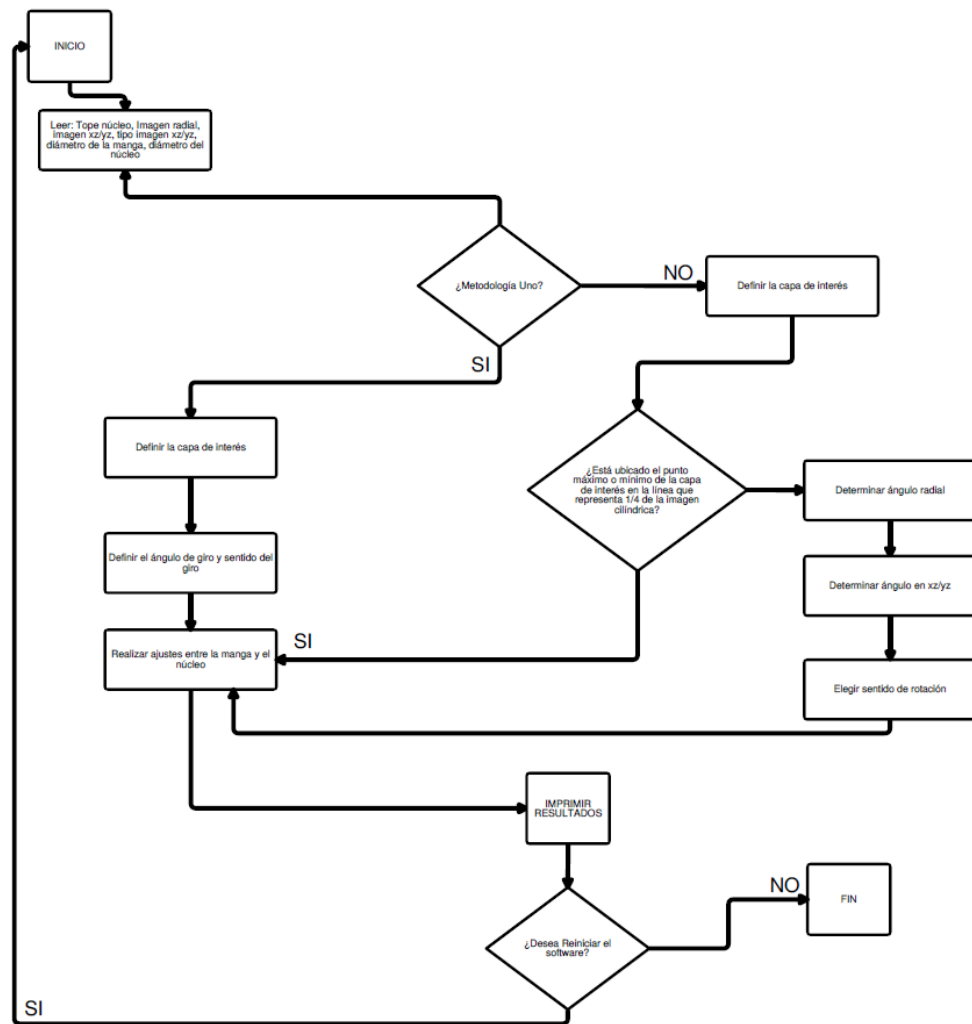
Por defecto el software pide al usuario que suba las imágenes y defina valores estándar como el espesor de la capa de interés, una vez el usuario provee éstos valores se le da la opción de elegir que metodología aplica para el caso que va a utilizar, pero antes de poder acceder Javascript valida la información proveída por el usuario para asegurarse de que todo está bien y no existirá un problema al ejecutar el programa, una vez valida que la información completa procede con la metodología elegida.

A lo largo de la metodología Javascript es el que se va encargando de la interacción del usuario con las imágenes cargadas, es la tecnología que hace los cálculos de los ángulos, buzamientos, distancias, cortes y demás.

Como tal Javascript se maneja con variables definidas las cuales van tomando distintos valores a medida que el usuario va haciendo el ciclo definido en el software, recibe ciertas variables de entrada como pueden ser los clics sobre las imágenes, como el seleccionar cierta información como lo es la orientación del giro del ángulo sobre la imagen XY, en base a ésta información almacenada en dichas variables Javascript realiza los cálculos pertinentes y es el que gracias a Angular le informa al HTML que hubo un cambio y éste lo refleja para el usuario sin la necesidad de estar recargando la página, o estar moviéndose entre distintas páginas.

En la figura 23 se muestra el diagrama de flujo del modelo computacional desarrollado. Para tener un mejor entendimiento del programa y su funcionamiento se realiza un tutorial de uso que se encuentra en el Anexo A.

Figura 23. Diagrama de flujo del modelo computacional.



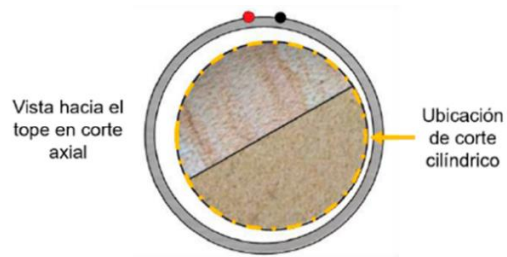
## **6. COMPARACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL CON DATOS REALES DE TOMOGRAFÍA.**

Para el último paso en el proceso de programación del modelo computacional se hace una comparación con un ejercicio resuelto obtenido del trabajo de Narváez y Pereira 2016, con el fin verificar su funcionamiento y calcular un posible error asociado a la utilización del software.

Los datos del ejercicio resuelto son:

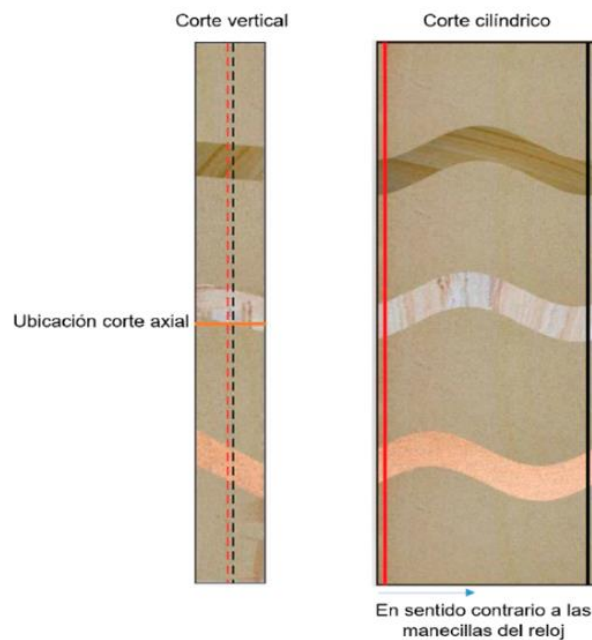
- Diámetro del núcleo: 4 in
- Longitud del núcleo: 3 ft
- Diámetro externo de la manga de aluminio: 5 in
- Espesor de la capa de interés: 2 in
- La capa de interés: se encuentra entre las profundidades de 6,613.4 a 6613.58 ft.
- Para este caso se tendrá como referencia las siguientes imágenes las cuales representan las dadas por un reporte de tomografía.

