



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Programa Educativo de Ingeniero Aeroespacial

EMPLEO DE MALLAS NO ESTRUCTURADAS Y CARTESIANAS PARA
EL ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD DE ROCAS SEDIMENTARIAS

T E S I S

QUE PARA OPTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AEROESPACIAL

P R E S E N T A:

MIRIAM GUADALUPE ESPARZA DELGADO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ EDUARDO PÉREZ MOTA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. ALEJANDRO SEBASTIÁN ORTIZ PÉREZ

MAYO DEL 2025

JURADO CALIFICADOR:

Presidente: Dr. José Eduardo Pérez Mota
Secretario: Dr. Alejandro Sebastián Ortiz Pérez
Sinodal: Dra. Virginia García Ángel
Sinodal: Dr. Emmanuel Santiago Durazo Romero
Sinodal: Dr. Luis Antonio González Uribe

Lugar donde se realizó la tesis:

Mexicali, Baja California.

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. José Eduardo Pérez Mota



FIRMA

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a las personas especiales que hacen mi feliz vida.

A mi madre, la mujer más fuerte que conozco, la persona por la cual yo sigo a delante ante las adversidades, la que desde casa me enseñó a no darme por vencida y hacer las cosas de la mejor manera, A mi padre, gracias por motivarme y apoyarme, gracias a ambos por impulsarme a ir seguir mis sueños y mis metas.

A mi hermana, el mejor regalo que me dieron mis padres y que atesorare siempre, gracias por tu apoyo Marisol.

A mis amigos, Arely, Manuel, Keidi, y Michel, nunca olvido todo lo que han hecho por mí, en las buenas y en las malas, en una ocasión escuche una frase que me gusto, "La amistad es un refugio seguro; cuando el mundo se vuelve incierto, los amigos nos recuerdan quiénes somos".

A mi persona especial, que me ha acompañado en momentos de frustración, desesperanza y tristeza, pero también ha estado presente y ha sido la razón de mis días más felices, gracias Moisés espero que me sigas acompañando en más aventuras.

A mi familia en general, mis primas, mis tías, Daniel y a mis sobrinos, espero poder ser el apoyo de esos niños que tanto amo, así como mi familia lo es para mí.

Agradecimientos

Quiero comenzar diciendo que este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de aquellas personas que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

Gracias a mi tutor de tesis el **Dr. José Eduardo Pérez Mota** por impulsarme y guiarme por el camino de “se resolverá” para llegar a “lo logramos”, me llevó mucho aprendizaje gracias por su apoyo y el tiempo que me dedico.

Gracias también a mi codirector por el apoyo que me brindo, sus consejos y aportaciones.

A mis sinodales, Dra. Virginia García Ángel, Dr. Emmanuel Santiago Durazo Romero y Dr. Luis Antonio González Uribe, gracias por su tiempo, sus comentarios y por aceptar ser parte del jurado.

A mis profesores de la licenciatura, muchos de ellos me enseñaros más que conocimiento profesional, me dieron consejos de vida que tendré presente y que me formaron para ser una persona y un profesionista con valores, gracias.

Índice

Resumen.....	7
Nomenclatura	8
Capítulo 1	9
Introducción	9
1.1 Problemática.....	10
1.2 Justificación	10
1.3 Hipótesis	10
1.4 Objetivos	10
Capítulo 2.....	12
El flujo de fluidos a través de rocas sedimentarias	12
2.1 Rocas sedimentarias	12
2.1.1 Procesos sedimentarios.....	12
2.1.2 Sedimentos.....	13
2.1.3 Rocas sedimentarias.....	13
2.1.4 Ambientes sedimentarios.....	13
2.1.5 Importancia de las rocas sedimentarias	13
2.2 El portal de Digital Rocks	14
2.3 Belgian Fieldstone.....	14
Capítulo 3.....	15
Antecedentes	15
3.1 Simulación numérica de las características de transferencia de calor por convección en medios porosos basada en la tecnología digital de roca	15
3.2 Presencia y origen de rocas sedimentarias en el basamento ofiolítico de Costa Rica....	15
3.3 Imágenes y modelos a escala de poros.....	16
3.4 Extracción de redes de poros a partir de imágenes de tomografía microinformática...17	
3.5 Determinación de una dimensión de poro efectiva para medios microporosos.....	17
3.6 Extracción de redes a partir de imágenes del espacio poroso de areniscas y carbonatos	17
3.7 Estudio paramétrico de los efectos de rarefacción en flujos térmicos a micro y nanoescala en estructuras porosas.....	18
3.8 Estudio analítico del flujo y la transferencia de calor en un medio poroso anular sometido a flujos de calor asimétricos.....	18

3.9 Revisión sobre la conducción de calor, convección de calor, radiación térmica y transferencia de calor por cambio de fase de nanofluidos en medios porosos: fundamentos y aplicaciones	19
3.10 Coeficientes de transferencia de calor interno en medios microporosos con efectos de rarefacción	20
Capítulo 4.....	21
Construcción del Modelo.....	21
4.1 Tomografías computarizadas (TC)	21
4.2 Calidad de las Tomografías Computarizadas.....	21
4.2.1 Ruido	21
4.2.2 Uniformidad espacial.....	22
4.2.3 Resolución temporal.....	22
4.2.4 Ruido de origen físico.....	22
4.3 Metodología para la generación del modelo de la roca.....	22
4.4 Características de las TC's	23
4.5 Características de los archivos PNG y JPG.....	24
4.6 Extracción de imágenes provenientes de la Tomografía Computarizada.....	28
4.7 Binarización.....	28
4.8 Limpieza Binaria.....	32
4.9 Creación volumen	34
Capítulo 5.....	38
Ecuaciones gobernantes y análisis numérico.....	38
5.1 Ecuaciones gobernantes.....	38
5.1.1 Ecuación de continuidad.....	38
5.1.2 Ecuación de cantidad de movimiento.....	39
5.2 Análisis numérico	39
5.2.1 Análisis computacional	39
5.2.2 Proceso del análisis.....	40
Capítulo 6.....	49
Resultados	49
6.1 Validación de las simulaciones.....	49
6.2. Comportamiento del flujo de fluidos en medios porosos	50
6.2.1 Campos de velocidad.....	51
6.2.2 Comportamiento de la caída de presión en función del flujo másico	53
6.2.3 Campo de velocidad seccional.....	55
6.3 Rapidez de la generación de entropía total volumétrico.....	62

Conclusiones.....	65
Trabajos Futuros	67
Anexos.....	68
Anexo 1.....	68
Anexo 2.....	70
Anexo 3.....	76
Anexo 4.....	77
Anexo 5.....	79
Referencias.....	82

Resumen

La facilidad con la que los fluidos se desplazan a través de un medio poroso se cuantifica por medio de la propiedad denominada permeabilidad, la determinación de esta tiene aplicaciones que van desde la industria de extracción de petróleo hasta la cuantificación de la humedad presente en rocas satelitales. En este trabajo fue explorado un método de cuantificación de la permeabilidad con base en la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el método de volumen finito empleando mallas cartesianas no estructuradas. Para el establecimiento del dominio computacional fueron empleados métodos de procesamiento de imagen y se obtuvieron, a partir de un estudio de microtomografía de una roca sedimentaria, las coordenadas cartesianas de cada píxel que representa una fase sólida. Los resultados numéricos fueron validados por comparación contra los resultados experimentales disponibles en la literatura y se determinó que las condiciones de frontera de presión total y estática son adecuadas para estimar la permeabilidad por medio de CFD. Se reporta la relación del flujo volumétrico para varias condiciones de diferencia de presión, además, la generación de entropía es ponderada. La observación de la gráfica caudal vs. diferencia de presión revela que es posible establecer un modelo basado en una ley de potencia del tipo $Q = b (\Delta P)^a$ en donde b es un coeficiente constante y a es el coeficiente de alometría para el que se determinó un valor de 0.7068 el cual es cercano a 2 (característico de la ley de conservación de energía). Los alcances de este estudio se pueden extender para la determinación de la humedad máxima que puede contener una roca lunar.

Nomenclatura

TC	Tomografía Computarizada
u_g	Velocidad del fluido
ΔP	Diferencia de presión
F	Flujo volumétrico
P	Presión
Q	Flujo volumétrico en ml/min
Re	Número de Reynolds
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Kn	Números de Knudsen
a, b	Constantes de la Ec.
cte	Constante de la recta
d	Diámetro
t	Tiempo
v	Velocidad
x	Dirección x del sistema coordenado x, y, z.
y	Dirección y del sistema coordenado x, y, z.
z	Dirección z del sistema coordenado x, y, z.
μ	Viscosidad del fluido
ρ	Densidad
ν	Viscosidad cinemática
∂	Operador de derivada parcial.

Capítulo 1

Introducción

Este estudio se enfoca en la reconstrucción tridimensional de la roca sedimentaria Belgian Fieldstone. Este análisis, realizado mediante técnicas avanzadas de reconstrucción tridimensional basada en microtomografía computarizada, mallas cartesianas no estructuradas y Dinámica de Fluidos Computacional (CFD),

La estrategia metodológica adoptada en este trabajo ha demostrado ser una vía eficaz para la estimación precisa de la capacidad de la roca estudiada para transmitir fluidos. Para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo etapas esenciales en el procesamiento de los datos, incluyendo la binarización y la eliminación de ruido en las imágenes.

El desarrollo de esta investigación abarca la exploración de los fundamentos del flujo en rocas sedimentarias, incluyendo su origen, clasificación y los ambientes geológicos que moldean sus características. Se presenta una revisión exhaustiva de los estudios previos relevantes en el campo, analizando las metodologías y modelos numéricos empleados en la caracterización de medios porosos. Posteriormente, se describe en detalle el proceso de reconstrucción del modelo tridimensional de la roca digital a partir de las microtomografías computarizadas, detallando las técnicas de procesamiento de imágenes y la generación del modelo 3D utilizado para las simulaciones de CFD.

Se establece el marco teórico que sustenta el análisis del flujo de fluidos, presentando las ecuaciones gobernantes y justificando la selección del software Ansys Fluent® 2025 como la herramienta computacional para la resolución numérica del problema. Finalmente, se presentan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones de CFD, con un énfasis en la visualización y el análisis del comportamiento del flujo y la generación de entropía dentro de la intrincada red de poros de la roca sedimentaria. La validez de la metodología numérica se evalúa mediante la comparación de la permeabilidad absoluta simulada con datos experimentales.

La tesis concluye con un resumen de los resultados obtenidos y comparados con los del autor de algunos estudios similares y la propuesta de posibles líneas de investigación futuras.

1.1 Problemática

Debido al tiempo que lleva modelar detalladamente una geometría compleja, la permeabilidad en medios porosos ha sido estudiada mediante redes de bolas máximas, el defecto de dicho enfoque es que no toma en cuenta los cambios de dirección del flujo provocados por los canales orgánicamente intrincados inherentes a la geometría compleja, teniendo como consecuencia que se subestime la permeabilidad. Por otro lado, en los estudios en los que se realizó el proceso de suavizado de las superficies son requeridas altas capacidades de cómputo, que pueden ser compensados mediante la paralelización de la solución. En el presente estudio se plantea reproducir la geometría de la roca sedimentaria representando cada vóxel como un cubo en un software de dibujo asistido por computadora para establecer la geometría compleja tridimensional del medio poroso. Este planteamiento preserva los canales internos que permiten captar cuantitativamente los esfuerzos provocados por los cambios de dirección del flujo, esto se logró porque fue establecido un dominio computacional optimizado con mallas no estructuradas y cartesianas que requieren de capacidades computacionales básicas.

1.2 Justificación

La comprensión del flujo de fluidos a través de medios porosos es fundamental para diversos fenómenos geológicos y naturales. Un estudio que permita conocer la permeabilidad de un tipo de roca como lo es la roca sedimentaria podrá facilitar elecciones de materiales porosos para construcciones, filtrado de agua, pavimentación, o, con un enfoque relativo a la ingeniería aeroespacial, la cuantificación de la humedad máxima disponible en rocas extraterrestres (p. e. rocas de asteroides, cometas, satélites naturales y planetas).

1.3 Hipótesis

La reconstrucción de la roca sedimentaria mediante mallas cartesianas no estructuradas en las que no se aplica un proceso de suavizado geométrico permite obtener una estimación de la permeabilidad en un tiempo significativamente menor, con una desviación mínima respecto a los resultados experimentales. Lo que representa una superioridad sobre las metodologías que incorporan el suavizado o que utilizan la reconstrucción de la roca sedimentaria con redes de poros.

1.4 Objetivos

El presente proyecto tiene como objetivos:

-
- Reconstruir tridimensionalmente una roca sedimentaria a partir de datos obtenidos de la página de Digital Rock.
 - Generar propiedades intelectuales con códigos de MATLAB.
 - Realizar simulaciones en Ansys Fluent en estado estacionario.
 - Estimar la permeabilidad de dicha roca por medio de Ansys Fluent.
 - Comparar los resultados con autores de trabajos similares.

Capítulo 2

El flujo de fluidos a través de rocas sedimentarias

2.1 Rocas sedimentarias

La geología es una ciencia con un amplio campo de estudio, en la que para obtener información se requiere de rocas, las cuales pueden ser de origen ígneo, metamórfico y sedimentario.

Las rocas sedimentarias son comunes de encontrar, se cree que constituyen más del sesenta por ciento de la corteza terrestre. Su importancia consiste en que en ellas se conserva la evidencia de los fenómenos geológicos y naturales que acontecían al momento de su depósito en tiempos pasados, lo cual, a su vez, permite reconstruir la historia geológica de nuestro planeta y tener un mayor conocimiento para la exploración y explotación de los recursos naturales.

2.1.1 Procesos sedimentarios

Se llama meteorización o intemperismo a la descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre cuando estos materiales entran en contacto con la atmósfera, hidrosfera y la biósfera.

La erosión edáfica es un fenómeno que elimina la capa fértil del suelo. El agua y el viento se consideran los principales elementos erosivos, sin embargo, las actividades humanas, desde las recreativas hasta las extractivas, contribuyen también a este proceso de degradación del suelo.

El transporte es el traslado de los materiales erosionados en un determinado lugar para su posterior sedimentación en otro diferente. La sedimentación es el último proceso de la morfogénesis y consiste en la acumulación de materiales después de haber sido erosionados y transportados.

2.1.2 Sedimentos

Los sedimentos son granos no consolidados de minerales, materia orgánica o rocas preexistentes, que pueden ser transportados por el agua, el hielo o el viento, para luego ser depositados. Los procesos por los cuales los sedimentos se forman y son transportados tienen lugar en la superficie terrestre o cerca de ésta y a presiones y temperaturas relativamente bajas. Las rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación y la litificación de los sedimentos.

Las rocas sedimentarias se dividen en 3 tipos: detríticas (también llamadas: siliciclásticas o terrígenas), químicas y bioquímicas; cada una de ellas formada por sedimentos con orígenes diferentes.

2.1.3 Rocas sedimentarias

Existen tres tipos de rocas sedimentarias: siliciclásticas, químicas y bioquímicas. Las rocas siliciclásticas son nombradas de manera específica, dependiendo de la granulometría de sus clastos. Las rocas químicas son nombradas dependiendo el sedimento cristalino del cual están formados, por ejemplo, las carbonatadas. Las rocas bioquímicas son nombradas dependiendo el sedimento cristalino de origen biogénico o en su defecto los biosedimentos del cual están formados.

2.1.4 Ambientes sedimentarios

Los ambientes sedimentarios son los entornos o áreas geográficas en las cuales se depositan los sedimentos que, a su vez, son afectados por un conjunto de factores físicos, químicos y biológicos hasta que se forman las rocas sedimentarias.

Existen tres tipos de ambientes sedimentarios: continental, mixto y marino. Se le conoce al ambiente continental a la porción de terreno que se encuentra sobre la corteza continental, el ambiente mixto se le caracteriza por ser una mezcla entre porción de terreno de corteza continental y la corteza oceánica y el marino es la porción de terreno que se encuentra finalmente en la corteza oceánica.

2.1.5 Importancia de las rocas sedimentarias

Una de las principales fuentes de abastecimiento de energía recae en el aprovechamiento del gas y el petróleo almacenado en los lechos de ambientes acuáticos y extraídos después de muchos procesos naturales con el paso de los siglos en maneras naturales o por un proceso más complejo con un sistema petrolero.

Comienza desde la era Mesozoica el proceso de formación de hidrocarburos en base a minerales variados, desechos orgánicos provenientes de animales y plantas, y lo que fue antes lagos y ambientes marinos se convirtieron en nuevos sedimentos minerales. [1]

2.2 El portal de Digital Rocks

Digital Rocks es un portal abierto al público con información obtenida a través de estudios tomográficos de diferentes tipos de rocas, entre ellas la piedra de campo belga. En el portal se encuentra la información de Micro-CT (tomografía computarizada) para dicha roca sedimentaria en formato GIF.

2.3 Belgian Fieldstone

El archivo GIF consistió en 2400 proyecciones con un tiempo de exposición de 1s cada una. Ajustes del tubo de rayos X: 100 kV, 10 W. La muestra tenía una porosidad del 18.16%. De acuerdo con las imágenes, la roca está compuesta de cuarzo (valores de gris bajos) y glauconita (valores de gris altos). La muestra de la piedra de campo belga mide 4 mm de diámetro. Su tipo de medio poroso es la arenisca de fuente natural.

Capítulo 3

Antecedentes

En este capítulo se presenta los artículos más referenciados en este trabajo.

3.1 Simulación numérica de las características de transferencia de calor por convección en medios porosos basada en la tecnología digital de roca

En el trabajo aquí referido se extraen las estructuras porosas tridimensionales a partir de la tecnología de rocas digitales y se investigan numéricamente las características de la transferencia de calor convectiva en los poros del dominio de la geometría compleja.

En dicho trabajo se plantea un método novedoso para la determinación de las longitudes características como diámetros hidráulicos, el diámetro equivalente y las áreas superficiales de transferencia de calor.

En la investigación citada, también se obtuvieron correlaciones entre el número de Nusselt (Nu), el número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr). Tales correlaciones ayudan a comprender el proceso de transferencia de calor por convección en medios porosos y, por tanto, a orientar las prácticas industriales pertinentes. [2]

3.2 Presencia y origen de rocas sedimentarias en el basamento ofiolítico de Costa Rica

En las series basálticas del Complejo Ofiolítico de Nicoya (Jurásico hasta Terciario Inferior) están intercalados sedimentos oceánicos que se estudiaron por métodos de campo, sedimentología, petrografía, difracción de rayos X y geoquímica. Aparte de secuencias regionalmente extendidas con espesores de hasta varias decenas de metros, están presentes como lentes, rellenos de vacíos de lava almohadillada, xenolitos, cuerpos intrusivos y tectónicos, así como componentes de brechas volcanoclásticas.

Con respecto a su volumen dominan radiolaritas monótonas con estratificación rítmica, que se formaron debajo de la CCD en el Océano Pacífico ecuatorial oriental

del Mesozoico Tardío. Su pureza, la ausencia de detrito terrígeno, el alto contenido de hematita, la presencia de nódulos sedimentarios de manganeso, así como la influencia de corrientes muy débiles, son índices de sedimentación bajo condiciones tranquilas en un ambiente deposicional oxigenado de aguas profundas.

Se nota un importante cambio en el carácter de los sedimentos durante el desarrollo del Complejo: en el Jurásico hasta el Cretácico Medio se depositaron predominantemente rocas silíceas, mientras que en el Cretácico Superior las calizas juegan un papel importante. En este cambio de facies se refleja hundimiento de la CCD a escala mundial en el Mesozoico Tardío, así como cambios morfológicos en Centroamérica meridional debido a procesos magmáticos y geotectónicos. Además, las intercalaciones sedimentarias contribuyen considerablemente al esclarecimiento del desenvolvimiento geodinámico del basamento ofiolítico en la margen suroccidental de la placa caribeña. [3]

3.3 Imágenes y modelos a escala de poros

La obtención de imágenes a escala de poros y el análisis digital de núcleos mediante modelado se están convirtiendo en un servicio rutinario en la industria del petróleo y el gas, y tienen aplicaciones potenciales en el transporte de contaminantes y el almacenamiento de dióxido de carbono. En este artículo se describe brevemente la tecnología emergente relacionada a la obtención de imágenes del espacio poroso de las rocas a partir de la escala nanométrica, junto con un conjunto de diferentes técnicas numéricas para simular el flujo y el transporte monofásico y multifásico a través de estas imágenes.

Se describen tres ejemplos de aplicación que ilustran la gama de problemas científicos que pueden abordarse: la dispersión en diferentes muestras de rocas que predice el comportamiento anómalo del transporte característico de los carbonatos altamente heterogéneos; la obtención de imágenes de dióxido de carbono supercrítico en areniscas para demostrar la posibilidad de atrapamiento capilar en el almacenamiento geológico de carbono; y el cálculo de la permeabilidad relativa de carbonatos mixtos-húmedos y sus implicaciones para la recuperación por inyección de agua en yacimientos petrolíferos.