Figura 24. Imagen XY del ejemplo dado



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 75.

Figura 25. Imagen del corte vertical y el corte cilíndrico del ejemplo dado.



Fuente: NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016. p. 75.

## 6.1 METODOLOGÍA NÚMERO UNO.

Aplicando la metodología número uno, anteriormente descrita en este trabajo y desarrollada de manera detallada en el proyecto Narváez y Pereira, 2016. Se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados obtenidos a partir de la metodología número uno aplicando datos reales.

| <b>VARIABLE</b>                                            | <b>VALOR</b> |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Ángulo de giro</b>                                      | 60°          |
| <b>Profundidad a la cual extraer el plug</b>               | 6613,49 ft   |
| <b>Tope del núcleo</b>                                     | 6612         |
| <b>Base del núcleo</b>                                     | 6615         |
| <b>Distancia para desplazar entre el núcleo y la manga</b> | 0.16 in      |

Seguido de esto se aplica la metodología número uno con el modelo computacional desarrollado en el presente trabajo, se obtienen los siguientes resultados, en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados Obtenidos de la Metodología número uno aplicando el modelo computacional propuesto.

| VARIABLE                                            | VALOR       |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Longitud del núcleo                                 | 2.98 ft     |
| Diámetro del núcleo                                 | 4.00 in     |
| Diámetro externo de la manga                        | 4.3937 in   |
| Tope del núcleo                                     | 6612 ft     |
| Espesor de la capa de interés                       | 2 in        |
| Profundidad inicial de la capa de interés           | 6613.377    |
| Profundidad final de la capa de interés             | 6613.601 ft |
| Profundidad para extraer el plug                    | 6613.489 ft |
| Angulo de giro XY                                   | 59.84°      |
| Distancia para desplazar entre el núcleo y la manga | 0.14 in     |

Ahora se realiza el cálculo de error para cada variable obtenida, se toma como valor teórico al valor obtenido por data de tomografía real y valor experimental a data obtenida por medio del modelo computacional propuesto, se encuentran los resultados mostrados en la tabla 7.

Posteriormente se calcula el porcentaje de error y la precisión de cada variable, se realiza la siguiente tabla, (ver tabla 6) comparativa entre los valores de las variables reales de tomografía y los valores arrojados por el modelo computacional propuesto.

Tabla 7. Porcentaje de error y porcentaje de precisión de cada variable.

| VARIABLE                                            | VALOR TEÓRICO | VALOR EXPERIMENTAL | % ERROR    | %PRECISIÓN |
|-----------------------------------------------------|---------------|--------------------|------------|------------|
| Base del núcleo                                     | 6,615         | 6,614.98           | 0.99       | 99.01      |
| Longitud del núcleo                                 | 3             | 2.98               | 0.0066     | 99.99      |
| Diámetro del núcleo                                 | 4             | 4                  | 0          | 100        |
| Diámetro externo de la manga                        | 5             | 4.3937             | 0.1213     | 99.87      |
| Profundidad inicial de la capa de interés           | 6,613.40      | 6,613.38           | 0.00000347 | 99.99      |
| Profundidad final de la capa de interés             | 6,613.58      | 6,613.60           | 0.00000317 | 100        |
| Profundidad para extraer el plug                    | 6,613.49      | 6,613.49           | 1.51E-07   | 99.99      |
| Ángulo de giro XY                                   | 60            | 59.84              | 0.00266    | 99.99      |
| Distancia para desplazar entre el núcleo y la manga | 0.16          | 0.14               | 0.125      | 99.875     |

Para realizar un análisis estadístico confiable se realiza el cálculo de la media aritmética del porcentaje de error y del porcentaje de precisión, además se incluye la desviación estándar de la media aritmética de cada cálculo y así garantizar que se trabaja con data fidedigna.

- Media Aritmética del porcentaje de precisión ( $\bar{x}$ ).

$$\bar{x} = \frac{898.65}{9} = 99.85\%$$

El porcentaje de precisión promedio del valor de las variables es de 99.85%.

- Desviación media aritmética del porcentaje de error

$$D_{\bar{x}} = \frac{1.695}{9} = 0.18$$

Del análisis de datos se observa que la media del porcentaje de precisión de los datos es 99.85% con una desviación media aritmética de 0.18%, a partir de esto se concluye que el modelo computacional desarrollado para la metodología numero 1 cuenta con un grado de precisión altamente confiable, garantizando la obtención de resultados verídicos.

## 6.2 METODOLOGÍA NÚMERO DOS.

Aplicando la metodología número dos, anteriormente descrita en este proyecto y desarrollada de manera detallada en el proyecto Narváez y Pereira, 2016. Se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 8. Resultados obtenidos aplicando la metodología número 2, con el procedimiento de Narváez y Pereira (2016).

| <b>VARIABLE</b>                                  | <b>VALOR</b> |
|--------------------------------------------------|--------------|
| <b>Diámetro del núcleo</b>                       | 4 in         |
| <b>Longitud del núcleo</b>                       | 3 ft         |
| <b>Diámetro externo de la manga</b>              | 5 in         |
| <b>Espesor de la capa de interés</b>             | 2 ft         |
| <b>Profundidad inicial de la capa de interés</b> | 6613.4 ft    |
| <b>Profundidad final de la capa de interés</b>   | 6613.58      |
| <b>Buzamiento real</b>                           | 30.6°        |
| <b>Ángulo del buzamiento real</b>                | 20°          |
| <b>Buzamiento aparente</b>                       | 16°          |
| <b>Ángulo de giro calculado</b>                  | 60°          |
| <b>Profundidad para extraer el plug</b>          | 6613.49      |
| <b>Longitud de arco</b>                          | 2.62         |

Se aplica la metodología número uno con el modelo computacional desarrollado en el presente trabajo, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados obtenidos aplicando la metodología número 2, con el modelo computacional.

| <b>VARIABLE</b>                                  | <b>VALOR</b> |
|--------------------------------------------------|--------------|
| <b>Longitud del núcleo</b>                       | 2.98 ft      |
| <b>Diámetro del núcleo</b>                       | 4.00 in      |
| <b>Diámetro externo de la manga</b>              | 4.3937 in    |
| <b>Tope del núcleo</b>                           | 6612 ft      |
| <b>Espesor de la capa de interés</b>             | 2 in         |
| <b>Profundidad inicial de la capa de interés</b> | 6613.348     |
| <b>Profundidad final de la capa de interés</b>   | 6613.616 ft  |
| <b>Profundidad para extraer el plug</b>          | 6613.482 ft  |
| <b>Angulo del buzamiento real</b>                | 18.69°       |
| <b>Buzamiento real</b>                           | 29.00°       |
| <b>Buzamiento aparente</b>                       | 16.83°       |
| <b>Ángulo de giro calculado</b>                  | 60°          |
| <b>Longitud de arco</b>                          | 2.30 ft      |

Luego se realiza el cálculo de error para cada variable obtenida, se toma como valor teórico al valor obtenido por data de tomografía real y valor experimental a data obtenida por medio del modelo computacional propuesto, se encuentran los resultados mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de error y porcentaje de precisión de cada variable.

| VARIABLE                                  | VALOR<br>TEÓRICO | VALOR<br>EXPERIMENTAL | % ERROR              | %    |
|-------------------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------|
| Espesor de la capa de interés             | 2                | 2                     | 0                    | 100  |
| Longitud del núcleo                       | 3                | 2.98                  | 0.0066               | 100  |
| Diámetro del núcleo                       | 4                | 4                     | 0                    | 100  |
| Diámetro externo de la manga              | 5                | 4.3937                | 0.1213               | 99.9 |
| Profundidad inicial de la capa de interés | 6,613.40         | 6,613.35              | $3.47 \cdot 10^{-6}$ | 100  |
| Profundidad final de la capa de interés   | 6,613.58         | 6,613.62              | $3.17 \cdot 10^{-6}$ | 100  |
| Profundidad para extraer el plug          | 6,613.49         | 6,613.48              | $1.51 \cdot 10^{-7}$ | 100  |
| Ángulo de buzamiento real                 | 20               | 18.69                 | 0.0655               | 99.9 |
| Buzamiento real                           | 30.6°            | 29.00°                | 0.0522               | 99.9 |
| Buzamiento Aparente                       | 16°              | 16.83°                | 0.0518               | 99.9 |
| Ángulo de giro calculado                  | 60°              | 60°                   | 0                    | 100  |
| Longitud de arco                          | 2.62             | 2.3                   | 0.1221               | 99.9 |

Se realiza el cálculo de la media aritmética del porcentaje de error y del porcentaje de precisión, además se incluye la desviación estándar de la media aritmética de cada cálculo y así garantizar que se trabaja con data fidedigna.

Porcentaje de precisión promedio del valor de las variables

$$\bar{x} = \frac{1199.52}{12} = 99.96\%$$

Desviación media aritmética del porcentaje de error

$$D_{\bar{x}} = \frac{0.5}{12} = 0.0416$$

Del análisis de datos se observa que la media del porcentaje de precisión de los datos es 99.96% con una desviación media aritmética de 0.0416%, a partir de esto se concluye que el modelo computacional desarrollado para la metodología número 2 cuenta con un grado de precisión altamente confiable, garantizando la obtención de resultados verídicos, además comparando los resultados de las dos metodologías se observa que los datos arrojados para la metodología número dos son más precisos con respecto a la data real de tomografía.

## 7. CONCLUSIONES

- Acorde a la revisión bibliográfica efectuada, se pone en manifiesto la importancia de la tesis desarrollada, dado a que se generó un modelo computacional funcional para la extracción de plugs utilizando imágenes de tomografía axial computarizada, convirtiéndose en el único aplicativo existente para tal funcionalidad.
- Se generó una herramienta metodológica intuitiva codificada en lenguaje de programación WEB JAVA SCRIPT, para la determinación del ángulo de giro en la extracción de plugs preservados en mangas utilizando imágenes de TAC, basada en la propuesta de Narváez y Pereira 2016, fundamentada en los principios de la ingeniería del software.
- Se validó la herramienta desarrollada efectuando analogías con datos reportados en la literatura. Se obtuvieron precisiones de 99.85% para la metodología uno Y de 99.96% para la metodología dos, lo que valida la efectividad del modelo computacional.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar la herramienta desarrollada para ser integrada dentro de los servicios de extensión ofrecidos por la escuela de ingeniería de petróleos, referido a su útil uso en la extracción de plugs usando TAC.
- Se recomienda implementar la herramienta en las aulas de clases, como complemento de nuevas tecnologías para el manejo de muestras, en la asignatura de geología estructural, con el objeto de instaurar el uso de la tomografía axial computarizada como herramienta dentro del flujo de trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practices for Core Analysis 40. Segunda edición, febrero de 1998.

BARRY, Newton; KULTARANSINGH, Hooghan; MICHAEL, Dixon; SCHWARTZ, Ángela; SMART, Erin. Use of digital imaging for improved evaluation of unconventional reservoirs, Society of Petroleum Engineers. SPE 166065. 2013

CHEN, Yang; PENG, liang; PARIS, Avgeriou. A systematic mapping study on the combination of software architecture and agile development, The journal of systems and software 111 (2016) 157-184, El sevier

COLIN McPHEE, JULES REED, IZASHUN ZUBIZARRETA. Core analysis: A best practice guide, 2015.

HOLLER, Peter; KOGLER, Friedrich-Christian. Computer tomography: A nondestructive, high-resolution technique for investigation of sedimentary structures, Marine Geology, ELSEVIER, volumen 91, Issue 3, February 1990, p. 263-266

HUNT K., Patricia; ENGLER, Philip; BAJAROWLCZ, Caroline. Computed Tomography as a core análisis tool: applications, instrument evaluation, and image improvement techniques, Society of petroleum engineers, Journal of petroleum technology, SPE-16952-PA, (Septiembre 1988).

LIS RINAUDO, Guillermo; PANTALEO, Ludmila. Ingeniería de software. Buenos Aires: ALFAOMEGA. 2015

NARVÁEZ NOVOA, Carlos y PEREIRA SANTANA, Zaida. Metodología para la extracción de plugs en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada (tesis de grado ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016

ORTIZ, Andrés; PLATA, José; HERRERA, Edwar; SANTOS, Nicolás. Caracterización estática de rocas por medio de tomografía computarizada de rayos-X TAC. Revista fuentes Volumen 13. UIS, Ene/Jun 2013.

R.E. Gilliland, Mobil E&P U.S. Inc., and M.E. Coles, MOBIL R&D Corp. Use of CT Scanning in the Investigation of Damage to Unconsolidated Cores, Society of petroleum engineers Inc. 1990 SPE 19408.

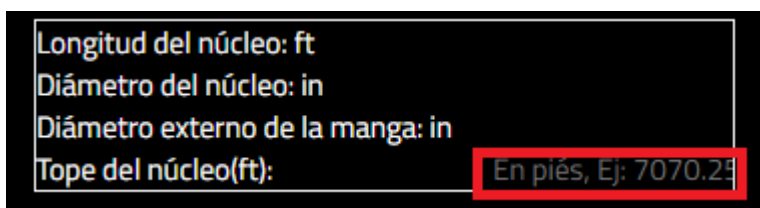
SHAFER, John. Recent advances in core analysis, Society of petrophysicists and well-log analysts, SPWLA-2013-v54n6-A4, diciembre 2013.