El artículo concluye con un análisis de las limitaciones y los retos, como la búsqueda de muestras representativas, la obtención de imágenes y la simulación del flujo y el transporte en espacios porosos de varios órdenes de magnitud, la determinación de la humectabilidad y la ampliación a escala de campo. Concluimos que es probable que el modelado a escala de poros se aplique cada vez más en la industria petrolera, incluida la evaluación de recursos no convencionales de petróleo y gas. Tiene el potencial para mejorar herramientas que faciliten una recuperación más eficiente del petróleo y el gas, una eliminación eficaz de los contaminantes y un almacenamiento seguro del dióxido de carbono. [4]

3.4 Extracción de redes de poros a partir de imágenes de tomografía microinformática

Los modelos de red que representan el espacio vacío de una roca a través de una malla de poros conectados por gargantas pueden prever la permeabilidad relativa cuando se conocen la geometría de los poros y la mojabilidad. La microtomografía computarizada genera una imagen tridimensional del espacio poroso, pero estas imágenes no pueden ser integradas directamente en los modelos de red. En este trabajo, se desarrolla un algoritmo modificado de bolas máximas, basado en el trabajo de Silin y Patzek, para extraer redes simplificadas de poros y gargantas con geometría e interconectividad parametrizadas a partir de imágenes del espacio poroso.

Se calculan y comparan los parámetros de las redes de poros, como el número de coordinación y las distribuciones de tamaño de poros y gargantas, con datos de referencia de redes obtenidas mediante otros métodos, datos experimentales y cálculos directos de permeabilidad y factor de formación en las imágenes originales. En la mayoría de los casos, los resultados muestran una buena concordancia, permitiendo que las redes extraídas de diversos tipos de roca se utilicen en modelos predictivos. [5]

3.5 Determinación de una dimensión de poro efectiva para medios microporosos

El método transitorio para medir el flujo másico y la permeabilidad a través de un medio microporoso, previamente desarrollado, se emplea en este estudio para obtener diversas características del medio. Utilizando un modelo de medio poroso como un conjunto de capilares, se determina la dimensión efectiva de los poros a partir de las mediciones y se proporciona una interpretación física de los resultados.

Esta metodología muestra un gran potencial como técnica no destructiva para el análisis de medios micro y nanoporosos. La permeabilidad se obtiene directamente a partir de las mediciones de la variación de presión en el tiempo. Además, con información adicional sobre la porosidad de la muestra, se calculan el número de capilares, la tortuosidad y la superficie interna. Los valores obtenidos son muy similares a los obtenidos mediante porosimetría de mercurio y microtomografía. [6]

3.6 Extracción de redes a partir de imágenes del espacio poroso de areniscas y carbonatos

Se propone una metodología para extraer redes a partir de imágenes del espacio poroso, que determina la ubicación y los tamaños de poros y gargantas para generar una representación topológicamente equivalente del espacio vacío en

imágenes tridimensionales (3D) de rocas, basándose en el concepto de bolas máximas. El modelo ha sido probado con éxito en muestras de arenisca y carbonato.

En particular, la red extraída de una imagen de arenisca de Fontainebleau mostró una distribución del número de coordinación que se corresponde bien con la obtenida mediante otro algoritmo de extracción, el cual se basa en conocer la ubicación de los centros de los granos. El modelo también fue validado en una muestra de carbonato del subsuelo de Omán, donde los granos no son fácilmente identificables.

En todas las muestras analizadas, las permeabilidades absolutas predichas a partir de las redes extraídas coincidieron estrechamente con los valores obtenidos en laboratorio. [7]

3.7 Estudio paramétrico de los efectos de rarefacción en flujos térmicos a micro y nanoescala en estructuras porosas

Se analizan la hidrodinámica y la transferencia de calor en micro y nano canales de medios porosos, considerando diferentes porosidades y números de Knudsen (Kn) en un rango de 0.1 a 10. El método estándar de redes Boltzmann (LBM) tiene limitaciones para flujos a microescala cuando el número de Knudsen es menor a 0.1. Por ello, se emplea un LBM térmico modificado que incorpora los efectos de rarefacción en la viscosidad y conductividad térmica, lo que permite ampliar su aplicación para simular una variedad más amplia de regímenes de flujo de Knudsen.

Este estudio presenta los efectos del número de Knudsen y la porosidad en el caudal, la permeabilidad y el número medio de Nusselt. Se detectó el efecto mínimo de Knudsen en canales micro y nano de medios porosos. Además de la porosidad y el número de Knudsen, el tamaño de los obstáculos también influye significativamente en la transferencia de calor, observándose una mejora en la misma cuando disminuye el tamaño de dichos obstáculos. Para una misma porosidad y número de Knudsen, la estructura porosa alineada muestra el mayor rendimiento en la transferencia de calor. [8]

3.8 Estudio analítico del flujo y la transferencia de calor en un medio poroso anular sometido a flujos de calor asimétricos

Este estudio investiga de manera analítica, utilizando diversos modelos, la transferencia de calor mediante convección forzada completamente desarrollada en un espacio anular lleno de un medio poroso que recibe un calentamiento asimétrico. Para el flujo del fluido, se emplearon los modelos clásicos de Darcy y Brinkman, mientras que los modelos de equilibrio térmico local (LTE) y no equilibrio térmico local (LTNE) se utilizaron para describir el proceso de transferencia de calor en medios porosos.

Además, se aplicó un modelo analítico basado en la teoría de aletas para abordar este problema. Se lograron soluciones exactas utilizando los modelos Darcy-LTNE, Darcy-LTE, Brinkman-LTNE, Brinkman-LTE y el modelo de aletas. Entre estas soluciones, la del modelo Brinkman-LTNE se considera como la referencia, ya que es un modelo integral que toma en cuenta el efecto de la fuerza viscosa cerca de la pared sólida y la diferencia de temperatura entre las fases sólida y fluida. Se llevaron a cabo análisis profundos de los parámetros fundamentales que influyen en los campos de velocidad y temperatura. Asimismo, se presentaron los perfiles de velocidad y temperatura para los distintos modelos. Se estudiaron los efectos de ciertos parámetros críticos sobre el rendimiento térmico de un anillo con calentamiento asimétrico que contiene un medio poroso.

Finalmente, se realizó una comparación detallada entre los diferentes modelos analíticos mencionados. Las relaciones de flujo térmico crítico (HF) para las paredes interior y exterior se presentaron a través de una curva $Nu-\xi$ para los cinco modelos. [9]

3.9 Revisión sobre la conducción de calor, convección de calor, radiación térmica y transferencia de calor por cambio de fase de nanofluidos en medios porosos: fundamentos y aplicaciones.

La mejora de la eficiencia en la transferencia de calor de los equipos térmicos es un tema de gran relevancia en el campo de la ingeniería térmica. Gracias a sus propiedades de ligereza, gran superficie específica y alta conductividad térmica, la espuma metálica se presenta como una excelente opción para optimizar la transferencia de calor. Por otro lado, los nanofluidos, que poseen una conductividad térmica superior a la de los fluidos bases convencionales, pueden servir como medios muy efectivos para la transferencia de calor.

Este artículo examina diferentes modos de flujo y transferencia térmica relacionados con los nanofluidos, la espuma metálica y su combinación, así como las propiedades físicas asociadas a ambos. Se analizan las características del flujo y de la transferencia de calor. La intención principal de esta revisión es motivar a los investigadores a enfocarse en los principios fundamentales del transporte que pueden contribuir a mejorar la transferencia de calor de los nanofluidos en medios porosos.

La información presentada en este documento resulta valiosa para optimizar el funcionamiento de intercambiadores de calor compactos y disipadores térmicos en la refrigeración de dispositivos electrónicos utilizando medios porosos y nanofluidos. [10]

3.10 Coeficientes de transferencia de calor interno en medios microporosos con efectos de rarefacción

Se realizó un estudio experimental y numérico sobre la transferencia de calor interna de varios gases en medios microporosos. La sección de prueba utilizada incluía un medio poroso de bronce sinterizado con diámetros de partícula promedio entre $11\ \mu\text{m}$ y $225\ \mu\text{m}$. Los números de Knudsen en las presiones promedio de entrada y salida de cada sección oscilaron entre 0.0006 y 0.13, y las porosidades variaron de 0.16 a 0.38. Se determinaron experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor entre partículas y fluidos para el aire, CO_2 y helio en estos medios.

Los resultados indican que los números de Nusselt, que miden la transferencia de calor interna, disminuyen a medida que se reduce el diámetro de partícula y aumenta el número de Knudsen, manteniendo constante el número de Reynolds. En situaciones donde $\text{Kn} > 0.01$, la rarefacción influye en la transferencia de calor interna. Se desarrolló una correlación para el número de Nusselt que considera este efecto. Además, se realizaron simulaciones numéricas por medio de dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar la transferencia de calor a escala de poros, teniendo en cuenta la rarefacción. Se llevaron a cabo simulaciones tridimensionales a escala de poros para estimar los coeficientes de transferencia de calor partícula-fluido.

Los resultados numéricos sin considerar el flujo deslizante y el salto de temperatura para $\text{Kn} < 0.01$ mostraron una buena concordancia con los datos experimentales. Por otro lado, los resultados numéricos que incorporan efectos de flujo deslizante y salto de temperatura para $0.01 < \text{Kn} < 0.13$ fueron menores que los obtenidos sin considerar la rarefacción, pero más cercanos a los datos experimentales. Los resultados que incluyen efectos de rarefacción pueden simular con precisión la transferencia de calor transitoria en medios microporosos. [11]

Capítulo 4

Construcción del Modelo

El presente capítulo está enfocado a describir detalladamente la manera en que se construyó el modelo tridimensional de la roca digital, cuya reconstrucción tridimensional tuvo como materia prima un conjunto de microtomografías computarizadas.

4.1 Tomografías computarizadas (TC)

G. Hounsfield desarrolló la Tomografía Computarizada (TC), en Inglaterra en el año de 1972, esto fue el mayor avance de la radiología y el inicio de los métodos que actualmente se conocen como imagenología. Hoy en día, existen diversas técnicas imagenológicas que permiten realizar diagnósticos adecuados, con esto, se pueden enumerar las siguientes [12]

- Rayos X
- Ultrasonido
- Resonancia magnética
- Medicina nuclear

4.2 Calidad de las Tomografías Computarizadas

La calidad de una TC queda definida por el grado de exactitud con la que se reproduce en la imagen las características de un objeto. La calidad de la imagen es difícil de valorar desde una perspectiva única pues en su evaluación intervienen una variedad de factores que pueden ser objetivos o subjetivos.

Por otro lado, existen diferentes circunstancias que afectan directamente la calidad de una TC; a continuación, se describen estas.[12]

4.2.1 Ruido

Si se quisiera obtener la imagen tomográfica de un objeto homogéneo, se esperaría obtener un valor constante en los vóxeles que componen toda la imagen. Sin embargo, esto no sucede porque hay variaciones locales aleatorias asociadas con todo el proceso de adquisición y reconstrucción de la imagen. Las fuentes del ruido son: el carácter aleatorio de la interacción de los rayos x en los detectores (ruido cuántico), las

inexactitudes del proceso de reconstrucción y el ruido electrónico generado en el proceso de detección.

En general, en un tomógrafo el componente dominante de producción de ruido es el ruido cuántico, el cual es deseable debido a que cuando aumenta el número de fotones detectados el ruido disminuye. Los parámetros de adquisición cuya variación modifica el número de fotones detectados son: la intensidad de corriente del tubo, el tiempo de rotación del tubo, la colimación de haz, el espesor del corte y el kilovoltaje. Todos ellos, al aumentarlos disminuye el ruido. El ruido del píxel es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la dosis de radiación; por poner un ejemplo, si se quiere reducir el ruido a la mitad es necesario aumentar la dosis cuatro veces.

4.2.2 Uniformidad espacial

La uniformidad espacial se verifica comparando en la imagen de un cilindro lleno de agua los valores del número de TC en el centro y en la periferia. Este análisis sirve para valorar si el sistema ofrece la misma respuesta en cualquier punto del cilindro.

4.2.3 Resolución temporal

La resolución temporal es la capacidad de conseguir imágenes de objetos que se mueven con rapidez con una buena definición. Una buena resolución temporal evita defectos debidos al movimiento como la borrosidad de la imagen. [13]. Para el caso de adquisición de tomografías para una roca este ruido se ve minimizado dado que el objeto es inanimado.

4.2.4 Ruido de origen físico

En ocasiones, una gran atenuación de los fotones de menor energía del haz por parte de estructuras de alta densidad (en relación con las estructuras vecinas) provoca que las zonas correspondientes en la imagen aparezcan con una densidad menor a la que deberían tener. Por otra parte, si en un mismo vóxel coinciden dos estructuras cuyos coeficientes de atenuación son muy diferentes, el sistema representa en el píxel un valor medio de atenuación entre ambas y, por tanto, una zona en la imagen que no corresponde con la realidad (esto se corrige al variar el espesor del corte) [14].

4.3 Metodología para la generación del modelo de la roca

El proceso de generación del modelo anatómico se divide en 10 etapas, las cuales se describen a continuación de manera general:

- El proceso comienza convirtiendo el archivo de extensión gif, obtenido de la página de Digital Rocks, a video en formato mp4 (Sección 4.6).
- Las imágenes fueron extraídas del archivo de video mp4 empleando el software ShareX en el que se estableció un tiempo de captura automática de imágenes.
- Después de una inspección visual, las imágenes repetidas fueron eliminadas manualmente.
- Se seleccionó una región para el estudio, la cual está constituida por 60 proyecciones o cortes, y un área cuadrada de 60x60 vóxels.
- Por medio de un código de MATLAB se binalizaron las 60 imágenes. El código de MATLAB usado para dicho propósito está disponible en el anexo 1 y su funcionamiento se explica en la Sección 4.7 (Fig. 4.7).
- Debido a que las imágenes binarias contenían ruido, este fue eliminado por medio del código de MATLAB del anexo 2, Sección 4.8 (Fig 4.8).
- De las imágenes limpias se extrajeron las coordenadas de cada vóxel que representaba la parte sólida de la Roca Digital esto se agregó en el código que se encuentra al final del anexo 2.
- Se crea un archivo, el cual puede ser leído por GAMBIT, que debe contener los comandos necesarios para copiar un volumen primordial (que representa un vóxel) a las diferentes coordenadas cartesianas del paso anterior Sección 4.9
- Los vóxels son ensamblados de manera manual en GAMBIT por medio de la operación booleana de unión, y de este modo, los granos de la Roca Digital son conformados.
- Se realiza el mallado del volumen para posteriormente ser utilizado como base en las simulaciones de FLUENT (Sección 5.2.2.1).

4.4 Características de las TC's

La peculiaridad de dicho conjunto de imágenes es que son representaciones bidimensionales de la estructura interna de la arenisca, en otras palabras, son planos paralelos que mantienen una distancia constante entre ellos. Lo anterior resulta idóneo para definir la forma en un espacio tridimensional. Cabe señalar que la muestra de la roca, pese a sus dimensiones, representa las características de la arenisca dada su naturaleza de estructura recurrente y por lo tanto los datos son confiables.

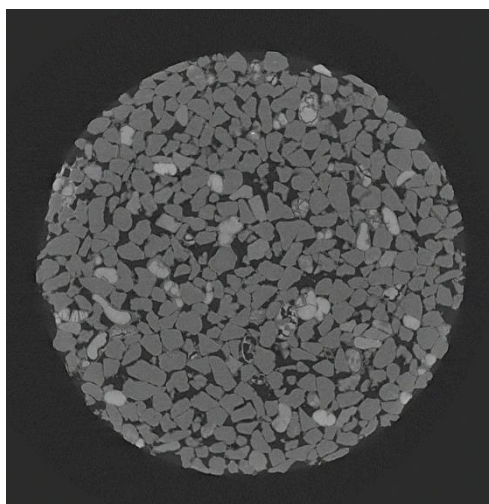


Fig. 4.4 Proyección de la roca sedimentaria del estudio de TC.

Después de haber revisado las circunstancias que pueden alterar la calidad de las TC's, a continuación, se dan a conocer los parámetros físicos con los que se obtuvo la imagen y las principales características de la muestra:

Tabla 4.4 Características de las imágenes.

Parámetro	Valor
Microtomógrafo	HECTOR de la Universidad de Ghent
Número de proyecciones	2400
Tiempo de exposición	1s cada proyección
Espesor de los cortes	0.0082 mm
KVP	100 kV, 10 W
Columnas y Filas	560x572 vóxel
Espaciamiento del píxel	0.0082 mm/vóxel
Profundidad en escala de grises	12 bits
Diámetro de la roca	4mm
Porosidad	0.1816

4.5 Características de los archivos PNG y JPG

Cuando se descarga una imagen en internet hay dos formatos que dominan con mucha diferencia. Estos son jpg y png. A simple vista, las imágenes en estos formatos parecen iguales. Lo cierto es que detrás de estos dos formatos hay algoritmos bastante sofisticados, matemáticas avanzadas y realmente bastantes diferencias en cuanto a su funcionamiento. Aunque a simple vista sean iguales.

A finales de la década de 1980 y principios de los 90, el mundo enfrentaba un desafío bastante grande con el crecimiento de internet. Las imágenes digitales fueron ganando popularidad rápidamente, pero su uso estaba muy limitado por las restricciones tecnológicas de la época, sobre todo en almacenamiento. Básicamente, los discos duros eran pequeños y caros, el ancho de banda de internet era extremadamente limitado, y los formatos de imágenes existentes ocupaban demasiado espacio en el disco. En ese entonces, los formatos de imágenes más comunes eran BMP y TIF.

BMP, desarrollado por Microsoft, ofrecía una buena calidad de imagen, pero a costa de archivos enormes, ya que no comprimía las imágenes de ninguna manera. TIF, por su parte, era más versátil y permitía cierta compresión, pero seguía generando archivos considerablemente grandes.

También existían formatos como gif, que permitían algo de compresión y era eficiente para imágenes con pocos colores, pero bastante mediocre para fotografías. En este contexto, surge un grupo de expertos en fotografía y tecnología que se unió para solucionar este problema, conocido como el Joint Photographic Experts Group, o JPEG, desarrollando un algoritmo de compresión tan revolucionario como complejo.

El tema es que Windows en ese momento no permitía nombres de extensiones de más de tres caracteres y por eso es que es más común encontrar estos archivos como .jpg en vez de .jpeg, aunque a día de hoy sí que también podemos encontrarlos como .jpeg e incluso como .jp, que fue una abreviación que no encaja tanto como .jpg. Pero al final, son todos del mismo tipo de archivo, no hay ninguna diferencia.

La innovación clave del JPEG fue su uso de la compresión con pérdida, o "lossy" en inglés. Este enfoque elimina selectivamente datos de la imagen menos perceptibles para el ojo humano, logrando una reducción significativa en el tamaño del archivo. Aunque esto resultaba en cierta pérdida de calidad, especialmente en niveles altos de compresión, la relación entre tamaño y calidad fue revolucionaria para su época.

JPG consigue una reducción de entre el 60% y el 75% del tamaño original con una pérdida de calidad mínima. Por ejemplo, una imagen sin comprimir en formato BMP de 10 MB podría reducirse entre 2 y 4 MB con una compresión moderada, manteniendo una calidad visual muy buena para la mayoría de los propósitos, pudiendo llegar a comprimir la imagen aún más a costa de perder un poco de calidad. La introducción de JPEG transformó el panorama digital. De repente era posible cargar imágenes más rápidamente en páginas web y enviar fotos por correo electrónico sin esperar horas.

JPG se aprovecha de las limitaciones del ojo humano para eliminar información que consideramos menos importante. El proceso comienza dividiendo la imagen en pequeños bloques de píxeles. Luego, sobre estos bloques se aplica una técnica matemática llamada "transformada de coseno discreta" para convertir la información de color y brillo de estos bloques en frecuencias. Aquí es donde entra en juego la

pérdida: las frecuencias más altas, que corresponden a detalles más finos que el ojo humano tiene dificultades para percibir, se reducen o se eliminan.

Este proceso se ajusta según el nivel de compresión deseado; a mayor compresión, más información se descarta. Como resultado, obtenemos una versión simplificada de la imagen original que, aunque técnicamente ha perdido datos, sigue siendo muy parecida para el ojo humano. Aunque JPG utiliza compresión con pérdida, también utiliza compresión sin pérdida para reducir aún más la información. Esto lo consigue mediante unos pequeños trucos matemáticos, dos para ser exactos: primero, la codificación por longitud de carrera, y luego la codificación de Huffman.

La codificación por longitud de carrera simplemente reorganiza la forma en que se presenta la información. En una imagen es igual; hay muchos píxeles que son iguales, sobre todo ceros después de aplicar los métodos anteriores. JPG se aprovecha de esto para agruparlos y así ahorrar información. Luego, la codificación de Huffman consiste en asignar códigos más cortos a valores más frecuentes.

La compresión que consigue JPG es bastante buena, pero aun así este formato sigue teniendo un problema importante: la pérdida de información. En una fotografía quizás no lo es tanto, porque el mundo real tiene muchos detalles que muchas veces para el ojo humano son imperceptibles, pero en otro tipo de imágenes, como logos o dibujos, esta compresión que hace JPG sí puede llegar a ser un problema.

Otro problema que tiene JPG es que tampoco permite la transparencia en las imágenes. Si al descargarlo ves que es un JPG, ni te molestes en abrirlo, porque JPG no admite transparencias.