## ANEXOS

### Anexo A. Tutorial de uso

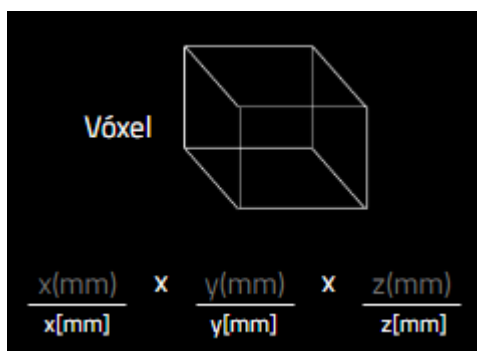
A continuación, se presenta el manual de uso, éste manual de uso se dividirá en dos secciones, el manual para la Metodología #1 y la Metodología #2, pero antes de iniciar hay ciertos pasos que tienen ambas metodologías en común los cuales son los siguientes:

1. Definir el tope del núcleo a tener en cuenta para los próximos cálculos

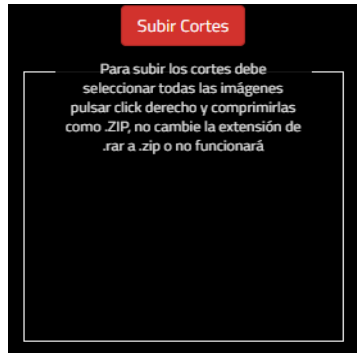


Longitud del núcleo: ft  
Diámetro del núcleo: in  
Diámetro externo de la manga: in  
Tope del núcleo(ft): En piés, Ej: 7070.29

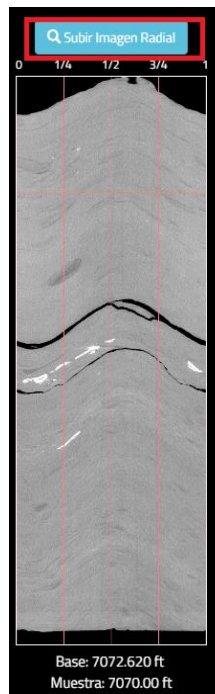
2. Definir las dimensiones del Vóxel con las cuales se van a trabajar, recuerde que éstas dimensiones se presentan en milímetros



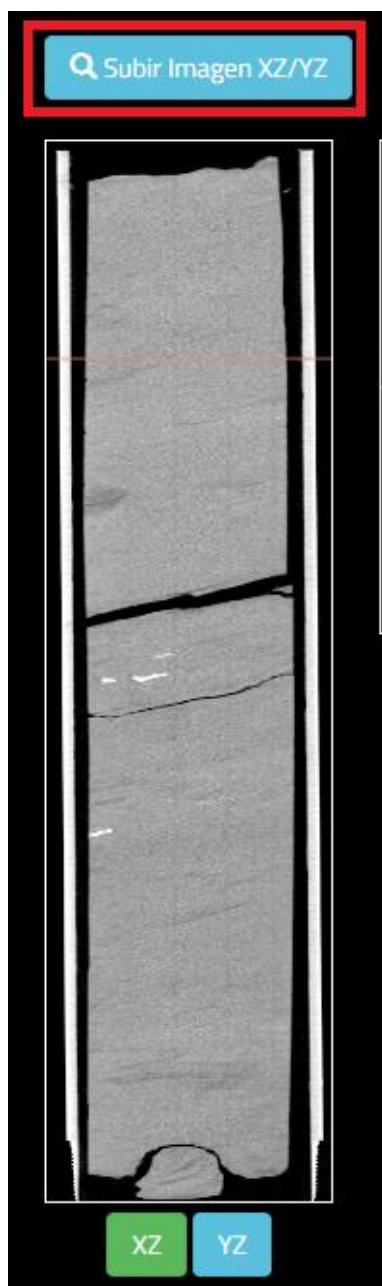
3. Subir los cortes a utilizar, es importante que los cortes a subir estén comprimidos en un .zip, aparte éstos no deben estar dentro de una carpeta, debe seleccionar todos los cortes, presionar clic derecho y añadirlos a un archivo .zip



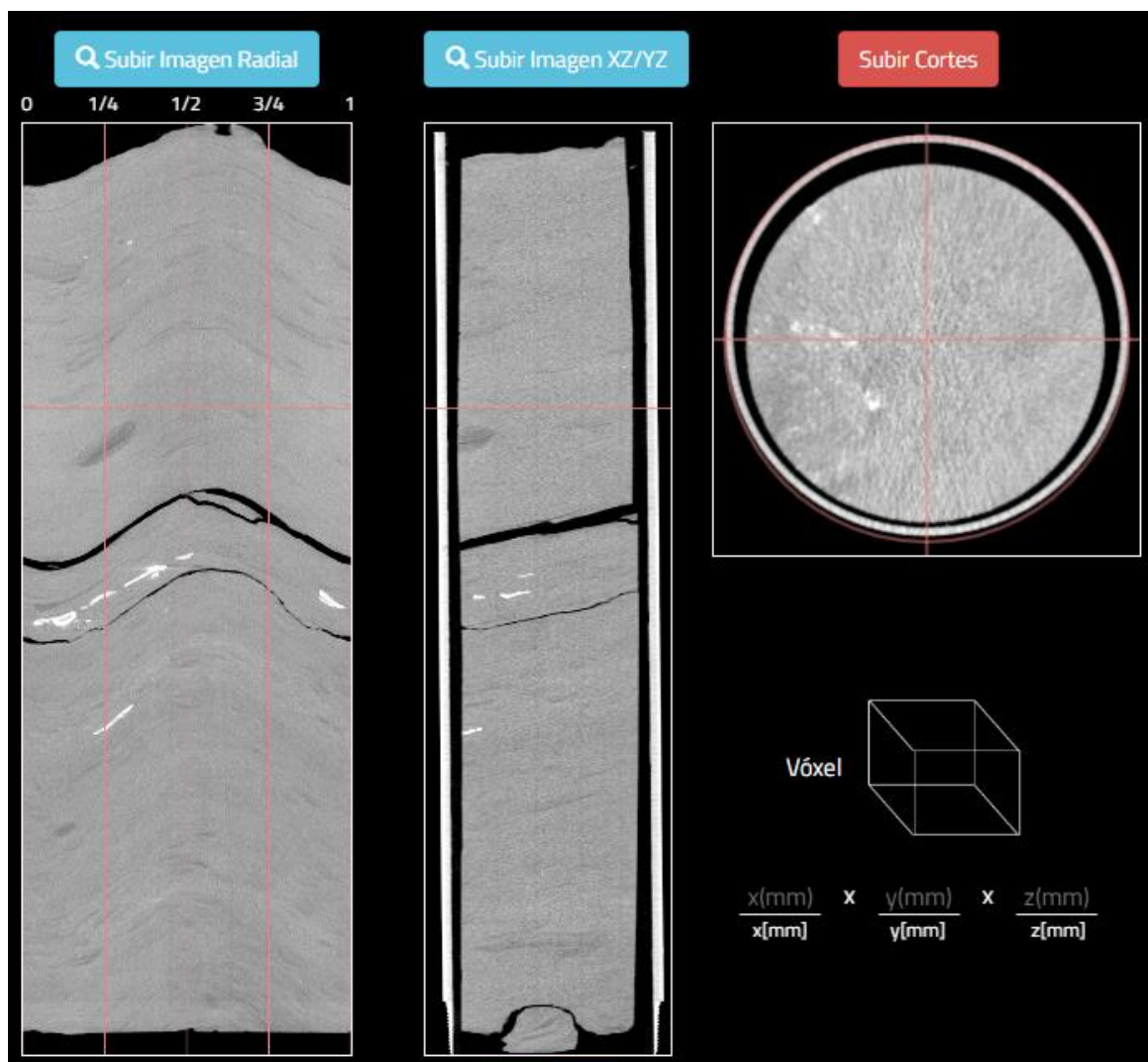
4. Subir la imagen radial correspondiente a los cortes subidos, para esto basta con dar clic en el botón Subir imagen Radial, se abrirá un gestor de archivos donde puede ubicar la imagen a subir