El caso es que sí que había un formato en esta época, al principio de los 90, que sí que permitía las transparencias, y este no era otro que GIF. El formato que usaban muchos diseñadores para crear logos, dibujos, etc., ya que además de permitir la transparencia, las imágenes usaban compresión sin pérdida. Así que las imágenes no perdían calidad, pero tampoco era perfecto. La transparencia que consigue GIF es un poco rudimentaria; básicamente un píxel o es transparente o no lo es, no puedes ajustar cuánta transparencia quieres. Además de que apenas podía representar 256 colores contra los más de 16 millones de colores que consiguió JPG.

A mediados de los 90, poco después de la aparición de JPG, aparece PNG, siglas en inglés de Portable Network Graphics, o gráficos de red portátil. Este formato nace como una mejora del formato GIF, permitiendo una transparencia total en las imágenes, pudiendo ajustar el nivel de esta, además de una mejor representación de colores, con más de 16 millones de colores, al igual que JPG. PNG al igual que GIF usa un método de compresión sin pérdida, lo que quiere decir que consigue reducir el tamaño de la imagen sin perder calidad, ya que al contrario que JPG, el proceso que hace de compresión es totalmente reversible. PNG utiliza un método de compresión conocido como "deflate", que utilizan otros formatos como el famoso ZIP, y es ciertamente más sencillo que el de JPG.

Deflate consiste únicamente en dos algoritmos: por un lado, la codificación de Huffman, que acabamos de ver con JPG, y por otro un método de compresión conocido como LZ77, acrónimo de Abraham Lempel, Jacob Ziv y 1977, básicamente los dos creadores y el año en que se creó el modelo. LZ77 es muy usado porque es fácil de implementar y además bastante eficiente. Este funciona encontrando y reutilizando secuencias de datos que ya han aparecido antes en el mismo archivo.

En lugar de almacenar cada byte tal cual, LZ77 intenta encontrar secuencias de bytes que ya hayan aparecido anteriormente. Si encuentra una coincidencia, en lugar de almacenar la secuencia completa, almacena un puntero que indica la distancia hacia atrás donde se encuentra la coincidencia y también la longitud de la secuencia coincidente. Si combinamos LZ77 con la codificación de Huffman que vimos antes para JPG, obtenemos el famoso algoritmo Deflate que utiliza PNG. La compresión sin pérdida que hace PNG hace que estas imágenes sean de mayor calidad, sobre todo si hacemos zoom.

El tema es qué JPG consigue archivos considerablemente más pequeños que PNG. JPG es generalmente mejor para fotografías, imágenes con muchos colores y gradientes suaves, ya que ofrece una buena compresión sin perder apenas calidad, teniendo así archivos más pequeños. Por otro lado, PNG es superior para imágenes con bordes nítidos, texto o gráficos con áreas de color sólido. PNG conserva la calidad de la imagen original sin importar cuántas veces la guardes. También admite transparencia, lo cual es útil para logos e imágenes que necesitan integrarse con diferentes fondos.

Pero debido a esto, los archivos PNG suelen ser considerablemente más grandes que los JPG. Sabiendo esto, ya se puede considerar cuál conviene más dependiendo del uso que se vaya a hacer. Luego tenemos otros formatos, como por ejemplo WEBP, que después de PNG y JPG es el formato que más podemos encontrar en internet. Es bastante más moderno que los otros dos y fue creado por Google allá por el año 2010. Este formato admite tanto compresión con pérdida como compresión sin pérdida.

Según estudios realizados por la propia Google, WEBP consigue reducir en torno a un 30% el tamaño de las imágenes JPG y PNG sin ninguna pérdida añadida. Entonces, ¿por qué está tan odiado? Básicamente porque al ser un formato de imagen bastante nuevo, muchas aplicaciones no han empezado a ser compatibles con él hasta hace poco. Recientemente, parece que esto está cambiando, y puede ser que este formato se quite la mala fama que tiene e incluso puede llegar a destronar a JPG y PNG en un futuro. [15]

4.6 Extracción de imágenes provenientes de la Tomografía Computarizada

Se grabó un video del gif proveniente de la página de Digital Rocks en reproducción, para después por medio del software ShareX capturar los fotogramas que conforman al video calculando cantidad de imágenes por segundo.

Se realizó discriminación de las imágenes repetidas por medio de inspección visual, guardadas en formato PNG. Posteriormente se seleccionó una región para el estudio, la cual está constituida por 60 proyecciones o cortes. Teniendo en cuenta que la región debe ser un cubo las dimensiones de la región van ligadas al tamaño del vóxel y la cantidad de proyecciones seleccionadas.

4.7 Binarización

Durante el procesamiento de las imágenes se consideró una única manera de binarización que fue por método manual, se realizó por un tiempo la binarización con este primer método, pero conforme avanzaba fue descubierto otro método más eficiente, fue por medio de un código de MATLAB que se continuó la binarización tomando menos tiempo para binarizar cada imagen. Los métodos fueron los siguientes:

1. Visualizador de imágenes de Microsoft

Cada imagen se procesó con cambios de brillo y contraste siguiendo los pasos de la tabla siguiente:

Paso 1: Abrimos la imagen en el visualizador de imágenes de Microsoft. Por ejemplo: *Imagen01*

Paso 2: Configuramos con las siguientes especificaciones

Imagen01 paso 1 → brillo +000 → contraste -050

Imagen01 paso 2 → brillo -015 → contraste -050

Imagen01 paso 3 → brillo -005 → contraste -050

Imagen01 paso 4 → brillo +040 → contraste -100

Imagen01 paso 5 → brillo +040 → contraste -100

Imagen01 paso 6 → brillo +033 → contraste -100

Imagen01 paso 7 → brillo +000 → contraste -100

Imagen01 paso 8 → brillo +000 → contraste -100

Imagen01 paso 9 → brillo +000 → contraste -100

Imagen01 paso 10 → brillo +025 → contraste -100

Imagen01 paso 11 → brillo -085 → contraste -100

Imagen01 paso 12 → brillo +000 → contraste -100

Imagen01 paso 12 → brillo +000 → contraste -100 → Se guarda la imagen como: Monocromático (.bmp)

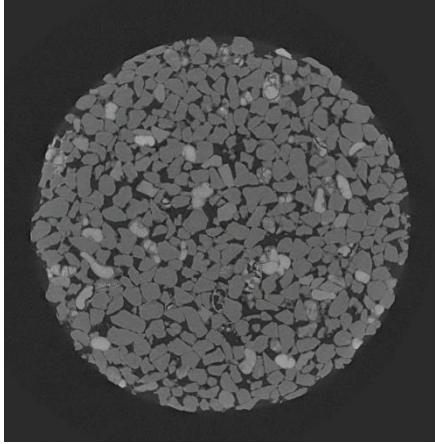


Fig. 4.7.1 Imagen 401 original.

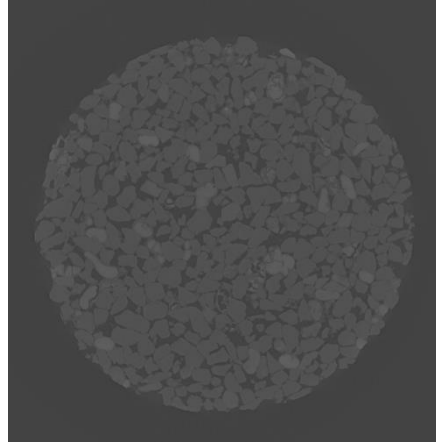


Fig. 4.7.2 Imagen 401 con contraste del -50.

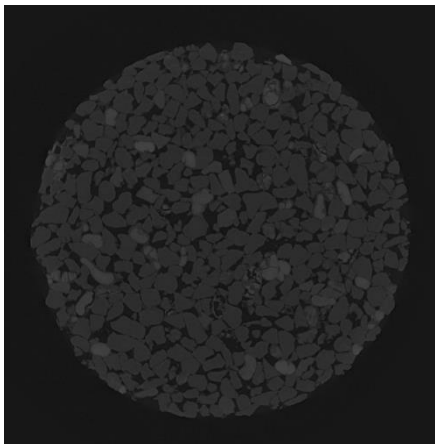


Fig. 4.7.3 Imagen 401 con brillo -15 y contraste -50.

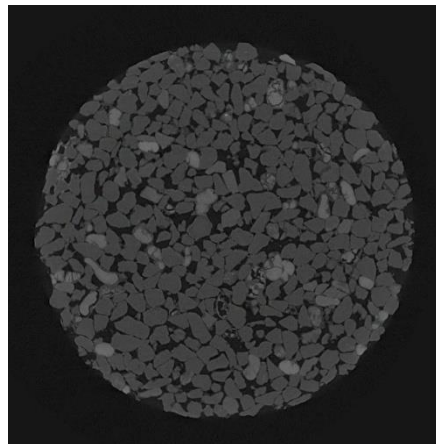


Fig. 4.7.4 Imagen 401 con brillo -5 y contraste 50.

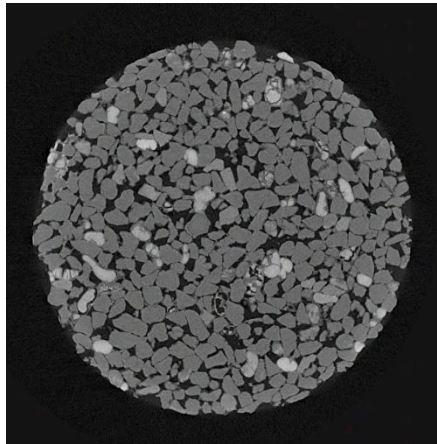


Fig. 4.7.5 Imagen 401 con brillo 40 y contraste 100.

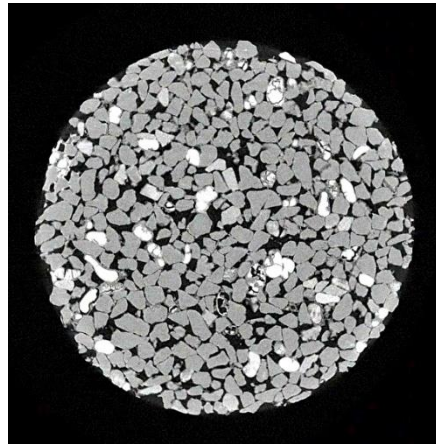


Fig. 4.7.6 Imagen 401 con brillo 40 y contraste 100.

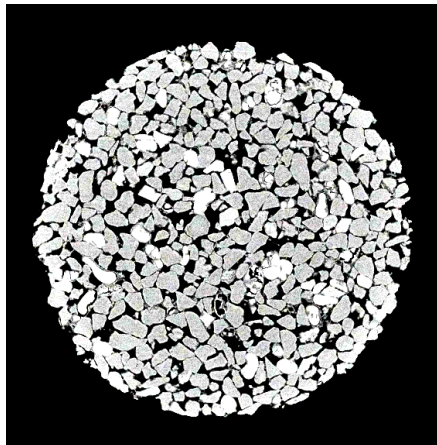


Fig. 4.7.7 Imagen 401 con brillo 33 y contraste 100.

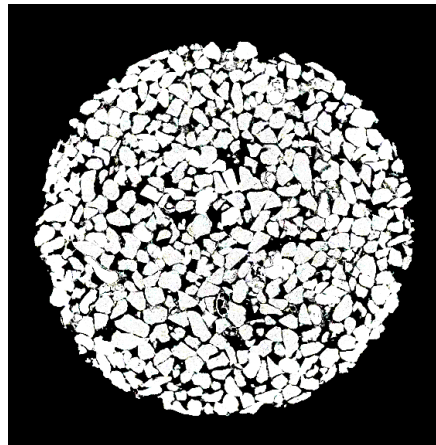


Fig. 4.7.8 Imagen 401 con contraste 100.

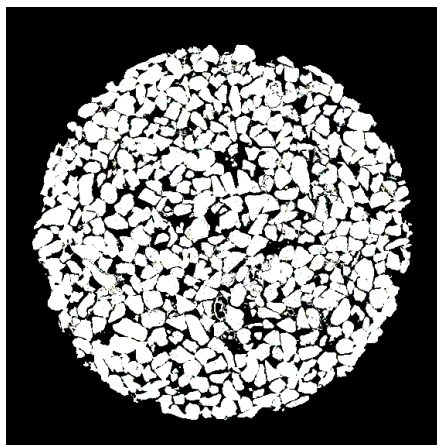


Fig. 4.7.9 Imagen 401 con contraste 100.

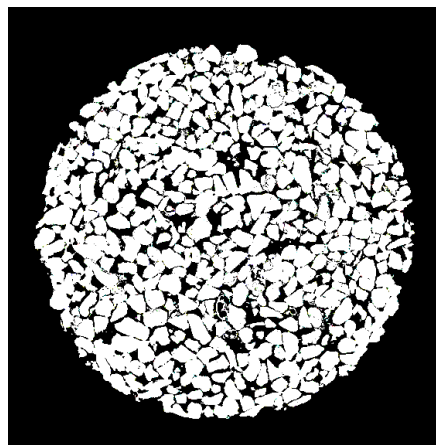


Fig. 4.7.10 Imagen 401 con contraste 100.

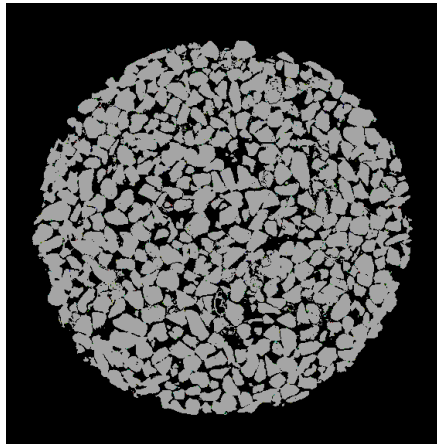


Fig. 4.7.11 Imagen 401 con brillo 25 y contraste 100.

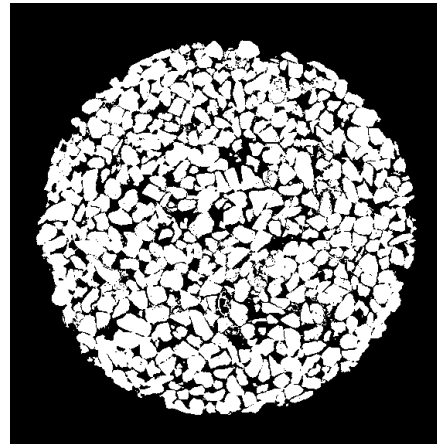


Fig. 4.7.12 Imagen 401 con brillo -85 y contraste 100.

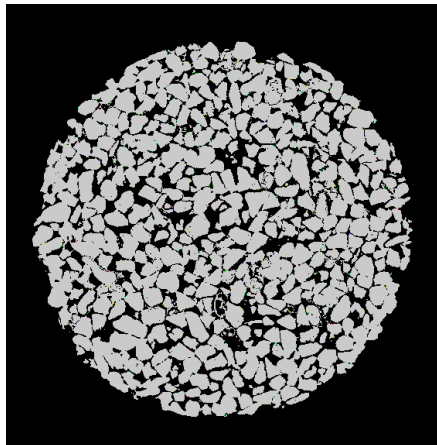


Fig. 4.7.13 Imagen 401 con contraste 100.

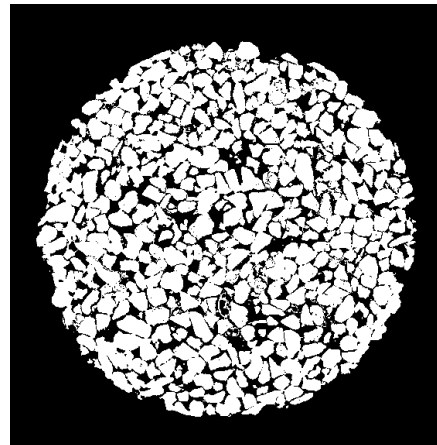


Fig. 4.7.14 Imagen 401 procesada convertida a formato monocromático.

Estos pasos se repiten para cada imagen individualmente.

2. Código de MATLAB

El segundo método utilizado para la binarización de las proyecciones es por medio de un código de MATLAB que se encuentra en el Anexo 1 y este que contiene como principal característica el comando *imadjust*.

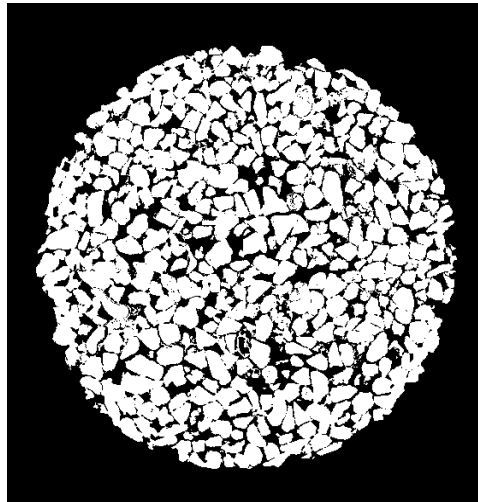


Fig. 4.7.15 Imagen binarizada por código de MATLAB.

Imadjust aumenta el contraste de la imagen asignando los valores de la imagen de intensidad de entrada a nuevos valores de modo que, de forma predeterminada, el 1% de los datos se sature en las intensidades bajas y elevadas de los datos de entrada.

Cada una de las TC's obtenidas anteriormente proporciona una aproximación discreta de la roca digital, sin embargo, no aportan información geométrica del volumen de ésta. Por otro lado, contienen una cantidad abundante de información inútil para los fines que se persiguen en esta investigación. Debido a lo anterior, antes de obtener la geometría de la roca digital se debe pasar por varias etapas, una de ellas es la obtención de contornos. Cabe destacar que el contorno obtenido a partir de las TC's también es discreto.

Por otro lado, para reconstruir la superficie que delimita a la roca digital, es fundamental obtener contornos continuos que existan en planos paralelos (isosuperficies). La forma de obtener dichos contornos continuos es especificando las coordenadas de cada píxel contenido en los contornos discretos y aproximarlos a curvas empleando SPLINES; esto se describe detalladamente en la siguiente sección.

4.8 Limpieza Binaria

La limpieza de las imágenes se realizó mediante el código computacional registrado ante INDAUTOR 00-2024-000000000000-00 Anexo 2. El código mencionado lee cada una de las imágenes extraídas a partir del gif disponible en la página de Digital Rocks.

Para la realización de este código se consideró la limpieza de píxeles negros y de píxeles blancos, para cada una de ellas escenarios de un elemento, dos elementos y tres elementos. Para ejemplificar esto se presenta en la figura 4.8.1 el caso de un elemento donde se puede apreciar que los ocho píxeles vecinos al píxel central son de

color negro para ese caso el programa lee todos los píxeles de la imagen y cuando encuentra ese patrón (el caso de un elemento) cambia el píxel central por un píxel negro.

Para el caso de dos elementos se presenta en la figura 4.8.2 las 8 situaciones que se pueden presentar, en este caso el programa lee de nuevo toda la imagen buscando todos los patrones representados en la figura 4.8.2 cuando encuentra un patrón específico de igual manera cambia los píxeles por su color contrario; para el caso de tres elementos sucede algo similar y su representación gráfica se puede visualizar en la figura 4.8.3.

La segunda mitad del código realiza la limpieza para píxeles blancos y además genera los comandos necesarios para que el programa de dibujo copie un volumen unitario en las coordenadas extraídas del procesamiento anterior.

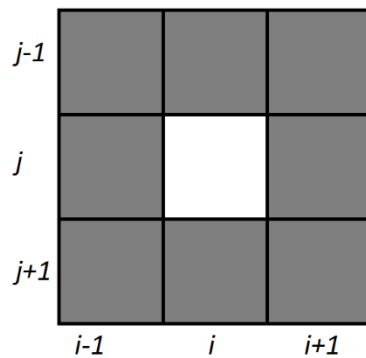


Fig. 4.8.1 Representación de píxeles negros rodeando a un píxel blanco.

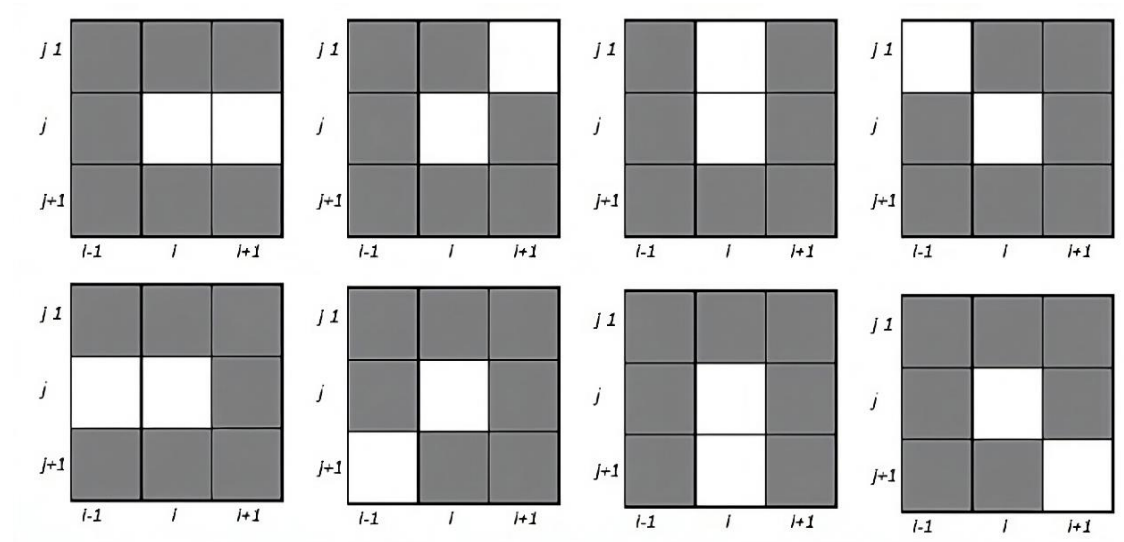


Fig. 4.8.2 Representación de casos con 2 píxeles blancos rodeados de píxeles negros.