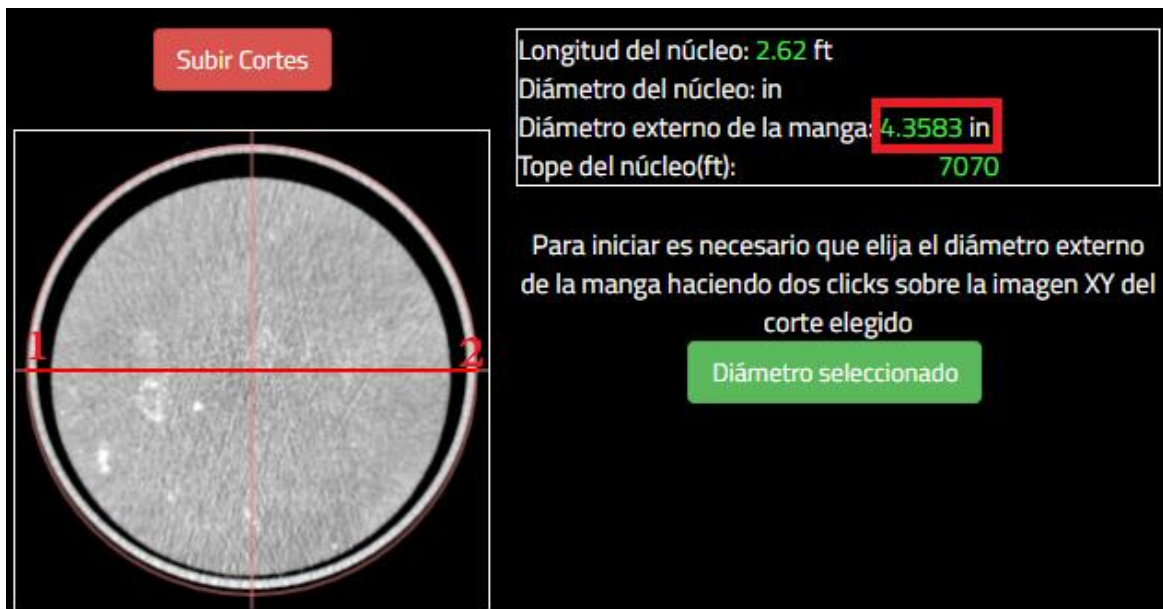
5. Subir la imagen XZ/YZ correspondiente a los cortes subidos, para esto basta con dar clic en el botón Subir imagen Radial, se abrirá un gestor de archivos donde puede ubicar la imagen a subir, y elegir el tipo de imagen que es pulsando el botón XZ o el botón YZ



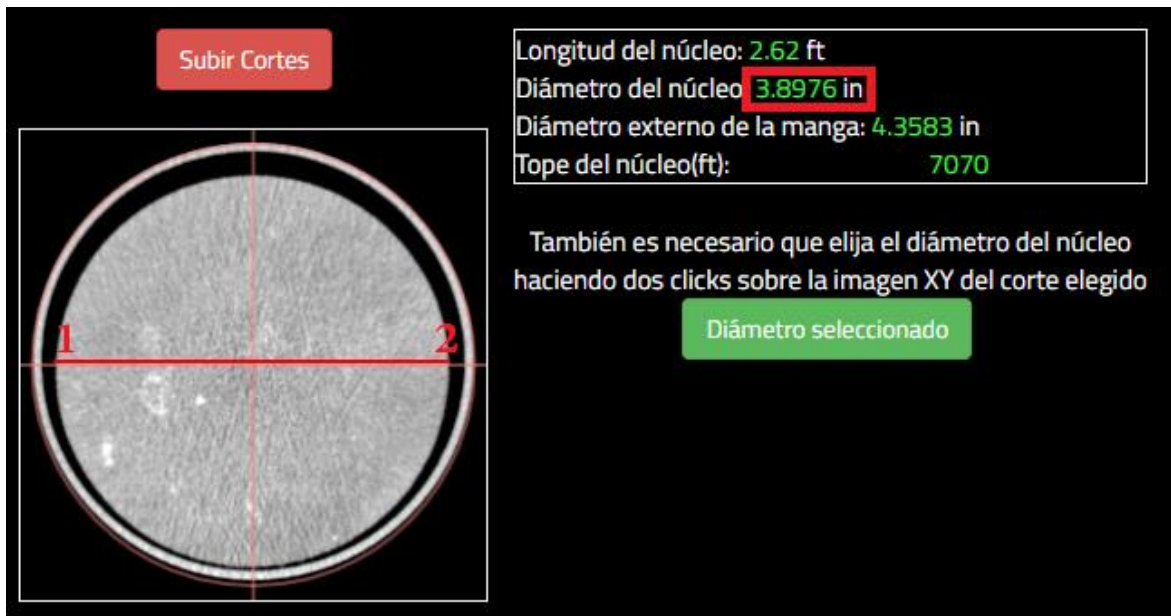
6. Una vez subidas las imágenes radiales y XZ/YZ es necesario seleccionar el corte con el que se va a trabajar, para esto debe posicionar el clic sobre la imagen radial y dar clic sobre la profundidad donde está el corte con el que se va a trabajar



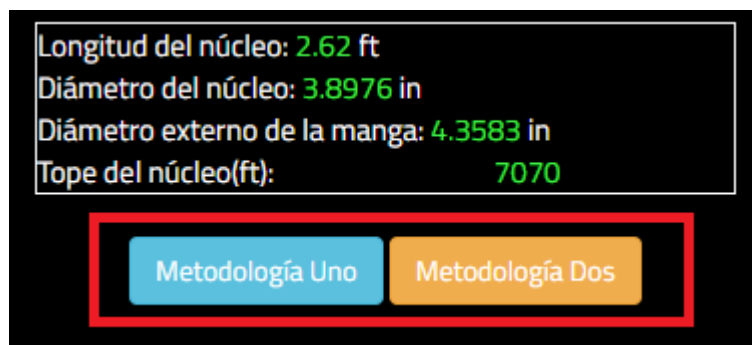
7. Después de haber elegido el corte es necesario seleccionar el diámetro externo de la manga, para esto se debe hacer clic sobre el corte elegido de extremo a extremo como lo muestra la imagen, una vez cuadrado el diámetro externo de la manga pulsamos el botón “Diámetro seleccionado”, si no ha podido cuadrar bien el diámetro externo de la manga con dos clics, el tercer clic reiniciará la medida y podrá medirlo de nuevo hasta que logre una buena toma de datos



8. Una vez seleccionado el diámetro externo de la manga procedemos a medir el diámetro del núcleo de igual manera, dando click en el ambos extremos para hacer la medición tal cual lo indica la imagen, una vez calculado presionamos el botón “Diámetro seleccionado”



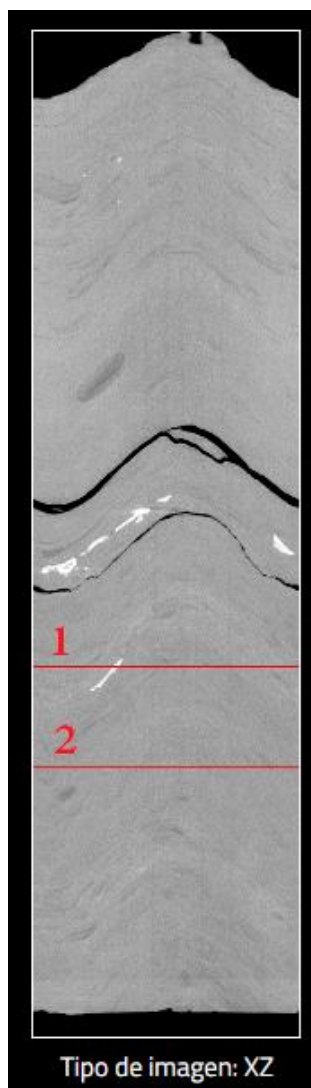
Desde este momento el software nos da dos opciones, la Metodología Uno y la Metodología Dos, aquí debemos elegir que metodología vamos a usar según corresponda.



## METODOLOGÍA UNO

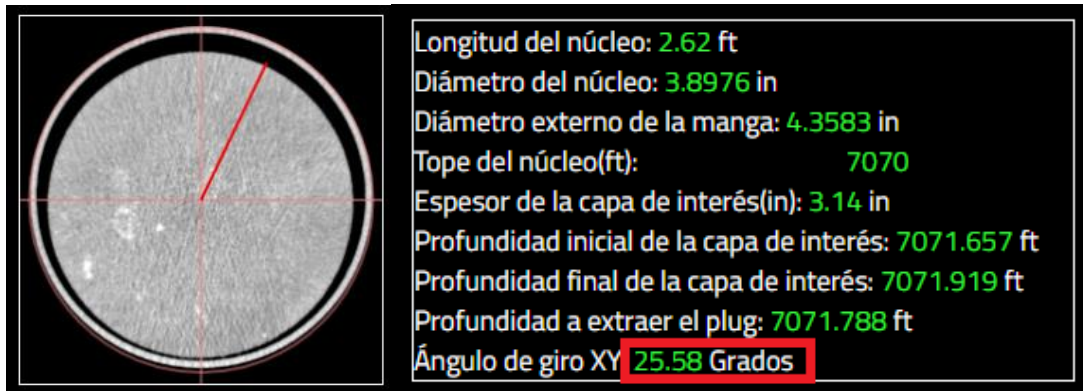
La metodología uno es la más simple, para que no existan problemas por favor siga los siguientes pasos:

1. Seleccione la profundidad inicial y final en la imagen XZ/YZ, recuerde primero debe elegir la profundidad inicial y luego si la final, para esto debe clicar sobre la imagen XZ/YZ cargada de la siguiente manera.



Longitud del núcleo: 2.62 ft  
Diámetro del núcleo: 3.8976 in  
Diámetro externo de la manga: 4.3583 in  
Tope del núcleo(ft): 7070  
Espesor de la capa de interés(in): 3.14 in  
Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.657 ft  
Profundidad final de la capa de interés: 7071.919 ft  
Profundidad a extraer el plug: 7071.788 ft

2. Una vez seleccionada la profundidad debe seleccionar el ángulo de giro y el sentido del giro, para seleccionar el ángulo de giro basta con dar un click sobre la imagen del corte y el programa automáticamente calculará el ángulo por usted



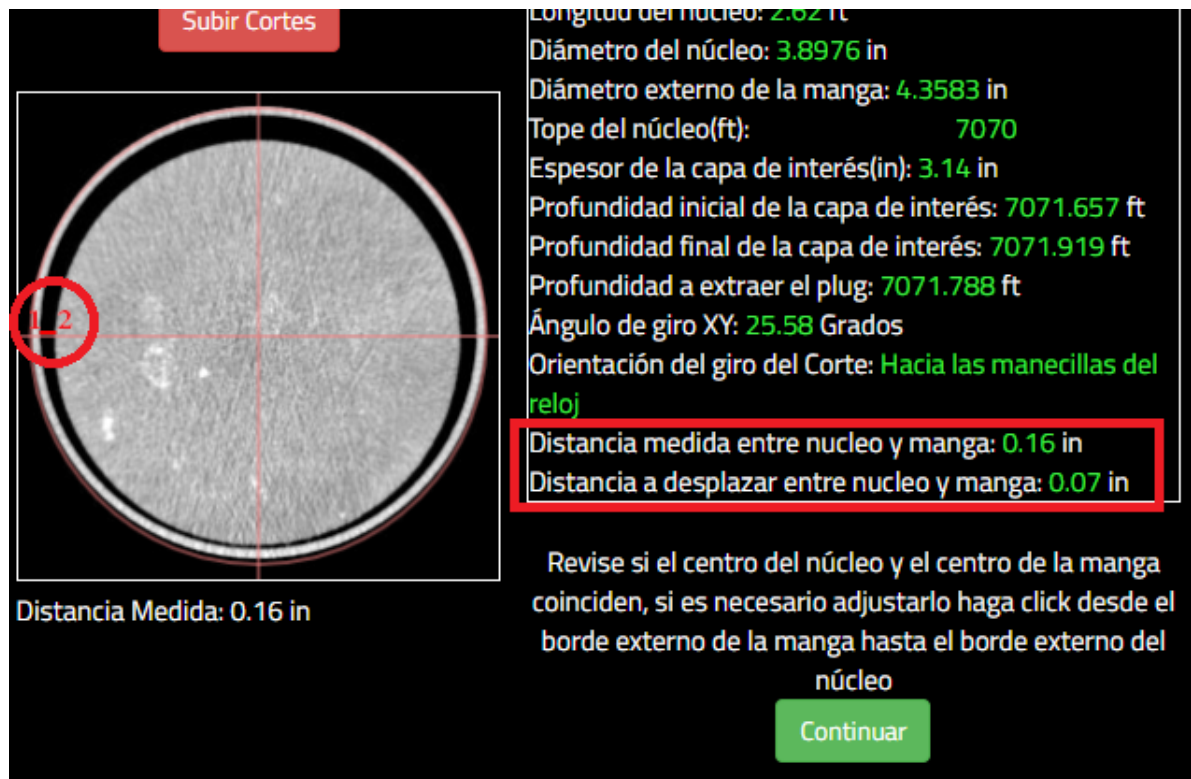
Al seleccionar el ángulo debe elegir el sentido de giro, para esto pulsamos sobre el cuadro en blanco y nos despliega las opciones a elegir, elegimos el sentido del giro y pulsamos continuar

Sentido de giro:

Hacia las manecillas del reloj

En contra de las manecillas del reloj

3. Al seleccionar el ángulo y el sentido de giro se muestra la opción de hacer un ajuste si el centro del núcleo y la manga no coinciden, si es necesario hacer el ajuste debe pulsar click sobre la imagen del corte de la siguiente manera para que el sistema calcule el ajuste que va a realizarse.



Se hace clic dentro del borde externo de la manga y luego clic sobre el borde externo del núcleo.

Una vez realizados éstos pasos el sistema finalizará y se mostrará toda la información pertinente al ciclo ejecutado.