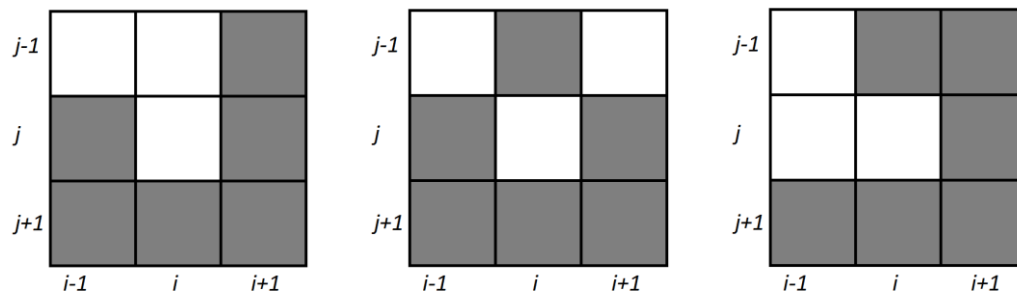


Fig. 4.8.3 Ejemplo de representación de casos con 3 pixeles blancos rodeados de pixeles negros.

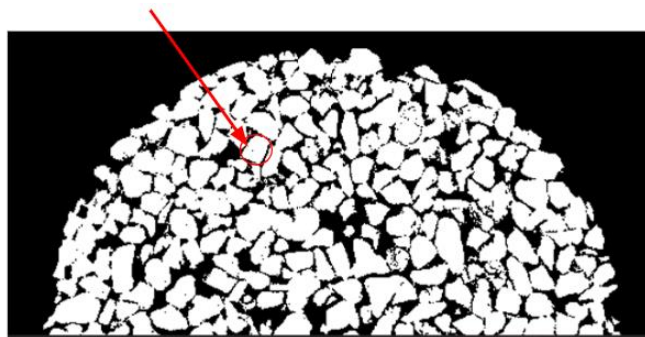


Fig. 4.8.4. Imagen binarizada sin limpieza de pixel.

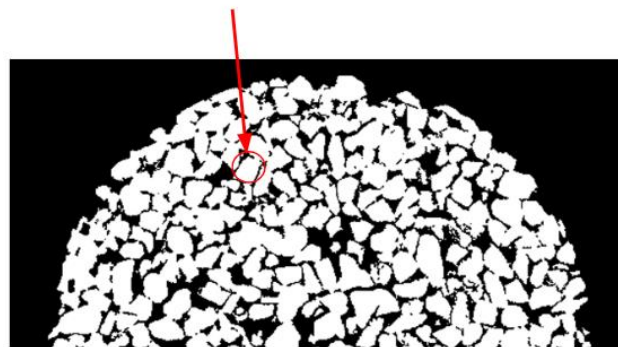


Fig. 4.8.5. Imagen binarizada con limpieza de pixel.

Cabe destacar que el resultado de la limpieza con tres elementos causaba una pérdida considerable de información gráfica, así que se consideró para este estudio la eliminación únicamente del caso para 1 pixel blanco rodeado de pixeles negros y el caso de 2 pixeles blancos rodeados de negros.

4.9 Creación volumen

En el programa de dibujo son leídos los comandos generados con MATLAB y un volumen unitario cúbico es copiado a las coordenadas obtenidas con el procesamiento, en la Fig. 4.9.2 se aprecia lo descrito para la tomografía ubicada en

Z401, lo siguiente es realizar operaciones booleanas de unión entre los volúmenes adyacentes, en la figura 4.9.4 se muestra el resultado de la unión de los volúmenes seleccionados de la figura 4.9.3. El resultado final para el corte se muestra en la figura 4.9.5.

El siguiente paso es realizar la operación booleana de sustracción, en esta operación se sustrae los volúmenes de la figura 4.9.5 de un volumen que originalmente tenía dimensiones de 60x60x60.

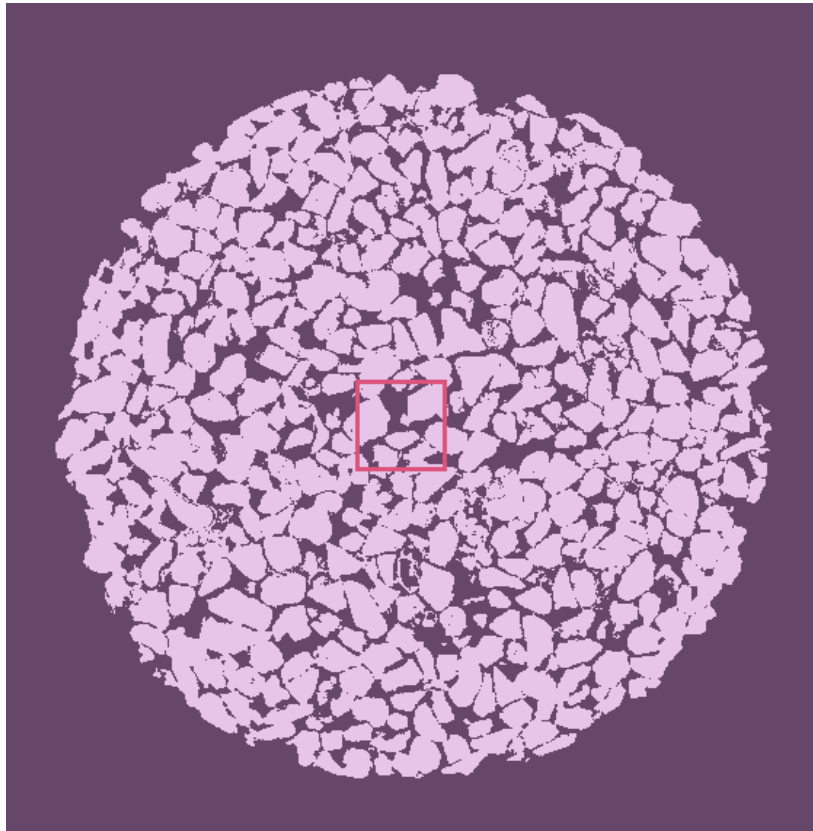


Fig. 4.9.1 Selección del área de 60 x 60 vóxeles.

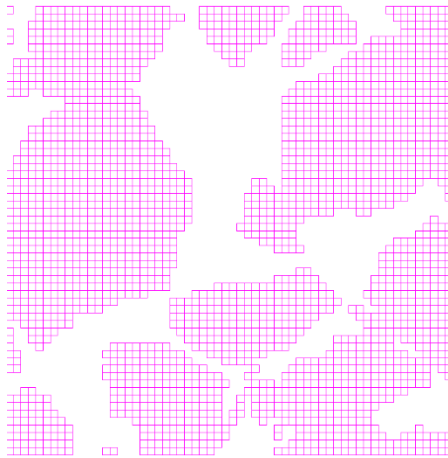


Fig. 4.9.2 Volumen creado con las coordenadas de MATLAB en el programa de dibujo.

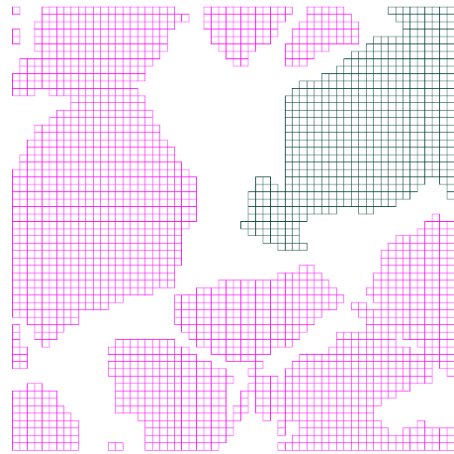


Fig. 4.9.3 Selección de volúmenes.

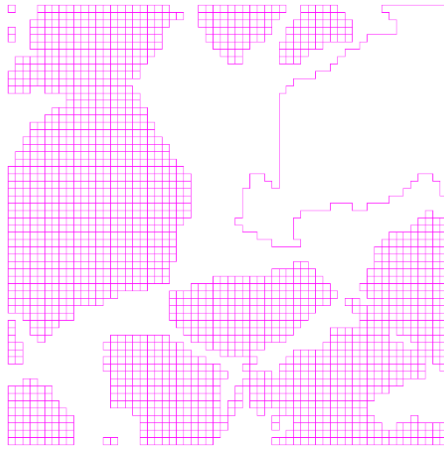


Fig. 4.9.4 Unión de volúmenes seleccionados.

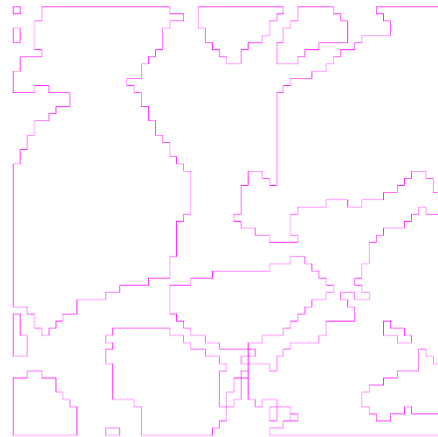


Fig. 4.9.5 Unión de todos los volúmenes.

En la figura 4.9.6 se representa la selección, el resultado de la sustracción se visualiza en las figuras 4.9.7 y figura 4.9.8.

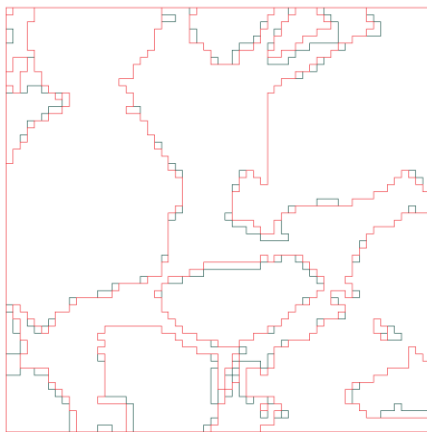


Fig. 4.9.6 Unión de volúmenes seleccionados.

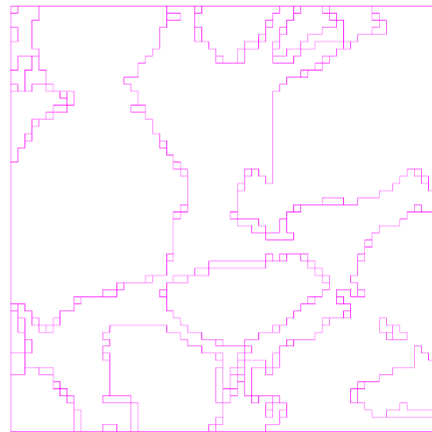


Fig. 4.9.7 Sustracción en 2D representada del volumen.

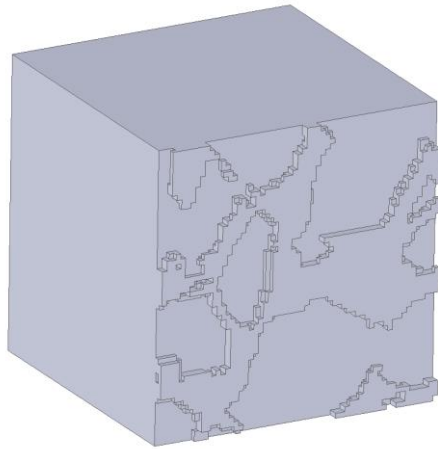


Fig. 4.9.8. Sustracción representada en 3D del primer volumen seleccionado.

Una vez realizado el procesamiento para las 60 imágenes se obtiene el resultado final representado en la figura 4.9.9.

Dado que la roca digital fue construida con volúmenes con una multiplicidad de volúmenes unitarios fue fácil construir una malla también de volúmenes unitarios misma que fue exportada a Fluent para posteriormente realizar un refinamiento basado en gradientes, más detalles de los pasos de refinamiento se dan en la sección 4.2.2.1.

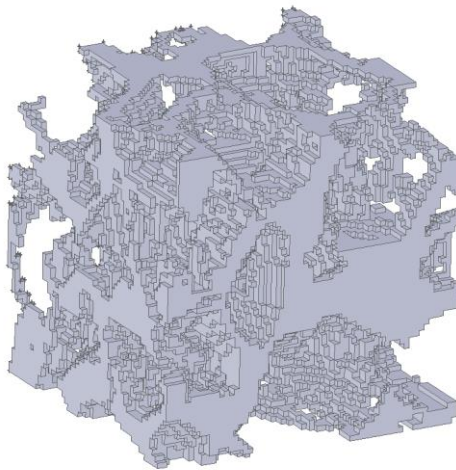


Fig. 4.9.9 Resultado de la sustracción de los 60 volúmenes.

Capítulo 5

Ecuaciones gobernantes y análisis numérico

El presente capítulo está dividido en dos secciones, las cuales se describen brevemente a continuación.

En la primera sección se muestra una serie de ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos, dichas ecuaciones proporcionan un medio para determinar la variación en las propiedades del fluido de punto a punto. Estas ecuaciones son: la de continuidad y la de cantidad de movimiento.

En la segunda sección se da una explicación de la razón por la que se usó el programa CFD Ansys Fluent® 2025. También se muestran los pasos que se siguieron en la elaboración del modelo, así como los parámetros fijados en el programa para poder resolverlo.

5.1 Ecuaciones gobernantes

Las consideraciones que se han tomado en el presente estudio son las siguientes:

- Modelo tridimensional.
- Estado permanente.
- El fluido es incompresible.
- Se desprecian las fuerzas del cuerpo.
- Viscosidad constante.

5.1.1 Ecuación de continuidad

Con las consideraciones anteriores, la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 5.1a}$$

5.1.2 Ecuación de cantidad de movimiento

Para las condiciones mencionadas se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. 5.1 b}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. 5.1 c}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. 5.1 d}$$






5.2 Análisis numérico

La compleja naturaleza de los problemas de flujo de fluidos y transferencia de calor a menudo requiere de metodologías avanzadas para su comprensión y resolución. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha emergido como una solución poderosa, transformándose en una herramienta esencial para el análisis y diseño en la ingeniería. La siguiente sección detalla el análisis computacional su proceso, preproceso y postproceso, utilizando el software Ansys Fluent® 2025, destacando su capacidad para abordar la complejidad de estos fenómenos.

5.2.1 Análisis computacional

Los problemas relacionados con el flujo de fluidos y transferencia de calor son a menudo complejos. En los últimos años la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) se ha desarrollado tanto que llegó a ser considerada como una herramienta muy importante para el análisis y diseño de numerosas aplicaciones en la industria.

El paquete computacional Ansys Fluent® 2025 es uno de los códigos más completos en su clase para los análisis de CFD. Es útil para el modelado de flujo de fluidos y transferencia de calor. Dicho programa es capaz de resolver las ecuaciones empleando los algoritmos deseados, es un programa de propósito general que resuelve las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes, presentadas en la sección anterior, mediante el método de volumen finito. Este código cuenta con la capacidad de resolver modelos con fenómenos tales como:

-  Flujo en geometrías bidimensionales o tridimensionales.
-  Fluidos compresibles e incompresibles.
-  Análisis en estado estacionario o transitorio.
-  Flujos viscosos y no viscosos.
-  Fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

-
- 🖨 Transferencia de calor por convección natural o forzada.
 - 🖨 Transferencia de calor combinada (conducción/convección).
 - 🖨 Transferencia de calor por radiación.
 - 🖨 Reacciones químicas.
 - 🖨 Modelos con cambio de fase.

Por todas las ventajas que se presentan, se optó por dar solución de forma numérica al problema planteado por medio del paquete de CFD Ansys Fluent® 2025

5.2.2 Proceso del análisis

En general para llevar a cabo un análisis de CFD se tienen tres etapas principales, estas son:

- 🖨 Preproceso: Se trata de obtener el dominio computacional, generando la malla que lo represente.
- 🖨 Proceso: Se establece la información necesaria para resolver el problema.
- 🖨 Postproceso: Se interpretan los resultados obtenidos.

5.2.2.1 Preproceso

La implementación de esta etapa se realizó con la ayuda del software Gambit® 2.4.6. Con este programa se generó el modelo de la roca sedimentaria, así como el dominio computacional, además, se declararon las condiciones de frontera. Cada subrutina de esta etapa se describe brevemente a continuación.

Modelo geométrico

La descripción de cómo se elaboró el modelo se detalló en la sección 4.7. El área transversal en diversas secciones del modelo se detalla en la siguiente gráfica, Fig. 5.2.2.1a

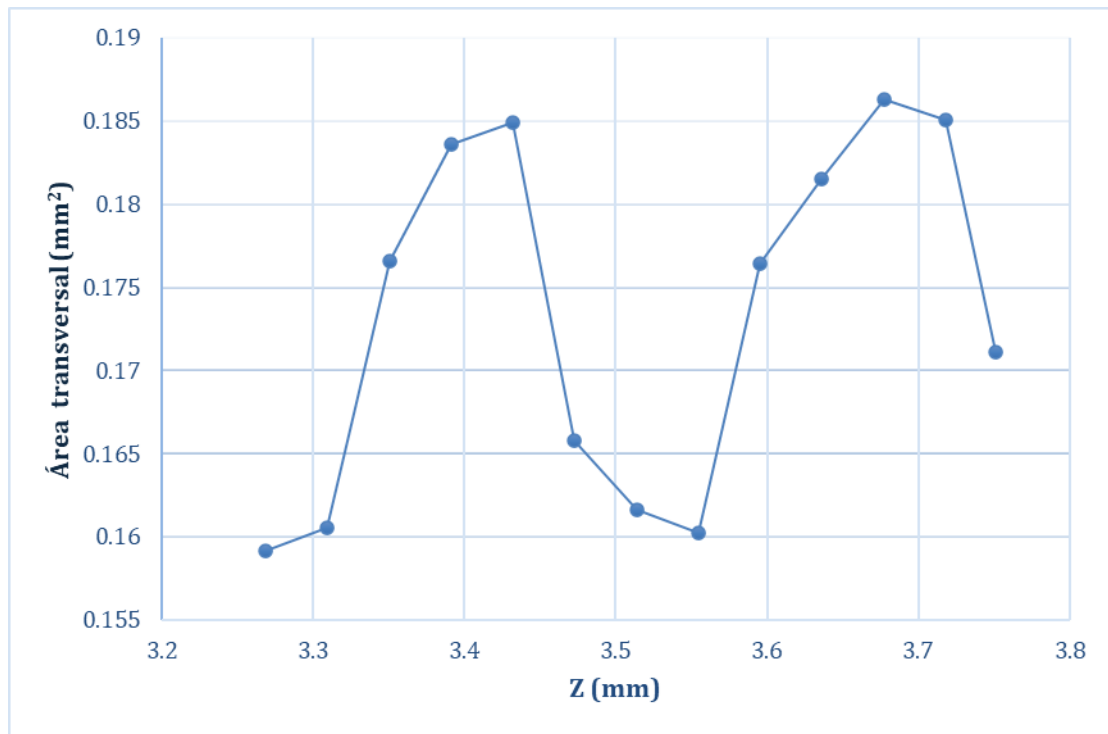


Fig. 5.2.2.1a Sección transversal en la dirección Z.

Mallado

Habiendo obtenido el modelo geométrico, el siguiente paso es la realización de un análisis de sensibilidad de malla. El objetivo de dicho análisis es la generación de una malla con una distribución aceptable, esto comprende el tipo de elemento que conforma a la malla y el tamaño de dicho elemento, para así poder eliminar el efecto de la malla en los resultados que se obtendrán.

Este análisis se hace creando una serie de mallas con diferentes distribuciones y se pone a prueba cada una de ellas. El refinamiento de malla se realizó de manera automática, la malla inicial consistía en 70 695 elementos cúbicos, después de una primera simulación se recurrió a una adaptación de malla de los elementos pegados a las fronteras mismos que fueron automáticamente divididos en cuatro elementos cúbicos, después de este refinamiento se obtuvo una malla de 335 939 elementos cúbicos. Con un segundo refinamiento se obtuvo una malla de 1 868 694 de elementos cúbicos, en la verificación del flujo volumétrico se observó una tendencia decreciente, pero con tendencia a un valor constante y en ese punto se suspendió el refinamiento. Lo descrito se puede apreciar en la Fig. 5.2.2.1b y cabe señalar que para el estudio de permeabilidad se trabajó con la malla más grande la de 1 868 694. Un ejemplo de la distribución de malla se encuentra en la Fig. 5.2.2.1c.

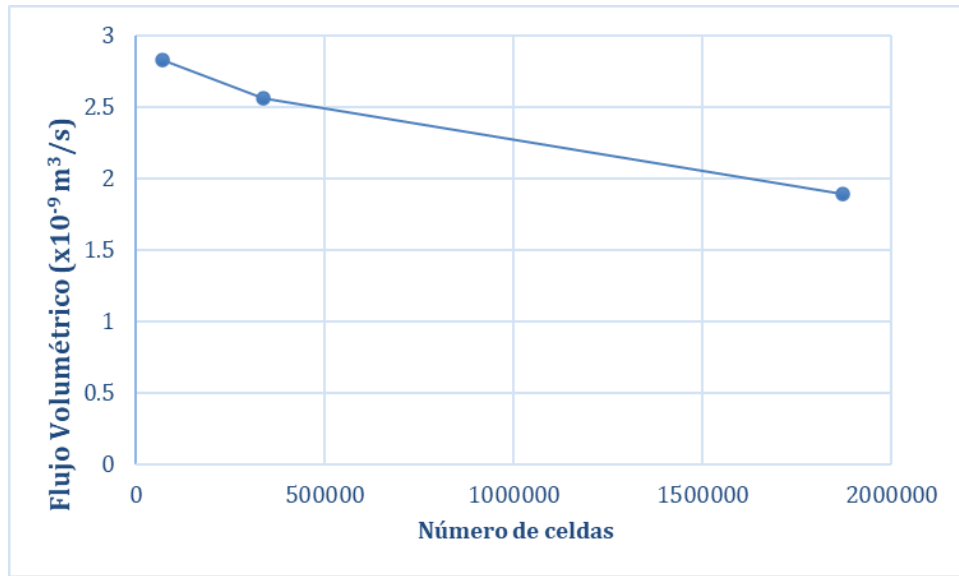


Fig. 5.2.2.1b Análisis de sensibilidad de malla.

Tabla 5.2 Análisis de sensibilidad de malla, relación de celdas con Flujo Volumétrico.

Número de celdas	Flujo Volumétrico (x10-9 m3/s)
70695	2.83
335939	2.56
1868694	1.89

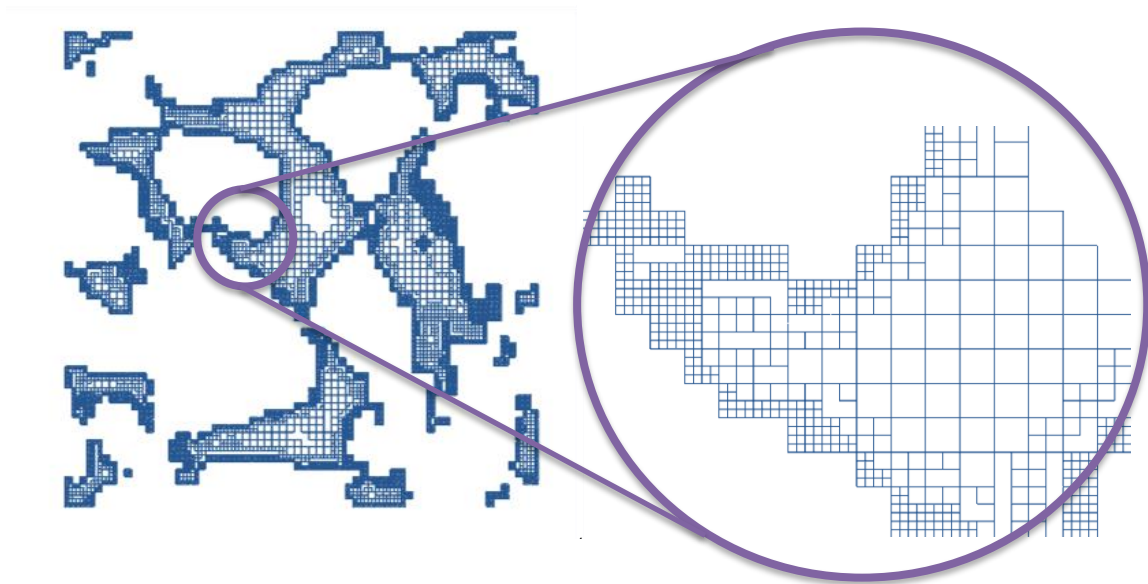


Fig. 5.2.2.1c Ejemplo de refinamiento de malla cerca de las fronteras.

Declaración del tipo de zonas continuas

El tipo de zonas continuas se refiere a si se tiene un sólido o un fluido en las diferentes caras (caso bidimensional) o en los diferentes volúmenes (caso tridimensional) de los que se encuentra constituido un modelo en particular.

En el presente modelo se consideró solo el tipo de zona continua referente al fluido, es decir, el agua que fluye a través de la roca sedimentaria.

Declaración de las condiciones de frontera

Los tipos de fronteras que se pueden definir son las siguientes:

- Flujo de entrada y salida.
- Presión de entrada.
- Velocidad de entrada.
- Flujo másico de entrada.
- Pared.
- Presión de salida.
- Respiradero de entrada (Inlet Vent).
- Flujo de salida.
- Campo de presión alejado.
- Respiradero de salida (Outlet Vent).
- Simetría.

Estas condiciones de frontera deben ser seleccionadas de acuerdo con el problema que se está analizando. El modelo desarrollado en este trabajo presenta tres tipos de condiciones de frontera Fig. 5.2.2.1d: Condición de no deslizamiento (amarillo y gris), presión estática de salida (rojo) y presión total de entrada (azul).

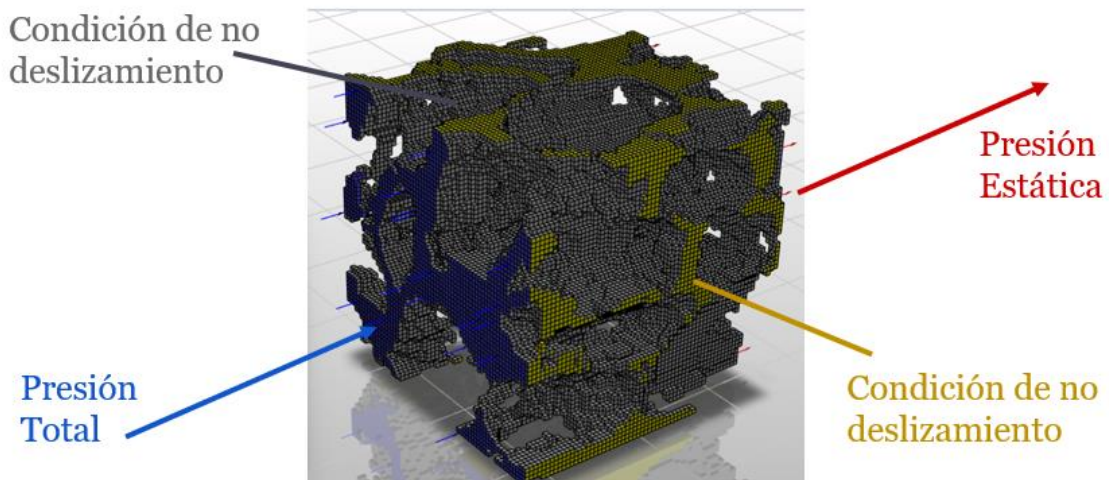


Fig. 5.2.2.1d Fronteras en el modelo.

5.2.2.2 Etapa de proceso

La ejecución de la segunda etapa se realizó con el software Fluent. Con este programa se resolvió cada caso. En los párrafos siguientes se da una breve descripción de lo realizado en la etapa de proceso.

Iniciación del software

Una vez que se tiene planteado el dominio computacional con sus condiciones de frontera pertinentes, entonces es posible comenzar a trabajar con Fluent. En el momento de iniciar Fluent se debe seleccionar alguna de las siguientes cuatro opciones:

- 2d
- 2ddp
- 3d
- 3ddp

2d y 3d significan si el caso a resolver es bidimensional o tridimensional. Las siglas dp se refieren a una precisión doble, su ausencia se refiere a una precisión simple. Esto es un parámetro muy importante para seleccionar debido a que se refiere al número de decimales a utilizar en cada valor numérico de las soluciones y residuales. En la solución de todos los casos planteados se eligió una solución tridimensional con precisión doble (3ddp).

Lectura del modelo

Fluent puede leer diferentes tipos de malla, en el caso planteado, se leyó una malla creada en Gambit.

Cuando se ha leído la malla deseada, Fluent despliega la información acerca del modelo leído. Uno de los datos de interés que se arroja, es el número de nodos y tipo de celdas. Para el presente estudio se tenían inicialmente 70 695 celdas cúbicas.

Revisión del mallado

Habiendo leído la malla, es decir, una vez que se ha importado el modelo a Fluent, es necesario revisar que en el modelo no existan superficies negativas (en el caso bidimensional) o volúmenes negativos (en el caso tridimensional). Al hacer esta revisión se está verificando que no existan discontinuidades en el modelo. El tener discontinuidades es uno de los errores más comunes cuando se trabaja con geometrías orgánicas complejas, en caso de que se presente este problema, es necesario reconstruir la malla.

Escala del modelo

Con la finalidad de obtener las coordenadas de cada vóxel las imágenes fueron procesadas (empleando algunas de las herramientas que tiene MATLAB 7.8.0.347 R2009a) para hacerlas binarias, es decir, blanco y negro, Fig. 4.7.15. Luego se obtiene un contorno que también es binario, la matriz que lo representa contiene 0's y 1's y sirve para obtener las coordenadas X y Y de cada píxel; esto se realiza con el código del Anexo 2.

Una vez que tenemos las coordenadas visualizadas con 0's y 1's se extraen en una hoja de cálculo para representar visualmente y realizar un conteo del tamaño de pixeles de diámetro que tiene la tomografía computarizada Fig. 5.2.2.2a, donde en la Fig. 5.2.2.2b podemos claramente observar el 1 y 0 en cada columna y fila donde 1 es la parte sólida de la roca y 0 es el espacio por el cual atraviesa el flujo, para finalizar por medio del cálculo obtuvimos la Tabla 5.2.2.2.

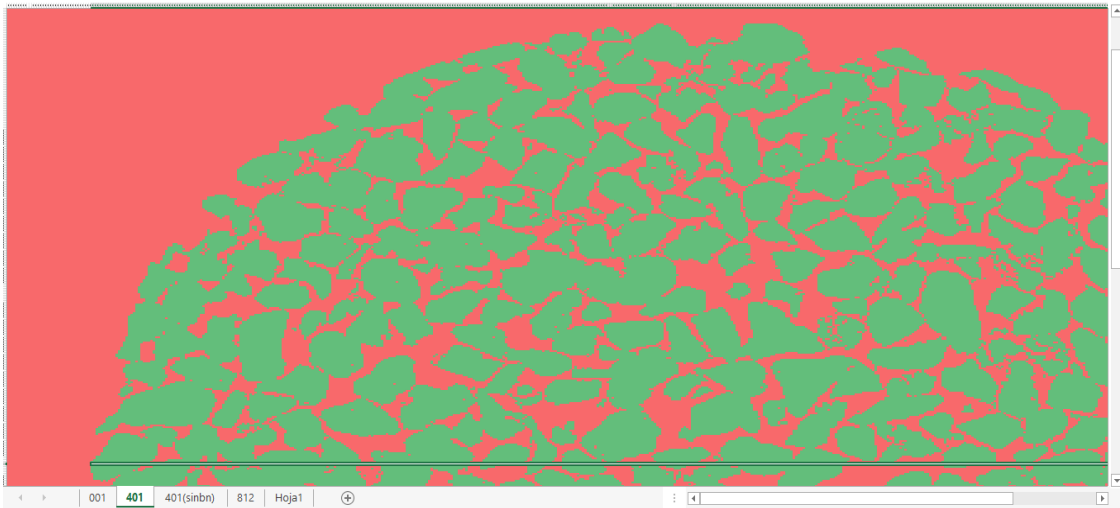


Figura 4.2.2.2a Coordenadas extraídas en una hoja de cálculo.

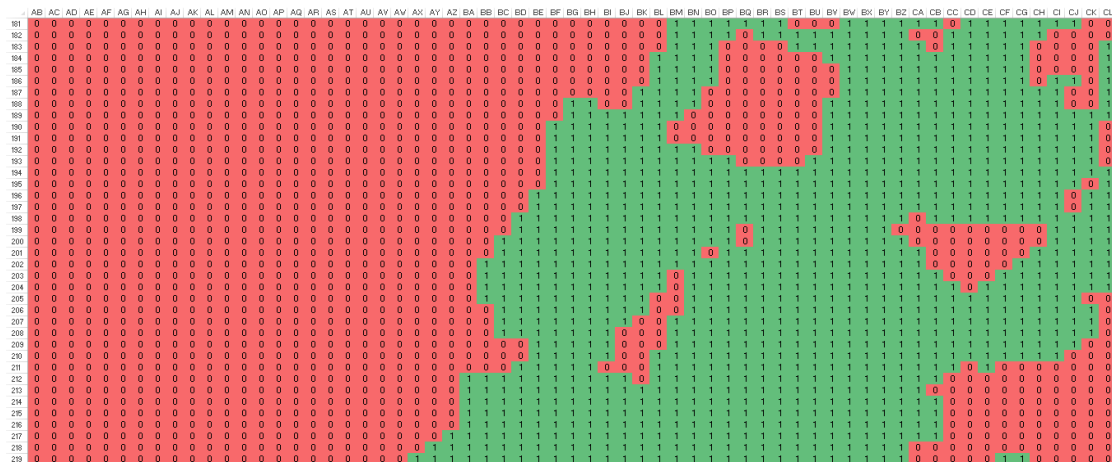





Figura 5.2.2.2b Coordenadas (visualización más cercana) extraídas en una hoja de cálculo.

Tabla 5.2.2 Tabla de cálculo de medida del diámetro de la roca por vóxel.

D(mm)	Vóxel (promedio)
4	489.5
0.008171604	1

El solucionador (solver)

Las formulaciones posibles para el solver desarrollan resultados precisos para un amplio rango de flujos, pero en algunos casos una formulación puede efectuarse más rápido que otra. Es por eso por lo que se debe tener en cuenta la siguiente información para poder seleccionar un tipo de formulación. Fluent cuenta con tres formulaciones diferentes para la solución:

-  Solver Segregado (Segregated Solver): resuelve las ecuaciones de continuidad, momentum y energía en forma secuencial, es decir, separándolas entre sí.
-  Solver Acoplado en Modo Implícito (Implicit Coupled Solver): resuelve las ecuaciones de continuidad, momentum y energía en forma simultánea.
-  Solver Acoplado en Modo Explícito (Explicit Coupled Solver): resuelve las ecuaciones de continuidad, momentum y energía en forma simultánea.

Las maneras implícita y explícita del planteamiento acoplado difieren en la forma en que éstas linealizan las ecuaciones.

En el modelo que se ha estudiado la formulación del solver quedó definida como segregada con el esquema PISO y en estado estacionario.

Ecuaciones básicas

De forma automática Fluent activa las ecuaciones de momentum y de continuidad, para el caso de estudio es necesario activar el modelo de turbulencia k-ε realizable con funciones de pared de no equilibrio y corrección de curvatura.

Materiales

Uno de los pasos más importantes es la definición de las propiedades térmicas de los materiales que se están utilizando en el modelo. Como fluido de trabajo se seleccionó aire con propiedades constantes ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.001 \text{ kg/ms}$). Además, se estableció una presión de operación de 101.325 kPa.

Condiciones de frontera

Algunos de los valores más importantes para las condiciones de frontera que se presentaron en la Fig. 5.2.2.1 d fueron:

- Presión total de entrada (pressure inlet), se dieron los siguientes valores para la presión: 3 000, 10 000, 20 000, 30 000, 40 000, 50 000, 100 000, 200 000, 300 000, 400 000, 500 000 Pa.
- Condición de no deslizamiento (wall), pared lisa sin rugosidad.
- Presión estática de salida (pressure outlet), se dio el valor de 0 Pa.

Controles de solución

Se eligió el esquema de tercer orden para la discretización de las ecuaciones de momentum, energía cinética turbulenta y la razón de disipación viscosa, para la presión se utilizó el esquema PRESTO. Además, se seleccionó el esquema PISO para acoplar la velocidad y la presión.

Criterio de convergencia

El criterio de convergencia para los residuales de la velocidad en X, Y y Z fue 1×10^{-5} , para los residuales de k y ϵ fue 1×10^{-5} .

Definición de los controles de la solución

A los factores de relajación se les asignó los siguientes valores para los cuales no se excedió el 20% de cambio recomendado.

- Presión: 0.27
- Densidad: 0.8
- Fuerzas de cuerpo: 0.8
- Momentum: 0.56

-
- Energía cinética turbulenta: 0.64
 - Razón de disipación turbulenta: 0.64
 - Viscosidad turbulenta: 0.8

Obtención de la solución

Por último, es posible definir un número de iteraciones en el cual se espera que sea resuelto el caso. Si no se llega a una solución se sigue iterando. En ocasiones es bueno ver cómo se comportan los residuales en una gráfica, en caso de que no se vea que siguen una tendencia decreciente se sugiere cambiar los factores de relajación. Las soluciones rondaban las 200 iteraciones.

5.2.2.3 Post-proceso

Una vez obtenida la solución es posible obtener gráficos y valores numéricos en el modelo.

El presente capítulo es una buena base para lectores que pudieran estar interesados en aprender un poco sobre el programa y cómo simular la permeabilidad de una roca en Ansys Fluent.

Todos los pasos que se describen en este capítulo son muy importantes para la correcta elaboración y solución del modelo. Los resultados obtenidos para las diferentes presiones planeadas se presentan en el Capítulo 6.

Capítulo 6

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones relativas a la permeabilidad en rocas sedimentarias.

Se muestran los campos de velocidad, representados con vectores y con planos coloreados por su magnitud. También datos referentes a la generación de entropía.

6.1 Validación de las simulaciones

Para realizar la validación de las simulaciones se emplea la ley de Darcy que ayuda a determinar la capacidad que tiene un líquido para fluir a través de algún medio poroso. Dicha ley está dada por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{Q_v \mu L}{A_c \Delta P} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Donde k es la permeabilidad absoluta, Q_v es el flujo volumétrico, μ es la viscosidad dinámica, L es la longitud entre la entrada y la salida, A_c es el área característica de la sección transversal de la muestra y ΔP es la caída de presión entre la entrada y la salida.

Sobre sus unidades, un medio que tiene una permeabilidad de 1 Darcy permite un flujo de 1 cm³/s de un líquido con una viscosidad de 1 cP bajo un gradiente de presión de 1 atm/cm que actúa sobre un área de 1 cm².

Básicamente, la validación de este estudio numérico consistió en comparar el resultado de la permeabilidad calculada con una malla cartesiana no estructurada contra la permeabilidad obtenida con por tres métodos distintos y reportados por De Boever (2016) [17]. Cabe destacar que la comparación se realizó tomando en cuenta las mismas condiciones físicas para una roca Belgian Fielstone.

Siendo el fluido de trabajo el agua, la condición impuesta fue una diferencia de presión 3 000 Pa (presión de entrada de 3 000 Pa y la presión de salida de 0 Pa) y se verificó el caudal, que tuvo un valor de 1.89x10⁻⁹ m³/s. Con estos valores, además de las propiedades reportadas en la siguiente tabla, se obtuvo una permeabilidad de 3870 mD.

Tabla 6.1. Propiedades de la Roca sedimentaria para en la simulación.

Flujo Volumétrico (m ³ /s, cm ³ /s):	1.89E-09	0.00189	
μ (Pa s, cp)	0.001	1	
L (m, cm)	0.0004903	0.0490297	
Δp (Pa, atm)	3000	0.0296077	
k (m ² , D, mD)	3.82E-12	3.8699785	3869.978

De Boever (2016) emplearon tres métodos para determinar la permeabilidad de la roca Belgian Fieldstone, estos fueron: un método experimental (TinyPerm), un método numérico (Lattice-Boltzmann) y un modelo de redes de poros (PNM). Para estos tres métodos la permeabilidad tuvo valores de 589, 90.1 y 190 mD.

Se observó una discrepancia entre los cuatro métodos, misma que se atribuye a que en este trabajo se escogió una zona de prueba con poros suficientemente grandes como permitir un mayor caudal.

Por lo tanto, el esquema numérico puede considerarse validado con base en el orden de magnitud de la permeabilidad y los exponentes de las curvas alométricas que se presentan en la sección 6.2.2.

6.2. Comportamiento del flujo de fluidos en medios porosos

Con la intención de explicar el fenómeno físico del flujo incompresible a través de un medio poroso se recurre a la ley de la conservación de la masa. Lo primero que se cumple es que en las regiones donde el poro es más abierto la velocidad del flujo disminuye. Por otro lado, cuando el flujo encuentra un obstáculo comienza este a recircular, estancarse o seguir un camino de menor restricción o resistencia. Adicionalmente, se puede dar la situación en la que los flujos se encuentren y choquen después de haber seguido trayectorias distintas generando bloqueo por la contraposición de flujos, similar al fenómeno que se observa en la válvula de Tesla.

En lo que respecta a la primera ley de la termodinámica, en las regiones donde la velocidad del flujo disminuye (debido a estancamiento, recirculación o bloqueo por contraposición) la presión aumenta para que se conserve la energía. Así pues, los remolinos y el bloqueo por la contraposición de flujos causan una pérdida de carga superior a la observada en tuberías rectas.

Referente a la segunda ley de la termodinámica aplicada a sistemas isotérmicos, se tiene la generación de entropía para ahondar en el conocimiento de la permeabilidad en rocas sedimentarias. A grandes rasgos, dicha variable involucra el cambio de la velocidad con respecto a la posición, y considerando que el flujo presenta

marcadas zonas de recirculación, estancamiento y contraposición de corrientes, es de esperarse valores altos de generación de entropía.

6.2.1 Campos de velocidad

Los campos de velocidad en un medio poroso describen cómo se mueve un fluido a través de la estructura del material poroso. En estos medios, el fluido no fluye de manera uniforme, sino que su velocidad varía dependiendo de factores como la porosidad, la permeabilidad y la distribución espacial de los poros. La Velocidad del fluido en un medio poroso se define como la razón entre el caudal y la sección transversal del flujo.

La figura 6.2.1.1 extraída de la simulación de CFD en Ansys nos muestra el campo de velocidades, así como una visualización de algunos perfiles de velocidad, gracias estos perfiles se pueden identificar las zonas de recirculación las cuales abundan en medios porosos, zonas de estancamiento o bloqueo por contraposición.

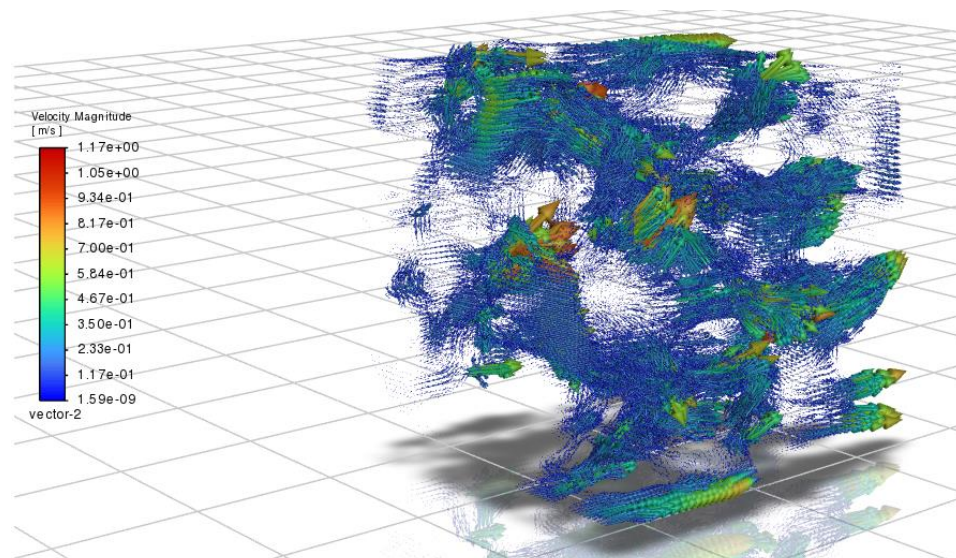


Fig. 6.2.1.1 Campos de velocidad.

En la Fig 6.2.1.2 se observa la distribución de presión transversal del medio poroso. Esta variación de presión ocurre debido a la resistencia que el medio impone al movimiento del fluido, así como por efectos de complejidad de la geometría del material.

Si un medio es anisotrópico o tiene variaciones en porosidad y permeabilidad, pueden surgir gradientes transversales de presión, afectando la distribución del fluido y generando zonas de mayor o menor velocidad.

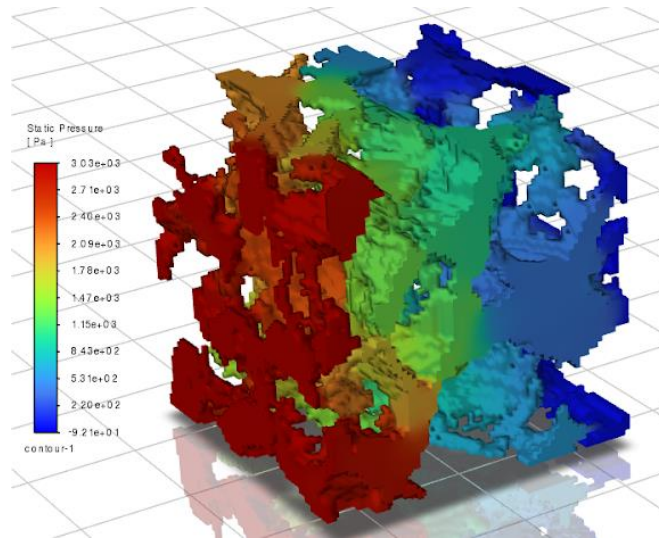


Fig. 6.2.1.2 Distribución de la presión en la simulación de la roca sedimentaria.

En la tabla 6.2.1.1 se incluyeron los datos que obtuvieron de la simulación con las presiones promedio en cada plano, así como en las paredes de entrada y salida, en la gráfica se visualiza una representación más clara y se observa un comportamiento no lineal en la caída de presión.

La caída de presión es una característica fundamental en los flujos internos, es decir, aquellos que ocurren dentro de conductos cerrados como lo es un medio poroso. Se origina debido a la resistencia impuesta por la fricción con las paredes del conducto, viscosidad del fluido, y geometría del medio, lo que genera una disipación de energía en forma de pérdida de presión a medida que el fluido avanza.

Tabla 6.2.1.1. Tabla de presiones promedio en los planos en la simulación de 3 000 Pa.

Planos	Presión Promedio (Pa)
Inlet 3195	3000
Plano 10	2603.3
Plano 9	2134.8
Plano 8	1833
Plano 7	1415.4
Plano 6	1240.6
Plano 5	1011
Plano 4	895.6
Plano 3	648
Plano 2	461.8
Plano 1	297.5
Outlet 2595	0

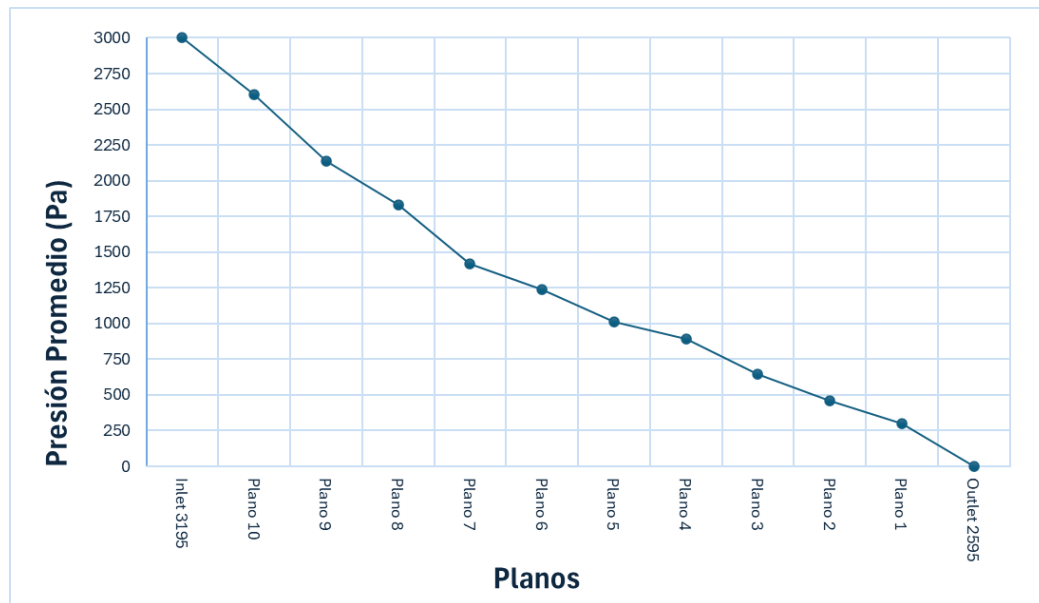


Fig. 6.2.1.3 Gráfica de las presiones promedio en los diferentes planos en la simulación de 3 000 Pa.

6.2.2 Comportamiento de la caída de presión en función del flujo másico

Para contextualizar, el flujo másico es la cantidad de masa de fluido que atraviesa un área determinada por unidad de tiempo. La relación que existe con la caída de presión es que esta aumenta conforme se incrementa el flujo másico.

La tabla 6.2.2.1 contiene los valores de flujo másico obtenidos mediante la simulación de Ansys correspondientes a cada una de las 11 presiones que se tomaron en cuenta para el estudio. Se representa el flujo másico frente a la caída de presión a través del medio en rangos de 3 000 Pa hasta 500 000 Pa en la gráfica de la figura 6.2.2.1, como también se observa el coeficiente de curvatura alométrica el cual tiene un valor de 0.7068. Por su parte, la gráfica de la figura 5.2.2.2 nos muestra la relación de presión de entrada contra flujo másico del artículo que estamos comparando del autor Liu et al. (2022) [2].

Tabla 6.2.2.1 Tabla de relación de presión de entrada contra flujo másico.

Presión de entrada (kPa)	Flujo Másico ($\times 10^5$ kg/s)
3	0.239018026
10	0.618233375
20	1.045490329
30	1.409805538
40	1.735092062
50	2.034856631

100	3.289623867
200	5.199662734
300	6.734226855
400	8.055872168
500	9.234199091

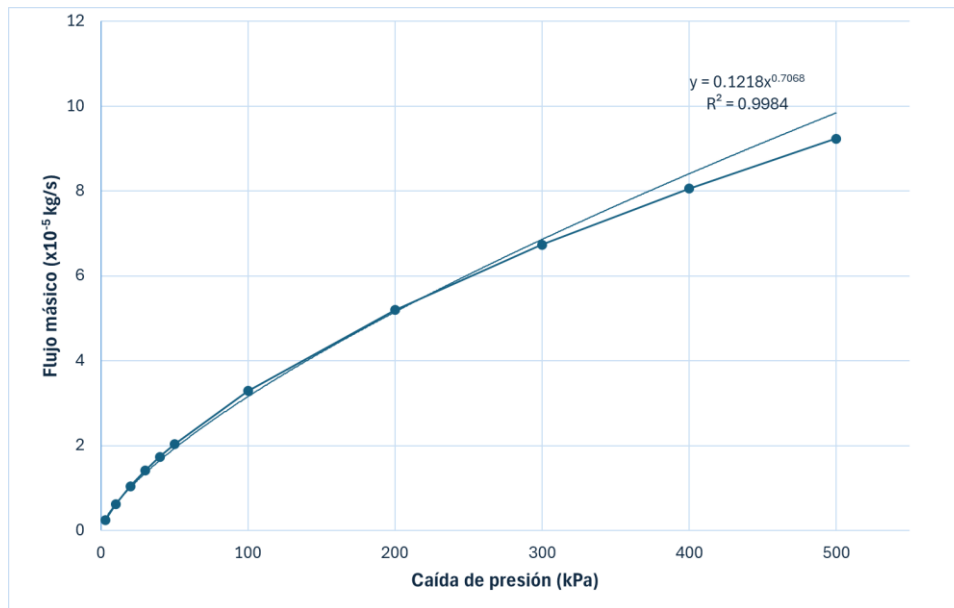


Figura 6.2.2.1 Gráfica de relación de presión de entrada contra flujo másico.

Tabla 6.2.2.2 Tabla de relación de presión de entrada contra flujo másico Liu et al. (2022).

Presión de entrada (kPa)	Flujo Másico ($\times 10^{-5}$ kg/s)
10	3.19
20	5.24
30	6.88
40	8.3
50	9.58
100	14.72
200	22.27
300	28.23
400	33.32
500	37.83

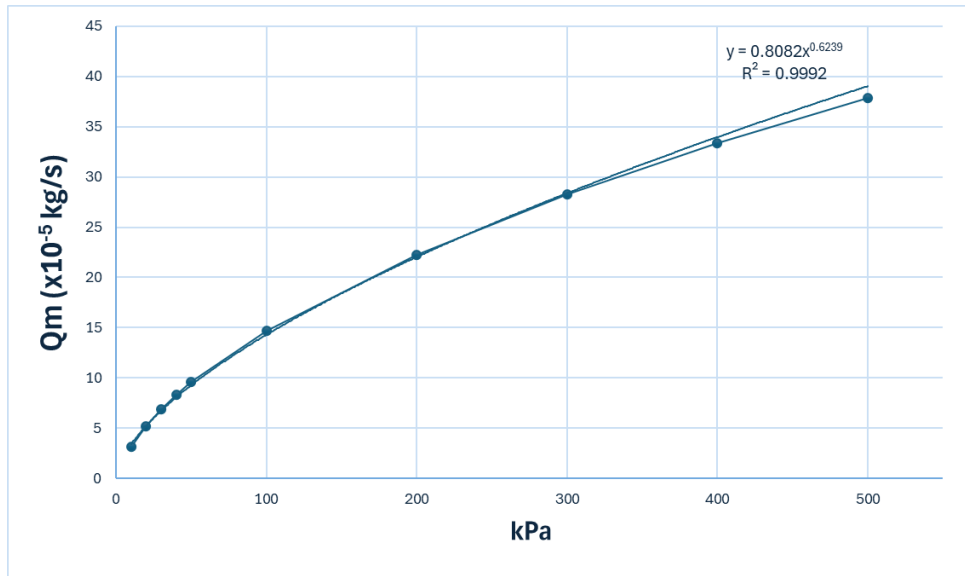


Figura 6.2.2.2 Gráfica de relación de presión de entrada contra flujo másico Liu et al. (2022).

6.2.3 Campo de velocidad seccional

Para una mejor representación del comportamiento del flujo de fluido a través del medio a escala de poros, en este caso agua, se seccionaron una cantidad de 10 planos intermedios al plano de entrada y salida de la presión de la roca sedimentaria con una separación de 0.0445 mm los cuales se encuentran en el eje x.

Las figuras 6.2.3.2 hasta la 6.2.3.13 representan el campo de velocidad en los espacios porosos en la sección transversal en X = 2.12054 mm (entrada), 2.16511 mm, 2.20968 mm, 2.25426 mm, 2.29883 mm, 2.34340 mm, 2.38798 mm, 2.43255 mm, 2.47712 mm, 2.52169 mm, 2.56627 mm, 2.61083 mm (salida) en el caso de la simulación de la caída de presión de 3 000 Pa. Este caso se repitió para la caída de presión de 20 000 Pa y 500 000 Pa respectivamente.

X= 2.12054

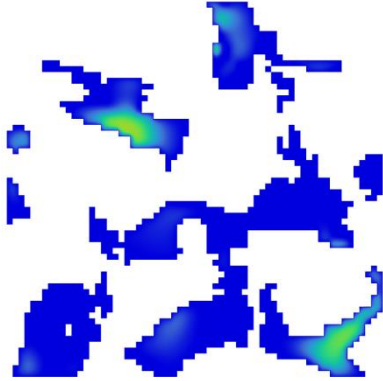


Fig. 6.2.3.2 Presión de 3000 Pa pared de entrada.

X= 2.16511

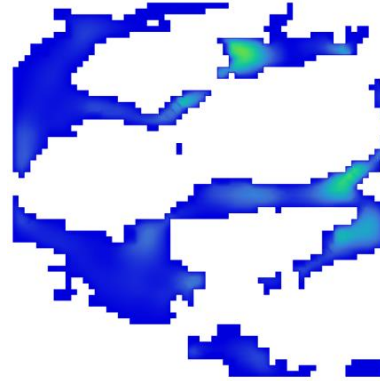


Fig. 6.2.3.3 Presión de 3000 Pa en el primer plano después de la pared de entrada.

X= 2.20968

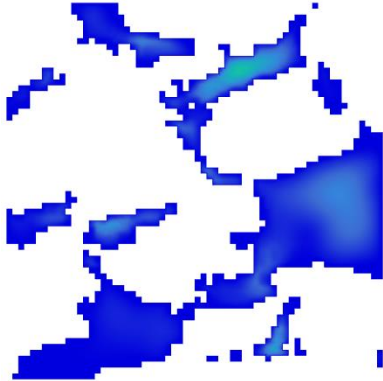


Fig. 6.2.3.4 Presión de 3000 Pa en el 2do. plano después de la pared de entrada.

X= 2.25425

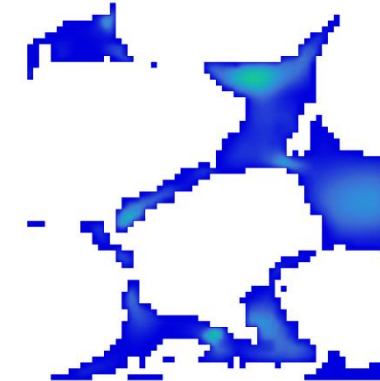


Fig. 6.2.3.5 Presión de 3000 Pa en el 3er. plano después de la pared de entrada.

X= 2.29883

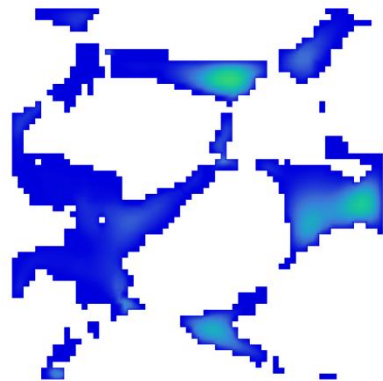


Fig. 6.2.3.6 Presión de 3000 Pa en el 4to. plano después de la pared de entrada.

X= 2.34340

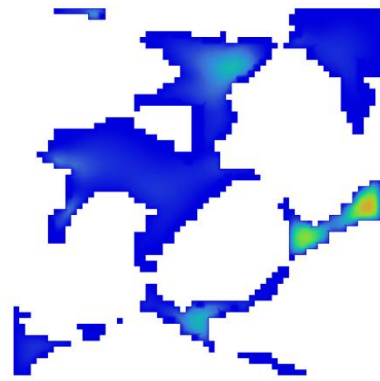


Fig. 6.2.3.7 Presión de 3000 Pa en el 5to. plano después de la pared de entrada.

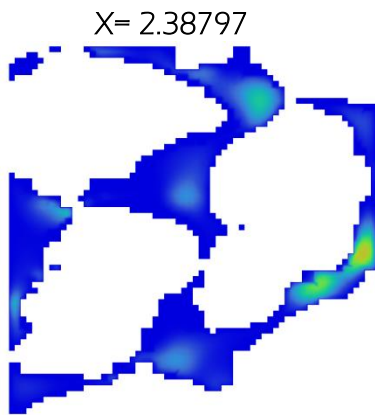


Fig. 6.2.3.8 Presión de 3000 Pa en el 6to. plano después de la pared de entrada.

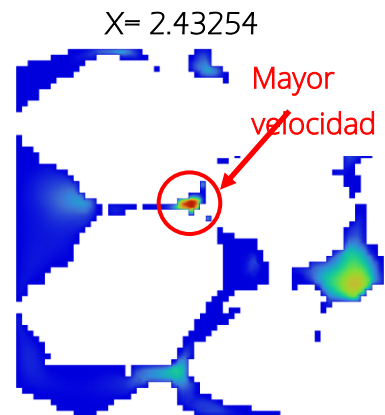


Fig. 6.2.3.9 Presión de 3000 Pa en el 7mo. plano después de la pared de entrada.

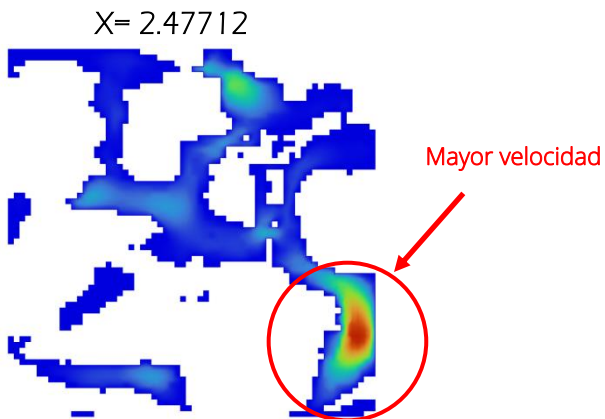


Fig. 6.2.3.10 Presión de 3000 Pa en el 8to. plano después de la pared de entrada.

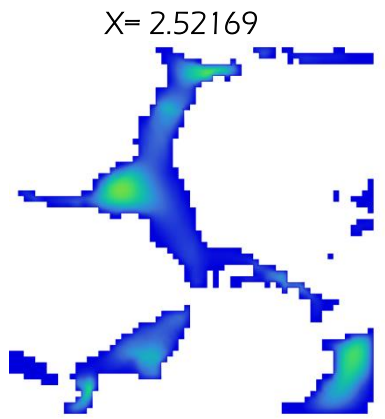


Fig. 6.2.3.11 Presión de 3000 Pa en el 9mo. plano después de la pared de entrada.

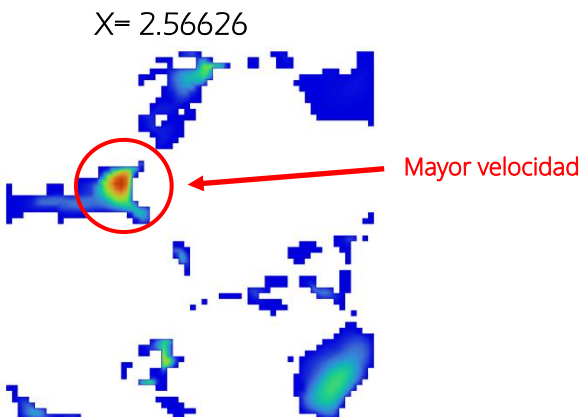


Fig. 6.2.3.12 Presión de 3000 Pa en el 10mo. plano después de la pared de entrada.

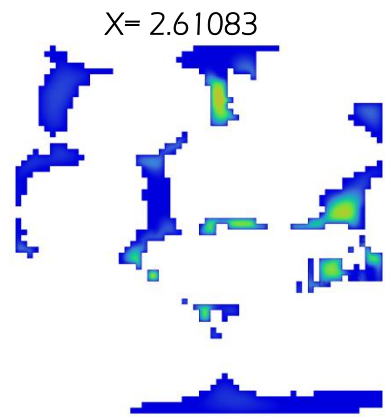


Fig. 6.2.3.13 Presión de 3000 Pa en el plano de salida.

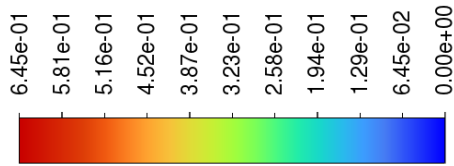


Fig. 6.2.3.14 Magnitud de velocidad (m/s) para 3 000Pa.

X= 2.12054

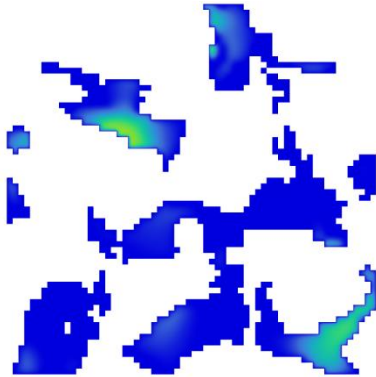


Fig. 6.2.3.15 Presión de 20000 Pa pared de entrada.

X= 2.20968

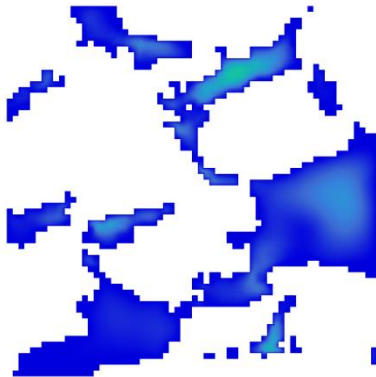


Fig. 6.2.3.17 Presión de 20000 Pa en el 2do. plano después de la pared de entrada.

X= 2.29883

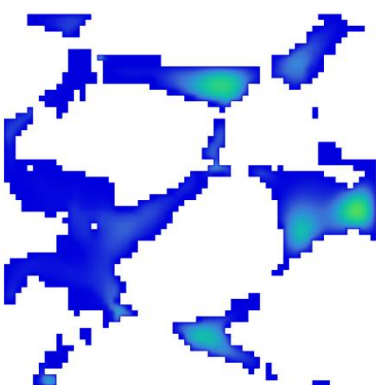


Fig. 6.2.3.19 Presión de 20000 Pa en el 4to. plano después de la pared de entrada.

X= 2.16511

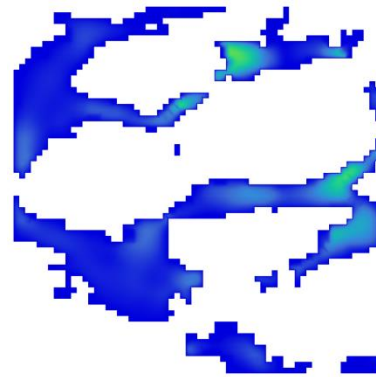


Fig. 6.2.3.16 Presión de 20000 Pa en el primer plano después de la pared de entrada.

X= 2.25425



Fig. 6.2.3.18 Presión de 20000 Pa en el 3er. plano después de la pared de entrada.

X= 2.34340

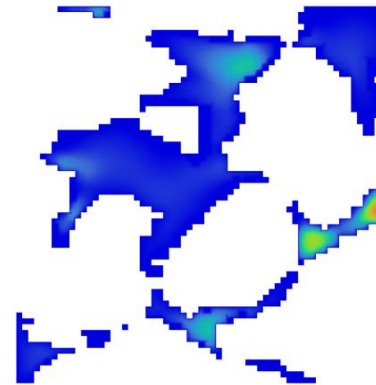


Fig. 6.2.3.20 Presión de 20000 Pa en el 5to. plano después de la pared de entrada.

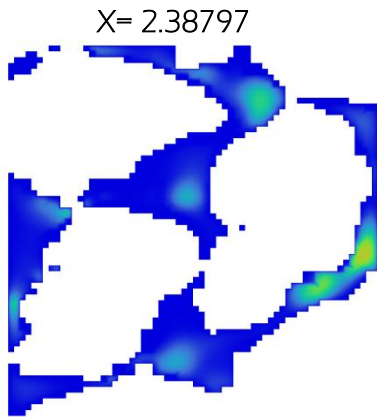


Fig. 6.2.3.21 Presión de 20000 Pa en el 6to. plano después de la pared de entrada.

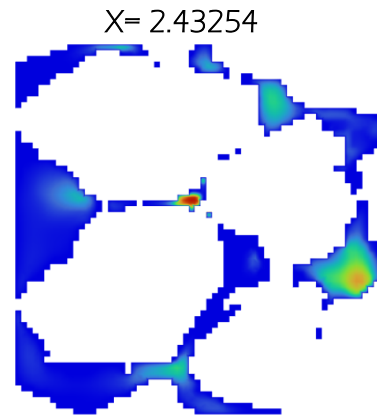


Fig. 6.2.3.22 Presión de 20000 Pa en el 7mo. plano después de la pared de entrada.

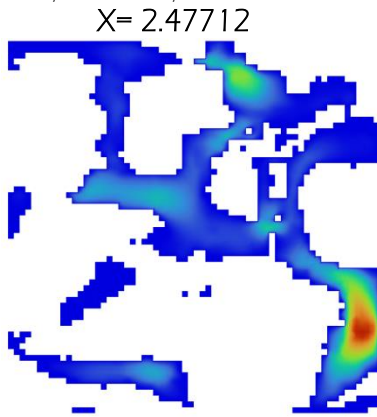


Fig. 6.2.3.23 Presión de 20000 Pa en el 8to. plano después de la pared de entrada.

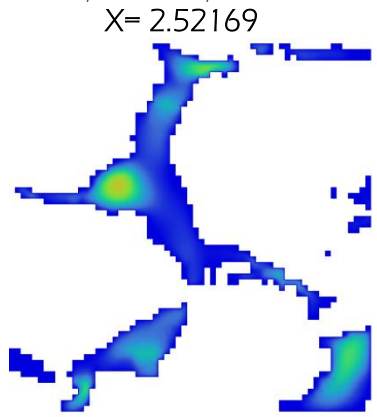


Fig. 6.2.3.24 Presión de 20000 Pa en el 9mo. plano después de la pared de entrada.

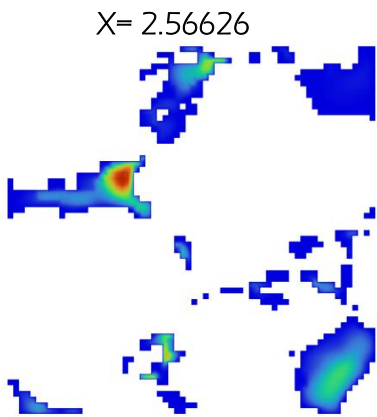


Fig. 6.2.3.25 Presión de 20000 Pa en el 10mo. plano después de la pared de entrada.

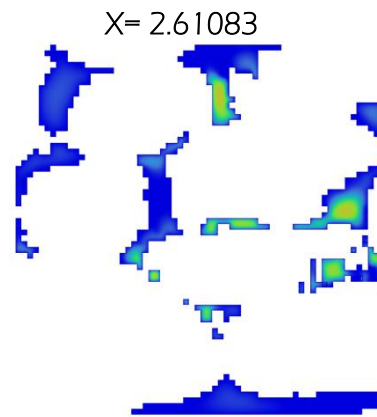


Fig. 6.2.3.26 Presión de 20000 Pa en el plano de salida.

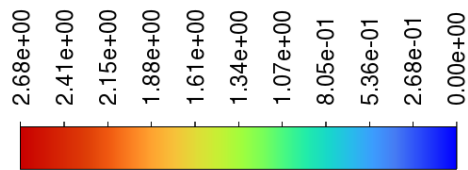


Fig. 6.2.3.27 Magnitud de velocidad (m/s) para 20 000Pa.

X= 2.12054

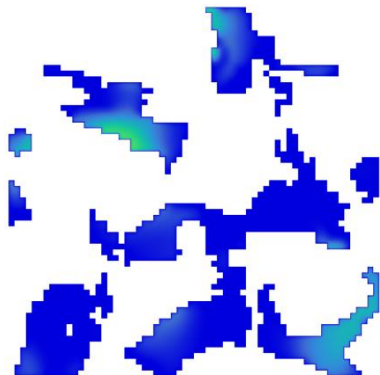


Fig. 6.2.3.28 Presión de 500000 Pa pared de entrada.

X= 2.16511

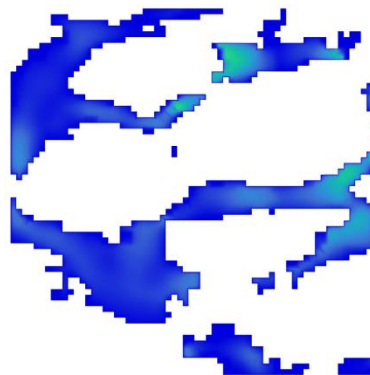


Fig. 6.2.3.29 Presión de 500000 Pa en el primer plano después de la pared de entrada.

X= 2.20968

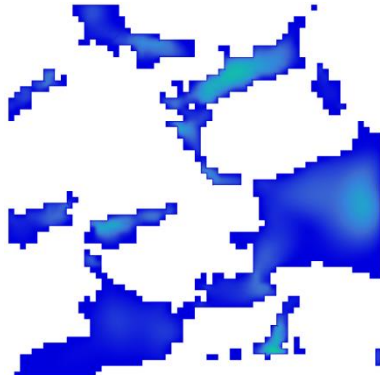


Fig. 6.2.3.30 Presión de 500000 Pa en el 2do. plano después de la pared de entrada.

X= 2.25425

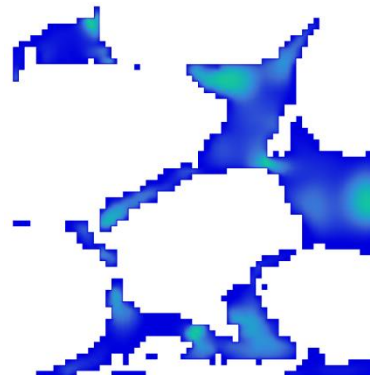


Fig. 6.2.3.31 Presión de 500000 Pa en el 3er. plano después de la pared de entrada.

X= 2.29883

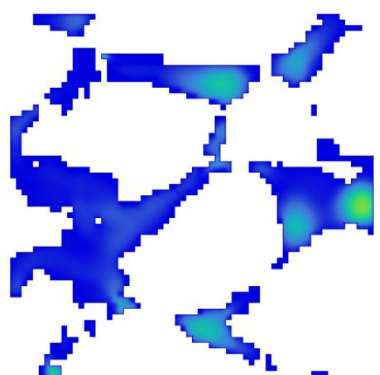


Fig. 6.2.3.32 Presión de 500000 Pa en el 4to. plano después de la pared de entrada.

X= 2.34340

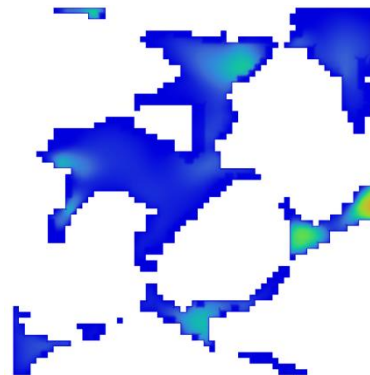


Fig. 6.2.3.33 Presión de 500000 Pa en el 5to. plano después de la pared de entrada.

X= 2.38797

X= 2.43254

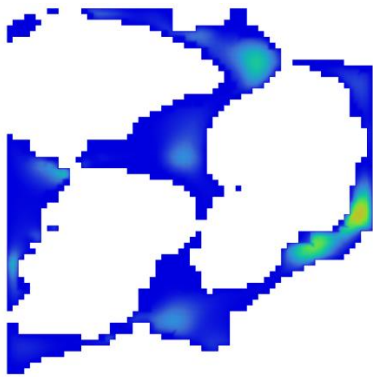


Fig. 6.2.3.34 Presión de 500000 Pa en el 6to. plano después de la pared de entrada.

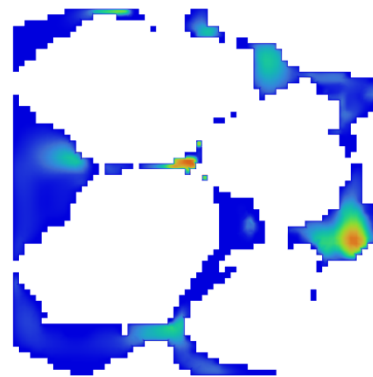


Fig. 6.2.3.35 Presión de 500000 Pa en el 7mo. plano después de la pared de entrada.

X= 2.47712

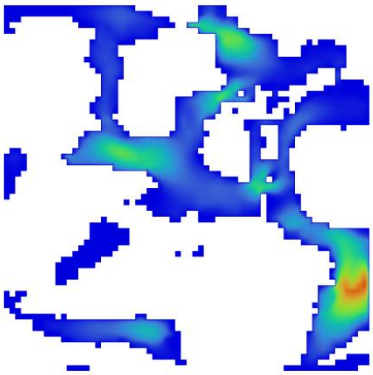


Fig. 6.2.3.36 Presión de 500000 Pa en el 8to. plano después de la pared de entrada.

X= 2.52169

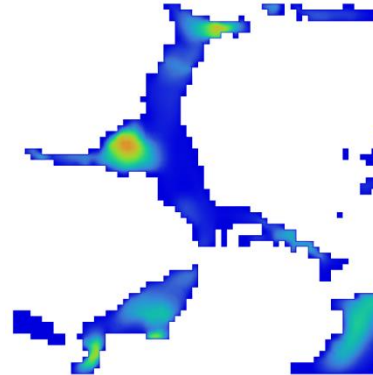


Fig. 6.2.3.37 Presión de 500000 Pa en el 9mo. plano después de la pared de entrada.

X= 2.56626

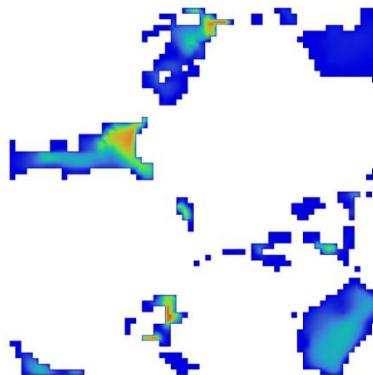


Fig. 6.2.3.38 Presión de 500000 Pa en el 10mo. plano después de la pared de entrada.

X= 2.61083

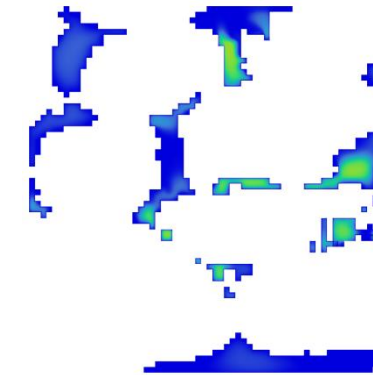


Fig. 6.2.3.39 Presión de 500000 Pa en el plano de salida.

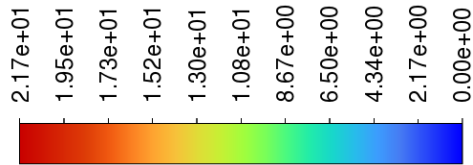


Fig. 6.2.3.40 Magnitud de velocidad (m/s) para 500 000Pa.

Al observar las figuras 6.2.3.9, 6.2.3.10 y 6.2.3.12 correspondientes a los planos 7, 8 y 10 donde la presión de entrada es de 3 000 Pa, es notable una mayor magnitud de velocidad del fluido en las regiones representadas de color rojo, esta velocidad logra alcanzar hasta 0.645 m/s aproximadamente. Obteniendo los mismos planos (7, 8 y 10) para la presión de 20 000 Pa la mayor magnitud de velocidad tiene un valor de 2.68 m/s y de 21.7 m/s para la presión de 500 000 Pa.

Por lo anterior, se deduce que es cercano a la entrada donde la velocidad del fluido comienza a aumentar considerablemente.

6.3 Rapidez de la generación de entropía total volumétrico

Retomando lo antes mencionado en la sección 6.2 donde hablábamos sobre la segunda ley de la termodinámica en esta sección se habla sobre los datos obtenidos en la simulación, y como calculamos la rapidez de la generación de entropía extrayendo las derivadas en Ansys y utilizando como herramienta MATLAB para agilizar el proceso de obtención de resultados.

Para los casos isotérmicos e incompresibles analizados aquí, la única contribución a la generación de entropía proviene de la disipación viscosa.

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad \text{Eq. 6.3a}$$

$$\dot{S}_{gen}''' = \frac{\mu}{T} \Phi \quad \text{Eq. 6.3b}$$

La obtención de las derivadas de la velocidad respecto a la posición se obtuvo de manera local, es decir, para cada elemento de la malla. Posteriormente se promediaron para todo el volumen y finalmente se cuantificó la rapidez de generación de entropía, para lo cual se usó el siguiente código de MATLAB:

```
A=csvread('DRSEP2024Z459STAIRSTEP1000Refinamiento2-010000entropi.csv');
```

```
DUDX=A(:,5);
```

```
DVDX=A(:,6);
```

```

DWDX=A (:, 7) ;
DUDY=A (:, 8) ;
DVDY=A (:, 9) ;
DWDY=A (:, 10) ;
DUDZ=A (:, 11) ;
DVDZ=A (:, 12) ;
DWDZ=A (:, 13) ;

```

%PROMEDIOS

```

MDUDX=mean (DUDX) ;
MDVDX=mean (DVDX) ;
MDWDX=mean (DWDX) ;
MDUDY=mean (DUDY) ;
MDVDY=mean (DVDY) ;
MDWDY=mean (DWDY) ;
MDUDZ=mean (DUDZ) ;
MDVDZ=mean (DVDZ) ;
MDWDZ=mean (DWDZ) ;

```

%ENTROPIA

```

SG=2 * (MDUDX^2) + 2 * (MDVDY^2) + 2 * (MDWDZ^2) + ( (MDVDX+MDUDY) ^2) + (
(MDWDY+MDVDZ) ^2) + ( (MDUDZ+MDVDX) ^2) ;

```

Tabla 6.3.1 Tabla de relación de presión de entrada, función de disipación viscosa y rapidez de generación de entropía.

Presión de entrada (kPa)	Φ ($\times 10^3$) (1/s ²)	S ^{'''} gen (W/m ³ K)
3	6.9443	0.024099601
10	144.21	0.500468506
20	580.13	2.013291688
30	1282.9	4.452195037
40	2218	7.697379837
50	3367	11.68488634
100	11664	40.47891723
200	37430	129.8976228
300	71222	247.1698768
400	110600	383.8278674
500	153450	532.5351379

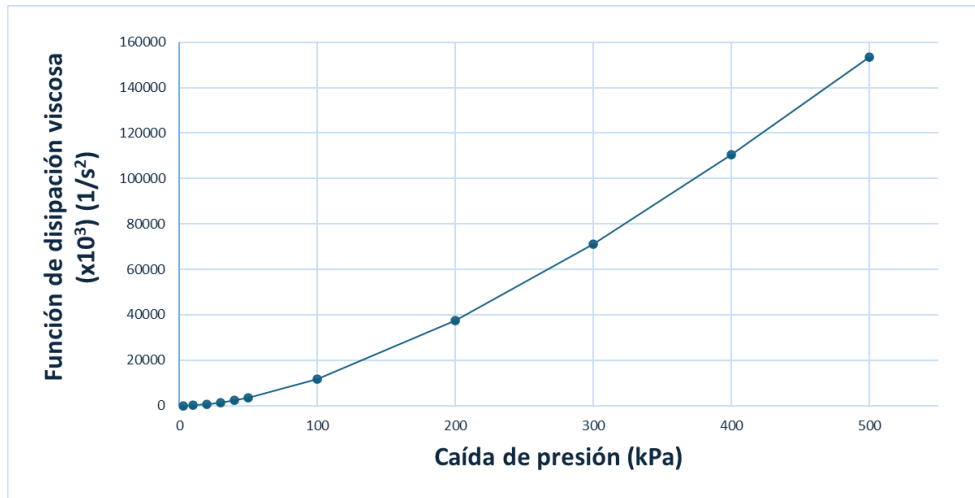


Fig. 6.3.1 Gráfica de relación de presión de entrada contra función de disipación viscosa.

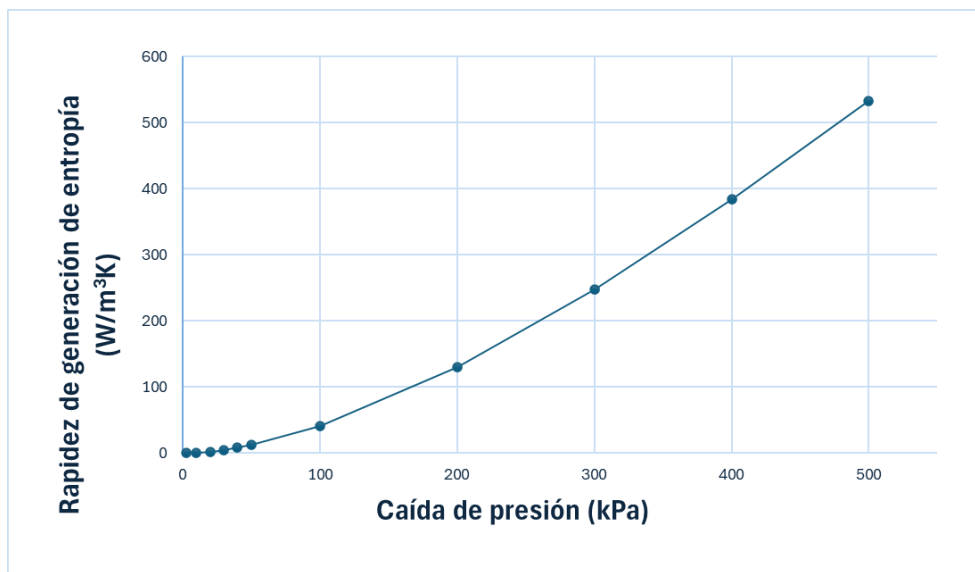


Fig. 6.3.2 Gráfica de relación de presión de entrada contra rapidez de generación de entropía.

Sobre la rapidez de generación de entropía, se buscó en la literatura valores para el flujo interno en bifurcaciones de conductos circulares, se encontraron datos que caen en el orden de 10^{-1} W/K, lo cual es un dato que contrasta fuertemente con la rapidez de generación de entropía en esta roca sedimentaria la cual ronda un orden de magnitud de 10^1 W/K.

Conclusiones

La hipótesis de este trabajo menciona lo siguiente: "La reconstrucción de la roca sedimentaria mediante mallas cartesianas no estructuradas en las que no se aplica un proceso de suavizado geométrico permite obtener una estimación de la permeabilidad en un tiempo significativamente menor, con una desviación mínima respecto a los resultados experimentales.", lo cual se cumple porque se logra realizar la reconstrucción en relativamente poco tiempo (dos semanas). En lo que se respecta a la desviación con respecto a los resultados experimentales, no se pudo obtener con exactitud debido a que la región elegida para este estudio contiene poros más abiertos que el promedio de la roca del estudio.

En el campo de la dinámica de fluidos computacional, la malla es la representación discreta del dominio de estudio. Las mallas cartesianas permiten realizar refinamientos automáticos que dependen de los criterios que el usuario defina. Para este tipo de mallas cada cubo es dividido en ocho sub celdas que a su vez se pueden seguir refinando, incrementando el número de elementos sustancialmente. Pese a esto, las soluciones numéricas en este tipo de mallas convergen muy rápidamente. Gambit es una herramienta utilizada para la generación de geometrías y mallas mediante simulaciones computacionales. El proceso realizado dentro de Gambit incluyó la digitalización de la estructura interna de la roca, la corrección de volumen de la geometría y la definición de los parámetros de malla adecuados para la simulación posterior. La reconstrucción de la roca en el programa tuvo una duración aproximada de dos semanas. Esta etapa del proceso fue importante para garantizar que la representación digital de la roca sea lo más fiel posible a su estructura física real.

La configuración y el tiempo de cómputo toma un tiempo estimado de una semana. Tras obtener la geometría, se seleccionó una región cúbica de la roca que se sometió a un proceso de refinamiento de malla, con duración de alrededor de 2 horas por iteración. Con fines de visualización, la región se secciona en planos. Posteriormente, fueron aplicadas once diferentes presiones para comparar los resultados con los procesos de otros autores. Este análisis se realizó en un equipo de cómputo con las características necesarias que permiten al programa de Ansys ser ejecutado debidamente sin presentar algún riesgo potencial al sistema del equipo por sobrecarga de trabajo.

Los resultados permitieron evaluar parámetros entre los que destacan la permeabilidad, generación de entropía y para estos se obtuvo una curva alométrica por medio de una regresión. En medios porosos, la distribución y el tamaño de los poros influye directamente en la velocidad del flujo y la resistencia que este experimenta.

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir el paso de fluidos a través de su estructura. Al elegir una región de la roca con poros más grandes, se obtuvo una mayor permeabilidad en comparación con otras rocas con poros más pequeños. La relación observada en este estudio confirma que estructuras con poros grandes facilitan un mayor transporte de fluidos.

En sistemas porosos, debido a la interacción del fluido con la estructura del medio se presentan fuertes variaciones espaciales de la velocidad, lo que conduce a una alta tasa de generación de entropía. Esta representa una medida del desorden y la irreversibilidad de los procesos termodinámicos. La generación de entropía en este estudio es superior a la que ocurre en tuberías convencionales. La comprensión de este fenómeno es relevante para la mejora de modelos de transferencia de calor y flujo en medios no convencionales.

Para analizar los datos de las simulaciones, se estudiaron las relaciones de dependencia por medio de métodos de regresión, mismos que permitieron obtener curvas alométricas. El exponente de curva alométrica obtenido para este análisis tiene un valor de 0.7068, mientras que en el artículo de Liu et al. (2022) se reportó un valor de 0.6239. La similitud entre estos valores indica que el presente estudio posee un nivel de precisión comparable al trabajo previo, lo que refuerza su validez dentro del campo de investigación.

La heterogeneidad de los medios porosos hace que los estudios dependan de múltiples muestras para obtener conclusiones más generalizables, es por ello que, para garantizar la congruencia del estudio, sería necesario realizar la reconstrucción de más rocas, lo que permitiría analizar la variabilidad de los resultados y mejorar la precisión del modelo empleado.

Para las rocas extraterrestres, el método desarrollado en esta tesis puede implementarse en microtomografías de rocas lunares. Específicamente, las rocas de la Luna presentan características particulares debido a la ausencia de atmósfera y los impactos de meteoritos que han modificado su estructura con el tiempo. La capacidad de reconstruir digitalmente estas rocas permite estudiar su permeabilidad, resistencia y comportamiento frente a diferentes condiciones, lo que resulta útil en futuras misiones de exploración espacial y procesos de extracción de recursos que se encuentran fuera de nuestro planeta.

En el contexto académico y científico, el registro de propiedad intelectual permite proteger metodologías, diseños experimentales y modelos innovadores desarrollados durante la investigación. El registro de propiedad intelectual garantiza la originalidad del estudio, asegurando que futuras investigaciones y desarrollos basados en estos conceptos respeten los derechos de los autores. Esta tesis ha dado lugar a tres propiedades intelectuales registradas ante INDAUTOR anexadas dentro de la presente, en las cuales se incluyen los códigos generados en MATLAB que facilitaron en gran medida el desarrollo del proceso.

La escritura de una tesis no solo implica la documentación de los resultados de reconstrucción y simulación, sino también la revisión de literatura previa, la formulación de la hipótesis, la interpretación de datos y la estructuración de un documento bien fundamentado. La redacción de la tesis implicó un lapso cercano a un año, lo que refleja la complejidad y profundidad del estudio realizado.

Trabajos Futuros

En la comparación de los resultados que se obtuvieron contra los resultados del artículo de Liu et al. (2022), existe una gran diferencia en la permeabilidad dado que la sección de la roca que se eligió para este proyecto tiene una región de poros más abiertos que la región de Liu, por ende, para poder acercarnos a los resultados de Liu se propone como trabajo futuro seleccionar regiones con poros más cerrados, para esto no solo se selecciona una sola muestra sino una cantidad que se considere adecuada de muestras para un estudio más certero, así como suavizar las geometrías para obtener un promedio más cercano de permeabilidad en la roca sedimentaria que se está estudiando, este trabajo futuro se puede desarrollar en una tesis de posgrado.

Anexos

Anexo 1

Programa de MATLAB para binarización de las proyecciones de la Tomografía Computarizada.

```
clc
clear all

TOMO=imread('Imagenes0400.png');
figure, imshow(TOMO);

PASO01=imadjust(TOMO,[0.1 0.1 0.1; 0.45 0.45 0.45],[,]);
figure, imshow(PASO01);

PASO02=imadjust(PASO01,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO02);

PASO03=imadjust(PASO02,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO03);

PASO04=imadjust(PASO03,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO04);

PASO05=imadjust(PASO04,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO05);

PASO06=imadjust(PASO05,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO06);

PASO07=imadjust(PASO06,[0.1 0.1 0.1; 0.95 0.95 0.95],[,]);
figure, imshow(PASO07);

PASO08=imadjust(PASO07,[0.1 0.1 0.1; 0.85 0.85 0.85],[,]);
figure, imshow(PASO08);

PASO08R=PASO08(:, :, 1);
PASO08G=PASO08(:, :, 2);
PASO08B=PASO08(:, :, 3);

for i=1:571
    for j=1:559
        if PASO08B(i,j)<226
            PASO08B(i,j)=0;
```

```
        end
        if PASO08B(i,j)>=226
            PASO08B(i,j)=1;
        end
    end
end

PASO09=mat2gray(PASO08B);
figure, imshow(PASO09);
```

Anexo 2

Programa de MATLAB para limpieza binaria y programa para escribir los comandos necesarios en GAMBIT.

```
clc
clear all

TMOBW=imread('Imagenes0400a12b+000c+100MONO.bmp');
figure, imshow(TMOBW);

% "0's" -----> Color negro
% "1's" -----> Color blanco

%% Pixels Negros
%% Un elemento
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
        end
    end
end

%% Dos elementos Caso 1
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 2
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j-1)=1;
        end
    end
end
```

```

end

% Dos elementos Caso 3
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i,j-1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 4
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j-1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 5
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 6
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j+1)=1;
        end
    end
end

```

```

end

% Dos elementos Caso 7
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-
1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-
1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==0 &&
TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i,j+1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 8
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==0 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-
1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-
1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==1 &&
TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j+1)=1;
        end
    end
end

%% Pixels Blancos
%% Un Elemento
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-
1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-
1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 &&
TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
        end
    end
end

%% Dos elementos Caso 1
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==1 && TOMOBW(i+1,j-
1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-
1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 &&
TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j)=1;
        end
    end
end

```

```

end

% Dos elementos Caso 2
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==1 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j-1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 3
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i,j-1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 4
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==1 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j-1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 5
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==1 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j)=1;
        end
    end
end

```

```

end

% Dos elementos Caso 6
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==1 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i-1,j+1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 7
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==1 && TOMOBW(i+1,j+1)==0
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i,j+1)=1;
        end
    end
end

% Dos elementos Caso 8
for i=2:571
    for j=2:559
        if TOMOBW(i,j)==1 && TOMOBW(i+1,j)==0 && TOMOBW(i+1,j-1)==0 && TOMOBW(i,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j-1)==0 && TOMOBW(i-1,j)==0 && TOMOBW(i-1,j+1)==0 && TOMOBW(i,j+1)==0 && TOMOBW(i+1,j+1)==1
            TOMOBW(i,j)=1;
            TOMOBW(i+1,j+1)=1;
        end
    end
end

figure, imshow(TOMOBW);
%% Coordenadas
k=1;
for i=260:319
    for j=240:299
        if TOMOBW(i,j)==1
            COORDENADAS(k,1)=i;
            COORDENADAS(k,2)=j;
            CADENA=fprintf('volume cmove "volume.1" multiple 1 offset %d %d 400\n',i,j);
        end
    end
end

```

```
%          CADENA0=('volume cmove "volume.1" multiple 1
offset ');
%          CADENA1=(' ');
%          CADENA2=('400');
%
CADENA3=strcat(CADENA0,CADENA1,int2str(i),CADENA1,int2str(j),
%          CADENA1,CADENA2);
%          TXTSALIDA(k,1)=cellstr(CADENA3);
%          k=k+1;
        end
    end
end
%xlswrite('COORDS',COORDENADAS)
%xlswrite('COORDS',TXTSALIDA)
```

Anexo 3

Ejemplo de los comandos en GAMBIT.

```
/ Journal File for GAMBIT 2.4.6, Database 2.4.4, ntx86
SP2007051421
/ Identifier "default_id4064"
/ File opened for write Thu Feb 19 14:25:24 2004.
volume create width 1.001 depth 1.001 height 1.001 brick
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 240 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 244 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 245 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 246 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 247 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 248 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 249 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 250 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 251 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 252 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 253 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 254 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 255 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 256 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 257 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 258 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 259 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 260 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 261 400
volume cmove "volume.1" multiple 1 offset 260 267 400
continue..
```

Anexo 4

```
clc
clear all

L=1;

TOMO=imread('Fieldstone_1000x1000x861_16b.raw.histogram.bmp');
figure, imshow(TOMO);

[TOMORGB,map]=rgb2ind(TOMO,gray(7),'nodither');
%figure, imshow(TOMORGB,map);

CORBN=im2bw(TOMORGB,map);
figure, imshow(CORBN);

TOMOBO=bwperim(CORBN);
%imwrite(TOMOBO,'ImProcesada.bmp')
figure, imshow(TOMOBO);

C(1,1)=287;
C(1,2)=409;
TOMOBO(C(1,1),C(1,2))=0;

for i=1:110;

X1=C(i,1)-1;
X2=C(i,1)+1;
X3=C(i,1);
X4=C(i,1);
X5=C(i,1)+1;
X6=C(i,1)+1;
X7=C(i,1)-1;
X8=C(i,1)-1;

Y1=C(i,2);
Y2=C(i,2);
Y3=C(i,2)+1;
Y4=C(i,2)-1;
Y5=C(i,2)+1;
Y6=C(i,2)-1;
Y7=C(i,2)-1;
Y8=C(i,2)+1;

if TOMOBO(X1,Y1)==1;
    C(i+1,1)=X1;
    C(i+1,2)=Y1;
    TOMOBO(X1,Y1)=0;
end

if TOMOBO(X2,Y2)==1;
```

```

    C(i+1,1)=X2;
    C(i+1,2)=Y2;
    TOMOBO(X2,Y2)=0;
end

if TOMOBO(X3,Y3)==1;
    C(i+1,1)=X3;
    C(i+1,2)=Y3;
    TOMOBO(X3,Y3)=0;
end

if TOMOBO(X4,Y4)==1;
    C(i+1,1)=X4;
    C(i+1,2)=Y4;
    TOMOBO(X4,Y4)=0;
end

if TOMOBO(X5,Y5)==1;
    C(i+1,1)=X5;
    C(i+1,2)=Y5;
    TOMOBO(X5,Y5)=0;
end

if TOMOBO(X6,Y6)==1;
    C(i+1,1)=X6;
    C(i+1,2)=Y6;
    TOMOBO(X6,Y6)=0;
end

if TOMOBO(X7,Y7)==1;
    C(i+1,1)=X7;
    C(i+1,2)=Y7;
    TOMOBO(X7,Y7)=0;
end

if TOMOBO(X8,Y8)==1;
    C(i+1,1)=X8;
    C(i+1,2)=Y8;
    TOMOBO(X8,Y8)=0;
end

end

figure, imshow(TOMOBO);
figure, plot(C(:,2),-C(:,1));
xlabel('pixel')
ylabel('pixel')

```

Anexo 5

Constancias de INDAUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 78, 162, 163 fracción II, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA DERIVADA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES DE TRANSFORMACION: ESPARZA DELGADO MIRIAM GUADALUPE
PEREZ MOTA JOSE EDUARDO
SIQUEIROS HERNANDEZ MIRIAM
VARGAS OSUNA LIDIA ESTHER

TÍTULO: MEJORAMIENTO DE UNA IMAGEN BINARIA CON BASE EN 18 PATRONES DE DISTRIBUCION DE PÍXELES VECINOS A TRAVÉS DE UN CODIGO COMPUTACIONAL QUE FUNCIONA EN MATLAB

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULAR DE TRANSFORMACION: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 163 fracción II segundo párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, esta inscripción no faculta para publicar o usar en forma alguna la obra registrada, a menos de que se acredite la autorización correspondiente.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2024-112810304300-01

Ciudad de México, a 04 de diciembre de 2024

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR



"2025, año del Turismo Sostenible como impulsor del Bienestar Social y Progreso"

**COORDINACIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DEPARTAMENTO DE PROPIEDAD INTELECTUAL Y TRANSFERENCIA**

CONSTANCIA DE AUTORIZACIÓN DE TRÁMITE

No. 011/2025-1

Que se emite en correspondencia al art. 43 del Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad Autónoma de Baja California, como constancia de recepción y conformidad del Departamento de Propiedad Intelectual y Transferencia respecto del trámite solicitado por:

- José Eduardo Pérez Mota
- Luis Antonio González Uribe
- Mónica Isabel Soto Tapiz
- Jorge Oscar Miramón Angulo

Para el registro de la obra titulada: Código computacional para MATLAB que vuelve binaria a una microtomografía computarizada de una roca denominada "Belgian Fieldstone", bajo la rama de: Programa de cómputo, ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR).

Entregando en tiempo y forma los documentos, así como el material que fueron requeridos para tal efecto, en el entendido de que se sujetarán al procedimiento y determinación establecido por el INDAUTOR.

Se emite la presente constancia para los fines que al (los) interesado(s) convenga.

ATENTAMENTE

"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER"

Mexicali, Baja California a 31 de enero de 2025



DR. NARCISO FLORES ROMERO
JEFE DEL DEPARTAMENTO



C.c. Archivo
NFR/xgj

Número de registro: 03-2024-112810474900-0

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 78, 162, 163 fracción II, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA DERIVADA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES DE TRANSFORMACION: DURAZO ROMERO EMMANUEL SANTIAGO
PEREZ MOTA JOSE EDUARDO
RAMIREZ ZARATE JOSE MANUEL
SOTO TAPIZ MONICA ISABEL

TÍTULO: ORDENAMIENTO DE LAS COORDENADAS DE UN BUCLE DE PÍXELES BINARIOS QUE REPRESENTAN UN GRANO DE LA ROCA "BELGIAN FIELDSTONE" POR MEDIO DE MATLAB

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULAR DE TRANSFORMACION: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 163 fracción II segundo párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, esta inscripción no faculta para publicar o usar en forma alguna la obra registrada, a menos de que se acredite la autorización correspondiente.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

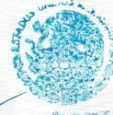
Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2024-112810311300-01

Ciudad de México, a 04 de diciembre de 2024

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

Referencias

- [1] Académica. (s.f.). Rocas sedimentarias. [Curso en línea]. Recuperado 26, noviembre, 2024, de <https://academica.mx/course/view.php?id=1875>
- [2] Liu, J., Yu, P., Li, Y., Wan, C., & Du, D. (2022). Numerical simulation on convective heat transfer characteristics in porous media based on the digital rock technology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 196 (123323), 123323. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123323>
- [3] Jürgen Gursky, H. (2011). Presencia y origen de rocas sedimentarias en el basamento ofiolítico de Costa Rica. *Revista geológica de América central*, 10 (10). <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i10.12997>
- [4] Blunt, M. J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., ... & Pentland, C. (2013). Pore-scale imaging and modelling. *Advances in Water resources*, 51, 197-216.
- [5] Dong, H., & Blunt, M. J. (2009). Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 80 (3), 036307.
- [6] Johansson, M. V., Testa, F., Perrier, P., Vicente, J., Bonnet, J. P., Moulin, P., & Graur, I. (2019). Determination of an effective pore dimension for microporous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, 118412.
- [7] Al-Kharusi, A. S., & Blunt, M. J. (2007). Network extraction from sandstone and carbonate pore space images. *Journal of petroleum science and engineering*, 56 (4), 219-231.
- [8] Meghdadi Isfahani, A. H. (2017). Parametric study of rarefaction effects on micro- and nanoscale thermal flows in porous structures. *Journal of Heat Transfer*, 139(9), 092601.
- [9] Xu, H., Zhao, C., & Vafai, K. (2017). Analytical study of flow and heat transfer in an annular porous medium subject to asymmetrical heat fluxes. *Heat and Mass Transfer*, 53, 2663-2676.
- [10] Xu, H. J., Xing, Z. B., Wang, F. Q., & Cheng, Z. M. (2019). Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat

transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. *Chemical Engineering Science*, 195, 462-483.

- [11] Xu, R., Huang, Y., Jiang, P., & Wang, B. (2012). Internal heat transfer coefficients in microporous media with rarefaction effects. *Science China Technological Sciences*, 55, 2869-2876.
- [12] Pérez Mota, J. E., Solorio Ordaz, F. J. & Salinas Vázquez, M. (2012). Estudio del flujo de aire en una cavidad nasal. *Memorias del xviii congreso internacional anual de la somim*. 1430-1439
- [13] J. L. del Cura, S. Pedraza, A. Gayete. Radiología esencial. *Sociedad española de radiología médica*. Ed. Medica Panamericana. 2009.
- [14] Cabrero Fraile, F. J. Imagen radiológica: principios físicos e instrumentación. Eds. Elsevier y Masson. 1ra ed. 2004.
- [15] Velorio Javier, S. (2018). MULTIMEDIA Introducción, concepto de multimedia, imágenes, sonidos, resolución de aplicaciones. Características principales, tipos, programas principales, aplicación. Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.
Disponible en: <https://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/8571>
- [16] Santiago, V. G., de Gortari, J. C., & Pérez Mota, J. E. (2018). Flujo de aire en las bifurcaciones del árbol bronquial para la fase inhalatoria. *Memorias del xxiv congreso internacional anual de la somim*. 151-156.
- [17] De Boever, W., Bultreys, T., Derluyn, H., Van Hoorebeke, L., & Cnudde, V. (2016). Comparison between traditional laboratory tests, permeability measurements and CT-based fluid flow modelling for cultural heritage applications. *Science of The Total Environment*, 554, 102-112.