Longitud del núcleo: 2.62 ft  
Diámetro del núcleo: 3.8976 in  
Diámetro externo de la manga: 4.3583 in  
Tope del núcleo(ft): 7070  
Espesor de la capa de interés(in): 3.14 in  
Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.657 ft  
Profundidad final de la capa de interés: 7071.919 ft  
Profundidad a extraer el plug: 7071.788 ft  
Ángulo de giro XY: 25.58 Grados  
Orientación del giro del Corte: Hacia las manecillas del reloj  
Distancia medida entre nucleo y manga: 0.16 in  
Distancia a desplazar entre nucleo y manga: 0.07 in

Ciclo terminado, los datos recopilados se presentan en el cuadro superior

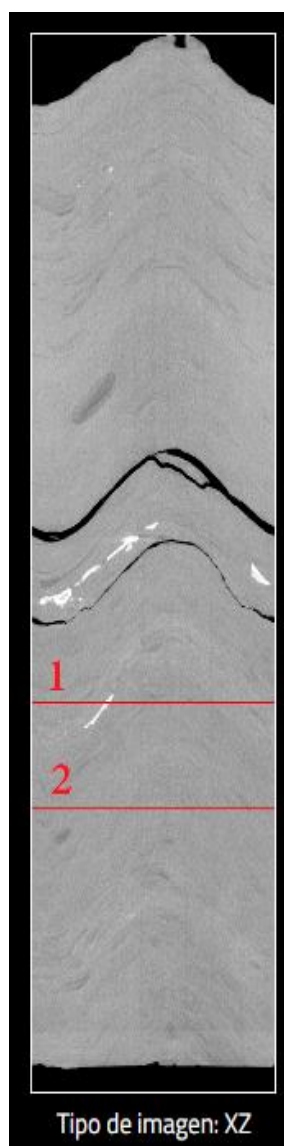
Reiniciar

Si desea puede realizar el proceso de nuevo alternando los valores según se requiera.

## METODOLOGÍA DOS

La metodología dos es un poco más extensas, para que no existan problemas por favor siga los siguientes pasos:

1. Seleccione la profundidad inicial y final en la imagen XZ/YZ, recuerde primero debe elegir la profundidad inicial y luego si la final, para esto debe clicar sobre la imagen XZ/YZ cargada de la siguiente manera



Longitud del núcleo: 2.62 ft  
Diámetro del núcleo: 3.8445 in  
Diámetro externo de la manga: 4.376 in  
Tope del núcleo(ft): 7070  
Espesor de la capa de interés(in): 2.75 in  
Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.605 ft  
Profundidad final de la capa de interés: 7071.834 ft  
Profundidad a extraer el plug: 7071.719 ft

Por favor seleccione en la imagen XZ la profundidad inicial y final de la capa de interés

Continuar

2. Debe responder la siguiente pregunta evaluando la imagen radial y su posición

¿Está ubicado el punto máximo o mínimo de la capa de interés en la línea que representa  $\frac{1}{4}$  de la imagen cilíndrica?

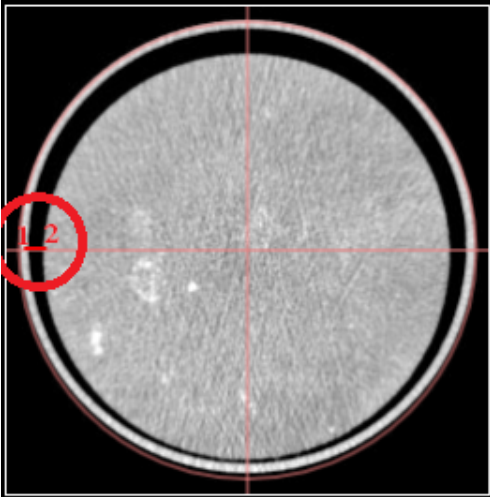
SI

NO

En caso de que sea SI por favor continúe los siguientes pasos, en caso de que sea NO por favor sáltese al paso número 5

3. Se muestra la opción de hacer un ajuste si el centro del núcleo y la manga no coinciden, si es necesario hacer el ajuste debe pulsar click sobre la imagen del corte de la siguiente manera para que el sistema calcule el ajuste que va a realizarse

Subir Cortes



Distancia Medida: 0.21 in

Longitud del núcleo: 2.62 ft

Diámetro del núcleo: 3.8445 in

Diámetro externo de la manga: 4.376 in

Tope del núcleo(ft): 7070

Espesor de la capa de interés(in): 2.75 in

Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.605 ft

Profundidad final de la capa de interés: 7071.834 ft

Profundidad a extraer el plug: 7071.719 ft

Distancia medida entre nucleo y manga: 0.21 in

Distancia a desplazar entre nucleo y manga: 0.05 in

Revise si el centro del núcleo y el centro de la manga coinciden, si es necesario ajustarlo haga click desde el borde externo de la manga hasta el borde externo del núcleo

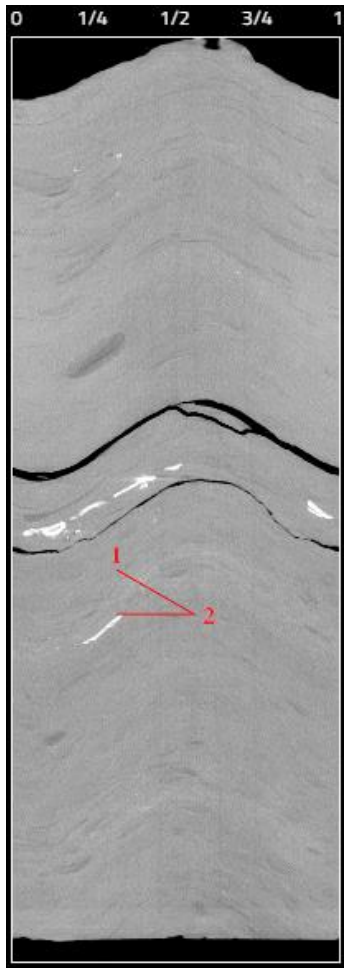
Continuar

4. Finaliza el programa con los datos obtenidos y puede decidir si desea reiniciar el software

Ciclo terminado, los datos recopilados se presentan en el cuadro superior

Reiniciar

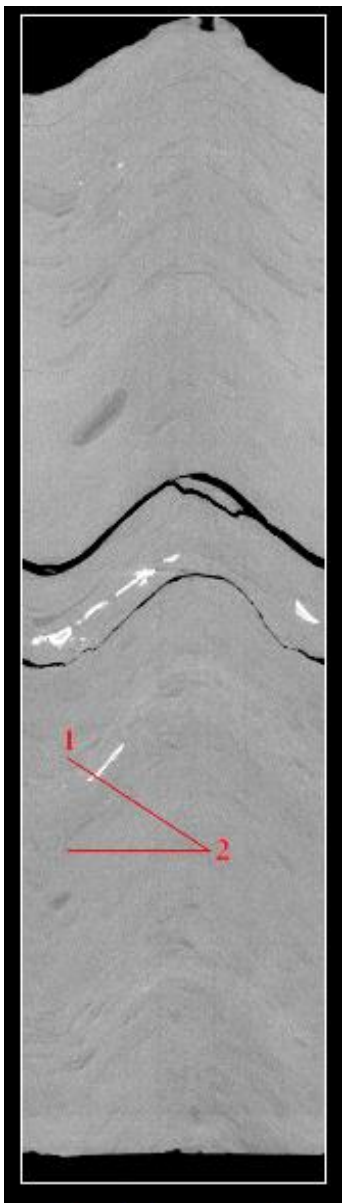
5. Si se decidió NO, se procede a calcular el ángulo en la imagen radial, haciendo dos clicks, primero en el punto máximo y luego en el mínimo, por ejemplo:



Longitud del núcleo: 2.62 ft  
Diámetro del núcleo: 3.8622 in  
Diámetro externo de la manga: 4.3937 in  
Tope del núcleo(ft): 7070  
Espesor de la capa de interés(in): 2.70 in  
Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.666 ft  
Profundidad final de la capa de interés: 7071.891 ft  
Profundidad a extraer el plug: 7071.779 ft  
Angulo del buzamiento Real: 26.67 Grados  
Buzamiento Real: 38.59 ft

Automáticamente el software calcula el ángulo del buzamiento real y el buzamiento real como tal, si hubo un error al hacer los clics el tercer clic reinicia el sistema y se puede volver a calcular el ángulo, una vez calculado el ángulo damos clic en continuar.

6. Una vez elegido el ángulo en la imagen radial procedemos a elegir el ángulo en la imagen XZ/YZ de la misma forma como lo muestra la figura

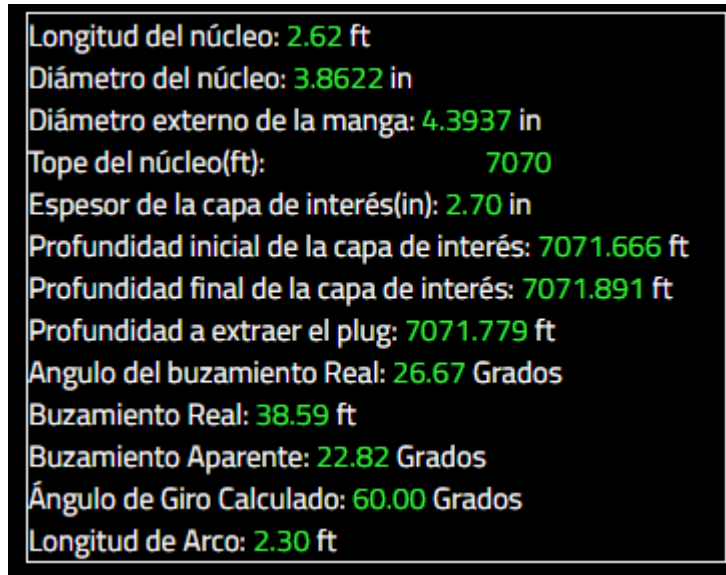


|                                                        |
|--------------------------------------------------------|
| Longitud del núcleo: 2.62 ft                           |
| Diámetro del núcleo: 3.8622 in                         |
| Diámetro externo de la manga: 4.3937 in                |
| Tope del núcleo(ft): 7070                              |
| Espesor de la capa de interés(in): 2.70 in             |
| Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.666 ft |
| Profundidad final de la capa de interés: 7071.891 ft   |
| Profundidad a extraer el plug: 7071.779 ft             |
| Angulo del buzamiento Real: 26.67 Grados               |
| Buzamiento Real: 38.59 ft                              |
| <b>Buzamiento Aparente: 22.82 Grados</b>               |

Por favor determine el ángulo en la imagen XZ, dando click primero en el punto más alto y segundo en el punto más bajo

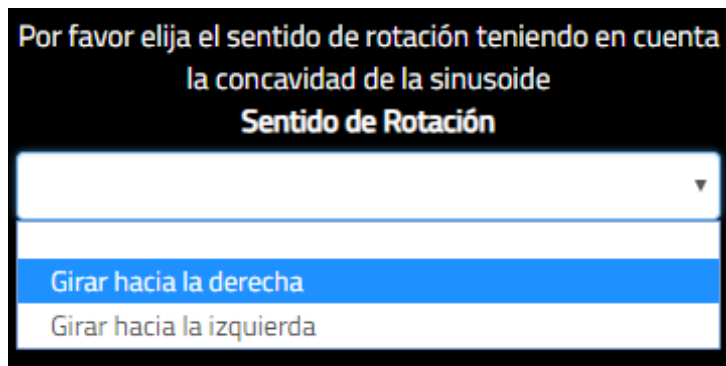
[Continuar](#)

Una vez hecho esto el sistema nos calcula el ángulo de buzamiento aparente y al dar clic en continuar nos hace el cálculo del ángulo de giro y la longitud de arco como lo muestra en la figura



Longitud del núcleo: 2.62 ft  
Diámetro del núcleo: 3.8622 in  
Diámetro externo de la manga: 4.3937 in  
Tope del núcleo(ft): 7070  
Espesor de la capa de interés(in): 2.70 in  
Profundidad inicial de la capa de interés: 7071.666 ft  
Profundidad final de la capa de interés: 7071.891 ft  
Profundidad a extraer el plug: 7071.779 ft  
Angulo del buzamiento Real: 26.67 Grados  
Buzamiento Real: 38.59 ft  
Buzamiento Aparente: 22.82 Grados  
Ángulo de Giro Calculado: 60.00 Grados  
Longitud de Arco: 2.30 ft

7. Luego elegimos el sentido de la rotación teniendo en cuenta la concavidad de la senoide y damos clic en continuar



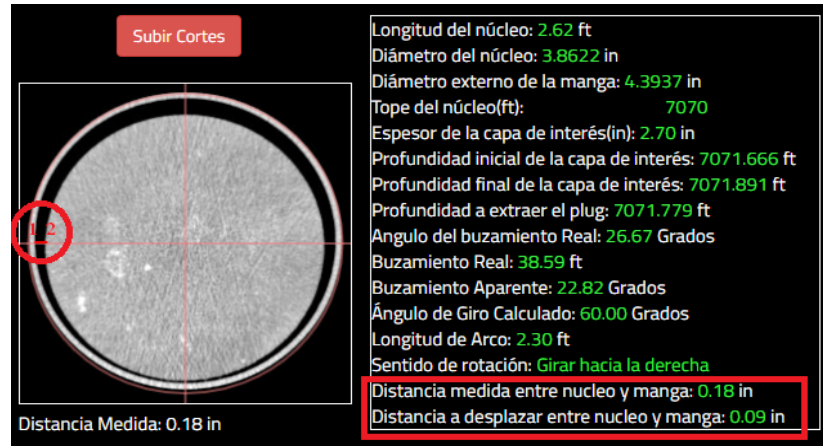
Por favor elija el sentido de rotación teniendo en cuenta la concavidad de la senoide

**Sentido de Rotación**

Girar hacia la derecha

Girar hacia la izquierda

8. Realizamos el ajuste en el desplazamiento si es necesario como lo muestra la siguiente figura:



Y el sistema nos mostrará los resultados totales del ciclo realizado y nos presentará la opción de reiniciar el software así:

