

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRACTAL A LOS YACIMIENTOS
NATURALMENTE FRACTURADOS (YNF): EJEMPLO EN LA FORMACIÓN
ROSABLANCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

SANDRA MILENA CRUZ MEJÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2005**

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRACTAL A LOS YACIMIENTOS
NATURALMENTE FRACTURADOS (YNF): EJEMPLO EN LA FORMACIÓN
ROSABLANCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

SANDRA MILENA CRUZ MEJÍA

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Geóloga

Directores

Rafael Isaacs Giraldo

Ricardo Mier Umaña

Codirector

Alberto Ortiz Fernández

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2005

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Agosto de 2005

*A Dios ,
A mis padres,
A mi esposo,
A mis hermanos y sobrinos,
A mis amigos.*

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Rafael Isaacs, profesor asociado a la Escuela de Matemática de la UIS, Ricardo Mier Umaña, profesor asociado a la Escuela de Geología de la UIS y a Alberto Ortiz Fernández, encargado del Proyecto de Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) del ICP, por la valiosa orientación brindada durante el desarrollo del presente trabajo de grado.

El Instituto Colombiano del Petróleo ICP, por su patrocinio para la realización del proyecto.

La sociedad de Yesos Prada Ltda. Y a Diego Niño, Ingeniero de Minas de la Sociedad de Yesos Prada Ltda., por su valiosa colaboración durante la etapa de campo.

El grupo de GEOFRACTALES UIS, por la colaboración en la recolección del material bibliográfico y por sus aportes a esta investigación.

Thomas Nolazco y Federico Rueda, por su inmensa colaboración en la etapa de campo y las observaciones y consejos hechos en este proyecto.

Johana Pinilla, por su inmensa ayuda y asesoría en el manejo del Software para calcular la dimensión fractal de las redes de fracturas.

Mis compañeros, familiares y amigos , de quienes siempre obtuve voces de aliento y colaboración.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETIVOS	4
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2 FUNDAMENTACIÓN TEORICA	5
2.1 LA GEOMETRÍA FRACTAL.....	5
2.1.1 Origen	6
2.1.2 Autosimilaridad	7
2.1.3 Autoafinidad	8
2.1.4 Dimensión	10
2.2 Cálculo Experimental de la Dimensión Fractal.....	13
2.2.1 Dimensión por conteo de cajas (Box-Counting).....	13
2.2.2 Dimensión por Variogramas.....	15
2.3 Conceptos Geológicos	19
2.3.1 Introducción a las fracturas.....	19
2.3.2 Conceptos Previos.....	20
2.3.3 Caracterización Geológica de las fracturas.....	26
2.3.4 Clasificación de las Fracturas	29
2.4 Toma de datos de Fracturas	31
2.4.1 Atributos básicos para caracterizar fracturas.....	32
2.4.2 Aspectos teóricos de rocas calcáreas.....	34

2.5	La geometría fractal y las redes de fracturas	35
3	ASPECTOS GENERALES.....	37
3.1	Localización Geográfica.....	37
3.2	Vías de Acceso.....	39
3.3	Clima Y vegetación	39
3.4	Topografía y Drenaje.....	39
3.5	Metodología.....	40
3.5.1	Etapa de Precampo	40
3.5.2	Recolección de Datos y muestras en campo:	41
3.5.3	Tratamiento y análisis de los datos	42
3.5.4	Determinación de la dimensión fractal	43
3.5.5	Análisis de datos obtenidos	44
3.6	Estudios Anteriores	44
4	GEOLOGÍA	47
4.1	Geología General	47
4.1.1	Estratigrafía.....	47
4.1.2	Estructural.....	48
4.2	Evolución Tectonoestratigráfica Regional.....	56
4.3	Formación Rosablanca.....	60
4.3.1	Antecedentes:	60
4.3.2	Características Petrolíferas:.....	62

4.3.3	Ambiente de Deposición de la Formación Rosablanca:.....	63
5	RESULTADOS	66
5.1	Datos para el Túnel 1	68
5.2	Datos para el túnel 6	73
5.2.1	Dimensión Fractal para el Túnel 6	78
5.3	Datos para el Túnel 10	88
5.3.1	Dimensión fractal para el túnel 10.....	93
5.4	Datos para el túnel 11	98
6	DISCUSIÓN.....	102
6.1	Origen del sistema fracturado	102
6.2	Orientación de Fracturas.....	102
6.3	Dimensión fractal y las redes de fracturas	102
7	CONCLUSIONES.....	107
8	RECOMENDACIONES.....	109
	BIBLIOGRAFÍA	110
	ANEXOS.....	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Conjunto de Mandelbrot	5
Figura 2. Conjunto de Mandelbrot. Mostrando la característica autosimilar al repetirse el aspecto del objeto original.....	7
Figura 3. Superficie auto-afín generada mediante computadora, simulando la rugosidad de superficies de fractura más comunes.....	8
Figura 4. Esquema de comparación entre la dimensión euclidiana (D_e) y la dimensión fractal (D_f).....	10
Figura 5. Observación de Puntos igualmente espaciados.....	16
Figura 6. Semivariograma	17
Figura 7. Tipos de Fractura en función del modo en que se propagan	21
Figura 8. Tipos de falla basados en la orientación del vector de deslizamiento en el cual se observa los dos tipos de movimientos que pueden ocurrir en el caso de las fallas tipo “ <i>Strike-Slip</i> ”.....	22
Figura 9. tipos de falla basados en la orientación del vector de deslizamiento en el cual se observa los dos tipos de movimientos que pueden ocurrir en el caso de las fallas tipo “ <i>Dip-Slip</i> ”	23
Figura 10. Localización del área de estudio	38
Figura 11. Mapa de Fracturas “Mina el Carrancho”.....	42
Figura 12. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena (Tomada de Suárez et al., 2000)	49
Figura 13. Estilos Estructurales del Valle Medio del Magdalena (VMM)(Tomado de Suárez et al., 2000).....	52
Figura 14. Imagen de la falla observada en el túnel 6 de la mina “El Carrancho” costado izquierdo del Túnel.	54
Figura 15. Imagen de la falla observada en el Túnel 6 de la Mina “El Carrancho” Costado derecho del túnel.	55

FIGURA 16. Evolución Tectonoestratigráfica del Valle Medio del Magdalena (Tomado y Modificado de Linares, 1998).....	59
Figura 17. Ambiente de Deposición de la Formación Rosablanca (Tomado de Borrero, 2003).....	65
Figura 18. Fracturas afectadas por procesos de infiltración	68
Figura 19. Scanline y trazos de fracturas para el túnel 1.....	69
FIGURA 20. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de las mismas (b) para cada dirección.....	70
Figura 21. Diagrama de rosetas para las fracturas del Túnel 1.....	72
Figura 22. Scanline y trazos de fracturas para el Túnel 6.	73
Figura 23. Diagrama de barras que ilustra el Número total de fracturas (a) y el porcentaje de las mismas (b) para cada dirección.....	75
Figura 24. Diagrama de rosetas para las fracturas del Túnel 6.....	77
Figura 25. Pasos para extraer la red de fracturas de la imagen. (a) Fotografía; (b) imagen procesada en Photoshop; (c) Red de fracturas obtenida.....	79
Figura 26. Relación de Dimensión Vs. Índice de fracturas	84
Figura 27. Relación de Dimensión Fractal Vs. Índice de Fracturas	88
Figura 28. Scanline y trazos de fracturas para el Túnel 10.....	89
Figura 29. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de distribución de las mismas (b), para cada una de las direcciones. .	91
Figura 30. Diagrama de rosetas para las fracturas del túnel 10.	93
Figura 31. Imágenes de las redes de fracturas observadas en el túnel 10.	94
Figura 32. Relación de Dimensión Vs. Índice de fracturas	97
Figura 33. Scanline y trazos de fractura para el túnel 11.	98
Figura 34. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de las mismas (b) en cada dirección.....	100
Figura 35. Diagrama de rosetas para el Túnel 11.	101
Figura 36. Dimensión Fractal Vs. Índice de fracturamiento	104
Figura 37. Dimensión Fractal Vs. Índice de Fracturas.....	105

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1. Dimensiones de objetos clásicos de la geometría.....	11
TABLA 2. Curva de Koch.....	12
TABLA 3. Resumen de datos de la Formación Rosablanca, tomados en el área de estudio.	66
TABLA 4. Datos Túnel 1	69
TABLA 5. Datos Túnel 6	73
TABLA 6. Dimensión fractal usando el método de box-counting	80
TABLA 7. Dimensión fractal usando el método de Variograma	80
TABLA 8. Tabla de datos en la cual la intensidad de fracturas esta dada por el número de fracturas que hay en un área de 64x64 píxeles	82
TABLA 9. Tabla de datos para redes de fracturas con iguales aperturas y en la cual la intensidad de fracturamiento esta dada por el número de fracturas en un área de 64x64 píxeles.....	85
TABLA 10. Datos túnel 10.....	89
TABLA 11. Dimensión por el método de Box-counting	94
TABLA 12. Dimensión por el método de variograma	95
TABLA 13. Tabla de datos en la cual la intensidad de fracturas esta dada por el número de fracturas que hay en un área de 64x64 píxeles	95
TABLA 14. Datos túnel 11.....	98

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Mapa de fracturas de la Mina “El Carrancho”.....	119
ANEXO B. Catálogo de imágenes utilizadas para el cálculo de la Dimensión Fractal.....	120
ANEXO C. Resultados Box-Counting.....	121
ANEXO D. Resultados Análisis de Variograma.....	132

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRACTAL A LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS (YNF): EJEMPLO EN LA FORMACIÓN ROSABLANCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA*

AUTOR: SANDRA MILENA CRUZ MEJÍA**

PALABRAS CLAVES: Dimensión Fractal, redes de fracturas, afloramiento, geometría fractal, análisis de variograma, conteo de cajas, densidad de fracturas, scanline.

DESCRIPCIÓN

La caracterización de las redes de fracturas es importante para entender el comportamiento de los yacimientos naturalmente fracturados (YNF). La geometría fractal se presenta como una herramienta útil para describir y cuantificar las características de las redes de fractura, ya que, permite evaluar la complejidad de las redes de fracturas teniendo en cuenta las variaciones que se observan en las distintas escalas; en este caso el trabajo se realizó a escala de afloramiento.

Los datos usados en este estudio fueron tomados de afloramientos de la Mina "El Carrancho", ubicada al SW de La Mesa de Los Santos, la cual presenta una buena exposición de la Formación Rosablanca que es una unidad altamente afectada por fracturamiento; para este estudio se hicieron las mediciones de las fracturas en tres túneles principalmente, en los cuales se trazaron los scanline, cubriendo la longitud total de los mismos y de los cuales se observó las principales orientaciones de las fracturas; las fotografías tomadas en los túneles se usaron para resaltar la red de fracturas y realizar el cálculo de la dimensión fractal.

Los datos de orientación de las fracturas se analizaron usando los diagramas rosa, para los cuales se obtuvieron tres direcciones principales de fracturamiento: N10-20E, N60-70E y N60-70W. De estos análisis se observó que la mayor población de fracturas encontrada en los túneles de la mina "El Carrancho" presenta una orientación N-E, lo cual, indica que los mayores esfuerzos se concentraron en esta dirección.

El cálculo de la dimensión fractal se obtuvo aplicando el método de Box-Counting y el análisis de variograma, para los cuales se observaron diferencias considerables en los valores de la dimensión fractal; los valores de dimensión fractal obtenidos por el método de Box-Counting fueron relacionados con la densidad de fracturas. De acuerdo con la relación de la dimensión y la densidad de fracturas se puede concluir que la dimensión fractal aumenta a medida que se incrementa la densidad de fracturas, es decir, cuanto más compleja sea la red de fracturas mayor será la dimensión fractal.

* Proyecto de Grado. Modalidad: Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología.

ABSTRACT

TITLE: Application of fractal analysis at the naturally fractured reservoirs (NFR): Example in the Rosablanca Formation of Middle Magdalena Valley*.

AUTHOR: Sandra Milena Cruz Mejía**

KEY WORDS: Fractal dimension, fracture network, outcrop, fractal geometry, variogram analysis, box counting, fracture density, scanline.

DESCRIPTION

Characterization of fracture network is important to understand the naturally fractured reservoirs (NFR) behavior. The fractal geometry is introduced such as a useful tool to describe and quantify the fracture networks characteristics, because it allows to evaluate the fracture networks complexity considering the variations observed in different scales; in this case the research was done in an outcrop scale.

Data were collected from outcrops of the "El Carrancho" mine in southwestern La Mesa de Los Santos, which showed a good exposure of Rosablanca Formation that is highly unit affected by fracturing; fracture measurements were taken from three tunnels mainly in this study, in which it was sketched the scanlines, by covering the whole length of each one and whose was observed the mainly fracture orientations; the taken photographs in tunnels were used to underline the fracture network and to make calculations of fractal dimension.

The fracture orientation data were analyzed using rose diagrams to which it was gotten this three main directions of fracturing: N10-20E, N60-70E and N60-70W. From this analysis it was observed that the major fracture population found in "El Carrancho" mine tunnels presented an N-E orientation, which indicates that the greater stress were concentrated in this direction.

The fractal dimension calculation was gotten applying the Box-Counting and the variogram analysis methods, from which considerable differences were observed in the fractal dimension values; the fractal dimension values got from this method were related with the fracture density. According to the relation of dimension and fracture density it could be concluded that the fractal dimension increases depending on the increment of fracture density, so it could be said that the fractal dimension would be greater when the fracture networks would be more complex.

* Grade Project. Modality: Research.

** Physical-chemical Engineering Faculty. Geology School.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado hace parte del grupo de PETROSÍSMICA, convenio de Cooperación Tecnológica UIS-ECOPETROL ICP, No. 005 de 2003.

El proyecto de investigación, surge de la necesidad de introducir una nueva metodología para caracterizar las redes de fractura y sus propiedades, teniendo en cuenta que la usada en la actualidad posee ciertas limitaciones para describir el comportamiento de las redes. En consecuencia, se considera la geometría fractal como una herramienta adecuada para analizar este tipo de fenómenos, puesto que se basa en el estudio de los comportamientos en escalas, de variables estadísticas que caracterizan arreglos geométricos o rasgos; por lo tanto el objeto de este estudio es observar la aplicabilidad de dicha geometría en la caracterización de los Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) mediante datos tomados en afloramiento e imágenes de los mismos.

El primer paso consistió en investigar sobre la caracterización y el comportamiento de las redes de fractura y sus implicaciones en la prospección y producción de hidrocarburos en las rocas calcáreas, de esta manera se observó la posibilidad de la aplicación de esta geometría a los sistemas de fracturas. Fue así como, se determinó el objetivo del proyecto, realizar un estudio de factibilidad sobre la aplicación de la geometría fractal en la caracterización de las redes de fractura mediante el cálculo de la dimensión fractal a partir de datos de afloramientos, para disminuir la incertidumbre asociada a este tipo de yacimientos en la prospección y producción de hidrocarburos en rocas calcáreas en el Valle Medio del Magdalena.

El siguiente paso consistió en la consecución de información acerca de los conceptos de geometría fractal, dimensión fractal, caracterización de redes de fracturas, relación entre las redes de fracturas y las propiedades del yacimiento,

relación de la geometría fractal con los yacimientos fracturados. Para ello, se consultó libros, revistas, Internet, tesis de grado y bases de datos; el resultado fue una recopilación de los diferentes métodos para calcular la dimensión fractal, la definición de los objetivos específicos, la metodología a seguir, el estado del arte y el cronograma de trabajo. Luego se empezó a profundizar en los conceptos de la geometría fractal y sus implicaciones con las redes de fracturas y más específicamente, en la dimensión y la relación con los yacimientos naturalmente fracturados.

La descripción del proceso seguido para el desarrollo de esta investigación, es el tema a abordar en este texto. En primer y segunda instancia se presentan los objetivos y el marco teórico que muestra los fundamentos de la geometría fractal, dimensión fractal, métodos computacionales para calcularla, conceptos geológicos acerca de las fracturas, como su caracterización, clasificación, atributos de las mismas y algunos aspectos de las rocas calcáreas.

El capítulo 3 y 4 corresponden a los aspectos generales de la zona de estudio, la metodología y la geología general de la zona. En este último se explican los aspectos más relevantes de la zona de trabajo, tales como, la estratigrafía, la geología estructural, y se detalla ampliamente las características geológicas, así como también, la evolución y ambiente de depositación de la Formación Rosablanca, objeto de estudio en el presente trabajo.

El capítulo 5 hace referencia a los resultados obtenidos de acuerdo a los análisis realizados para los datos tomados en los túneles de la Mina “El Carrancho”, estos resultados detallan la forma en la cual fueron tomados y procesados los datos para cada túnel; y en el 6 se realiza la discusión de los resultados obtenidos y se bosquejan algunas conclusiones.

En los capítulos 7 y 8 se exponen las conclusiones y recomendaciones sugeridas para darle continuidad a este estudio sobre la aplicación del análisis fractal a los sistemas fracturados.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de factibilidad sobre la aplicación de la geometría fractal en la caracterización de las redes de fracturas mediante el cálculo de la dimensión fractal a partir de datos de afloramientos, para disminuir la incertidumbre asociada a este tipo de yacimientos en la prospección y producción de hidrocarburos en rocas calcáreas en el Valle Medio del Magdalena.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener la mayor cantidad posible de datos para las redes de fracturas de la Formación Rosablanca, (Valle Medio del Magdalena), tratando de cubrir una gran variedad de características físicas y estructurales que permitan el buen desarrollo de la técnica.
2. Analizar las diferentes técnicas para medición fractal e identificar la más adecuada para la caracterización de las redes de fracturas en rocas calcáreas y su aplicación a los Yacimientos Naturalmente Fracturados.
3. Aplicar una herramienta matemática efectiva de adquisición y procesamiento de datos, para cuantificar comportamientos de las fracturas a escala macroscópica y los posibles efectos en los Yacimientos Naturalmente fracturados.
4. Elaborar una guía para clasificar las fracturas de acuerdo a la dimensión fractal obtenida, teniendo en cuenta sus características morfológicas (apertura, orientación, tipo de relleno, etc.,).

2 FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.1 LA GEOMETRÍA FRACTAL

La Geometría Fractal trabaja objetos matemáticos que sirven para modelar fenómenos naturales. Estos objetos están constituidos por varias partes, cada una de las cuales es una copia minimizada del todo (Autosimilitud¹), o una aproximación de una copia minimizada del todo (semi-autosimilitud) (Ver Figura No.1). Está definida sobre un espacio métrico completo junto con una clase de transformaciones. Los objetos fractales son irregulares. Sus curvas pueden ser continuas pero no son diferenciables. En ellos es relevante el parámetro conocido como Dimensión de Hausdorff Besicovitch o Dimensión Fractal, que indica que tan rugoso es el objeto.

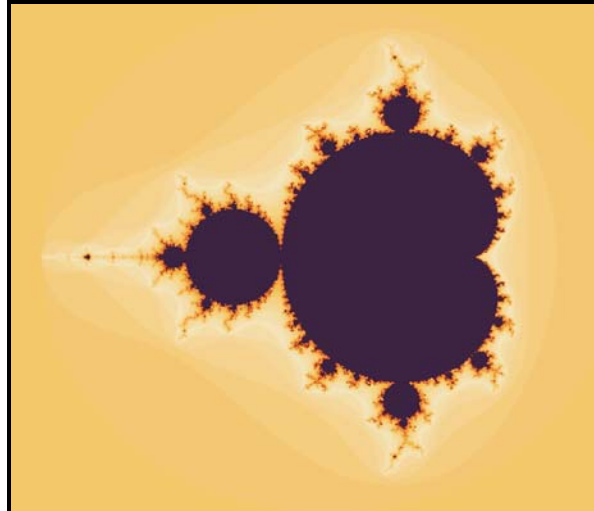


Figura 1. Conjunto de Mandelbrot

¹Propiedad geométrica característica de los objetos fractales.

2.1.1 Origen²

El primer fractal fué reconocido en los sesenta en el estudio del ruido en transmisión de señales. Beniot Maldelbrot notó que la distribución de la señal de ruido es estadísticamente similar en muchas escalas de observación. En gráficas de intensidad contra tiempo las distribuciones son muy parecidas en diferentes rangos de tiempo: minutos, segundos, milisegundos, etc. En otros fenómenos aleatorios, como variación de precios de algodón en bolsa de valores o el comportamiento anual de las riadas del Nilo, encontró aspectos semejantes, en forma de ruidos Brownianos.

El término fractal, del latín fractus, alude la característica de los objetos fractales de poseer curvas continuas totalmente irregulares. Los fractales aun no tienen un significado preciso, por ser un área nueva y además estar actualmente en desarrollo, sin embargo entre las personas que han trabajado el tema es aceptada una definición establecida por Mandelbrot en 1975 así: “Un fractal es el conjunto de formas generadas normalmente por procesos matemáticos repetitivos y que se caracterizan por: 1) tener el mismo aspecto a cualquier escala de observación, 2) tener longitud infinita, 3) no ser diferenciables y 4) tener dimensión fraccional o fractal”³. Actualmente, teniendo en cuenta las cuatro características mencionadas anteriormente su acepción es: Formas geométricas que pueden ser separadas en

² ARCINIEGAS Nelson, COGOLLO Magda Lucía, PINTO Flavio Augusto. Tesis de Grado “Estudio de factibilidad para la caracterización fractal de las formas del relieve mediante el desarrollo de una herramienta computacional basada en un sistema de análisis de imágenes”. Universidad Industrial de Santander. 1995

³ GONZÁLEZ Virgilio, GUERRERO Carlos. Fractales: fundamentos y aplicaciones. Parte I Concepción geométrica en la ciencia e ingeniería. Ingenierías, Enero-Marzo 2001, Vol. IV, No.10

partes, cada una de las cuales es una versión reducida del todo. Dentro de la teoría de estos conceptos existen aspectos fundamentales por donde se puede uno aproximar a la definición de estos objetos. Podría decirse que los fractales son a la vez objetos autosimilares, de dimensión extraña y frontera del caos.

2.1.2 Autosimilaridad

Es una característica fundamental de los fractales, en la cual los detalles más pequeños que componen el objeto tienen alguna relación estadística con sus propiedades globales, repitiéndose tales detalles de una manera infinita, se entiende por esto como si una parte del conjunto fuera una pequeña replica del todo. Esta característica se puede encontrar en muchos fenómenos de la naturaleza aunque de manera no tan determinística, como por ejemplo: las olas del mar son formadas por pequeñas olas, cada una formada por otras olitas. Goodchild, M. y Mark, D, (1987) en Klinkenberg, B (1994), demostraron, que estadísticamente la distribución de las nubes en gran escala corresponde a la distribución en pequeñas escalas, lo mismo sucede con las costas de los países y con muchos otros fenómenos. Para una mejor comprensión de este concepto consideremos el siguiente esquema (Figura 2).

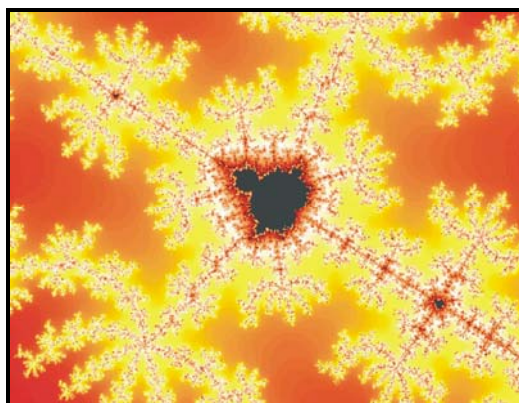


Figura 2. Conjunto de Mandelbrot. Mostrando la característica autosimilar al repetirse el aspecto del objeto original

Matemáticamente un conjunto A es autosimilar si es la unión de objetos semejante, comprimidos por transformaciones afines⁴ basadas en fenómenos determinísticos:

$A = \bigcup_{i=1}^n W_i(A)$	Ec. (1)
------------------------------	----------------

2.1.3 Autoafinidad

Se refiere a la característica que presentan determinados objetos en los cuales solo se mantiene su aspecto durante el escalamiento, si este varía en al menos una de las direcciones sus rasgos no se conservan, esto es lo que se conoce como objetos o fractales auto-afines. Esta característica es ampliamente observada en objetos naturales o matemáticos, tales como las superficies de los objetos y los perfiles generados por el movimiento browniano, a continuación se observa una gráfica en la cual se representa esta propiedad (Figura 3).

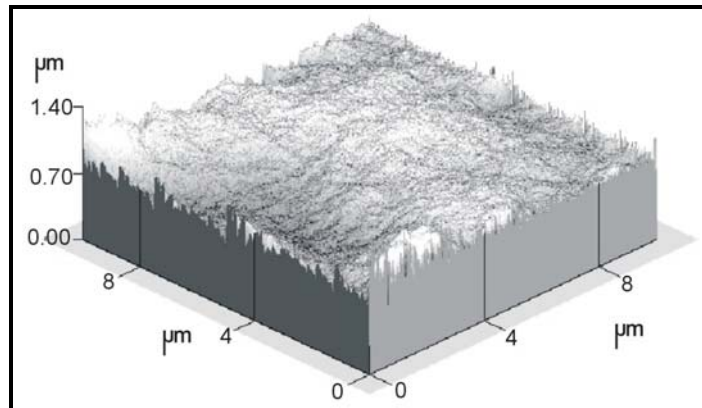


Figura 3. Superficie auto-afín generada mediante computadora, simulando la rugosidad de superficies de fractura más comunes

⁴ Transformación afín: función de la forma $AX+B$ donde A es una matriz y B es un vector.

La propiedad de auto-afinidad, obedece a transformaciones o escalamientos como el descrito en las siguientes ecuaciones:

$(X, Y, Z) \rightarrow (\lambda_x X, \lambda_y Y, \lambda_z^\zeta Z)$	Ec. (2)
---	----------------

$(X, Y, Z) \rightarrow (\lambda_x X, \lambda_y^\zeta Y, \lambda_z Z)$	Ec. (3)
---	----------------

$(X, Y, Z) \rightarrow (\lambda_x^\zeta X, \lambda_y Y, \lambda_z Z)$	Ec. (4)
---	----------------

Donde de: (2) $\lambda_x = \lambda_y \neq \lambda_z^\zeta$

$$(3) \lambda_x = \lambda_z \neq \lambda_y^\zeta$$

$$(4) \lambda_y = \lambda_z \neq \lambda_x^\zeta$$

El exponente ζ se conoce como exponente de auto-afinidad y tiene una relación con la dimensión fractal mostrada en la siguiente ecuación:

$D_f = D_e + 1 - \zeta$	Ec. (5)
-------------------------	----------------

Donde D_f representa la dimensión fractal, D_e es la dimensión euclidiana.

2.1.4 Dimensión

Es una característica que poseen los objetos y está relacionada con la capacidad de estos para ocupar el espacio euclidiano en el que se encuentran sumergidos. Los fractales poseen una dimensión fractal (D_f), más conocida como la dimensión de Hausdorff-Besicovith, por haber sido planteada primero por estos investigadores; esta dimensión puede adquirir valores en el espacio de los números reales y además debe ser mayor que su dimensión topológica para que el objeto sea considerado fractal, la figura 4 presenta una explicación más acertada de este concepto.

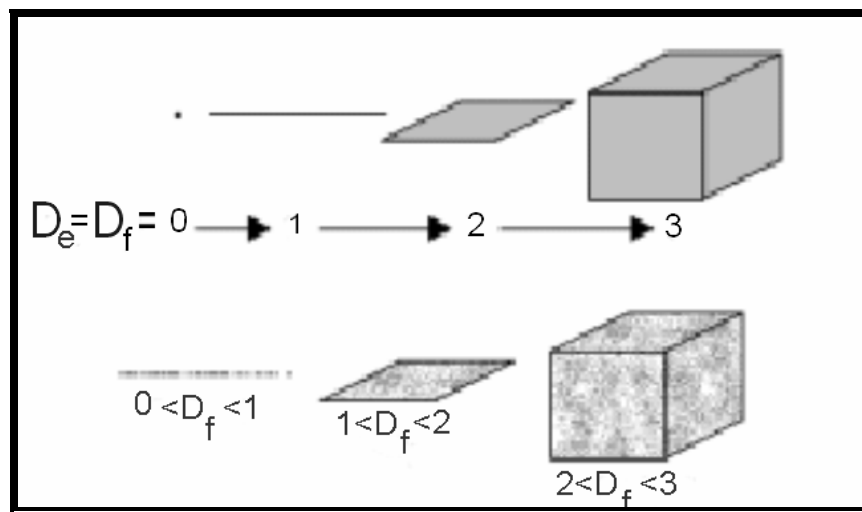


Figura 4. Esquema de comparación entre la dimensión euclidiana (D_e) y la dimensión fractal (D_f) (Tomada de González V, 2001)

En la figura representada en la parte superior se observan cuatro objetos clásicos de la geometría Euclidiana, con los cuales se quiere explicar el aspecto dimensional de la geometría fractal, es decir la parte superior de la figura 4 muestra los objetos continuos en la cual la dimensión topológica o euclidiana coincide con la dimensión fractal ($D_e = D_f$), sin embargo la realidad de la naturaleza no es diferenciable, es decir cuando se hace una amplificación a escala

de los objetos representados, encontramos que estos objetos tienen espacios vacíos, es decir presentan “poros” (parte inferior de la figura 4), lo cual implica que las dimensiones anteriormente mencionadas no coincidan ($D_e \neq D_f$). Para mayor claridad obsérvese la siguiente tabla:

TABLA 1. *Dimensiones de objetos clásicos de la geometría*

Objeto	Dimensión Euclidiana	Dimensión Fractal
Puntos aislados	0	0
Línea	1	$0 < D_f < 1$
Superficie Suave	2	$1 < D_f < 2$
Sólidos Típicos	3	$2 < D_f < 3$

Dentro de los objetos fractales existen algunos que han sido muy estudiados y son característicos de este tipo de geometría, como por ejemplo la curva de Koch la cual tiene una dimensión topológica de 1; pero su dimensión de Hausdorff es $\log 4 / \log 3$, que no es un número racional; el conjunto ternario de Cantor tiene dimensión topológica 0, pero la dimensión de Hausdorff es $\log 3 / \log 2$, la cual no corresponde a un conjunto de puntos aislados, ni tampoco a una línea (ver *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Turcotte, D. 1992) .







Definición Matemática de la Dimensión Fractal: Esta definición matemática es la que se conoce como la dimensión de Hausdorff-Besicovith y consiste en las mediciones de los objetos, la cual está dada de la siguiente manera: se debe obtener la medida según un patrón seleccionado, de manera que para la obtención de la longitud de una línea se debe cubrir dicha longitud con segmentos de rectas de longitud conocida, y la longitud resultante es la sumatoria del número de veces en que el patrón de medida ocupa la totalidad de la superficie; si la medida se hace con un patrón de dimensionalidad mayor la magnitud de la longitud se hace infinita, de igual manera si se midiera con un patrón de

dimensionalidad menor a la del objeto el resultado sería cero; es decir solo se puede medir el objeto con un patrón de igual dimensionalidad para obtener un resultado satisfactorio. De igual manera se realizan las mediciones para áreas y volúmenes, teniendo en cuenta la correspondiente dimensión para cada caso, es decir, 2 y 3 respectivamente. Para entender mejor este concepto observemos el siguiente ejemplo:

1. Construcción de la curva de Koch:

Para la elaboración de la curva de Von Koch se parte de un segmento de recta de longitud unidad. En el primer paso del algoritmo, se divide dicho segmento en cuatro partes iguales, cada uno de longitud $1/3$, luego en el segundo paso en 16 segmentos de longitud $1/9$ y así sucesivamente, como se indica a continuación:

TABLA 2. Curva de Koch

Iteración	N	s	Longitud Total
	1	1	1×1
	4	$1/3$	$4 \times 1/3 = 4/3$
	4^2	$1/3^2$	$4^2 \times 1/3^2 = 4^2/3^2$
	4^3	$1/3^3$	$4^3 \times 1/3^3 = 4^3/3^3$
	4^4	$1/3^4$	$4^4 \times 1/3^4 = 4^4/3^4$
	4^n	$1/3^n$	$4^n \times 1/3^n = 4^n/3^n$

En la n-ésima iteración la longitud de la curva de Koch es $l_n = \left(\frac{4}{3}\right)^n$. En el límite de la iteración infinita, la longitud tiende a infinito. Por lo que se debe normalizar la curva de la siguiente manera; buscando un valor D tal que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (l_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{4}{3^D} \right)^n = 1$$

si $D=1$ tenemos $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{4}{3} \right)^n = \infty$ y si $D=2$ tenemos que, $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{4}{9} \right)^n = 0$

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene:

$$D = \left(\frac{\log(4)}{\log(3)} \right) \approx 1.2619$$

que es la dimensión de la curva de Koch.

2.2 Cálculo Experimental de la Dimensión Fractal

Existe una gran cantidad de métodos usados para calcular la dimensión fractal de los objetos y formas de la naturaleza, aquí nos vamos a referir únicamente a aquellos que son de gran utilidad para caracterizar y estudiar los rasgos lineales de fenómenos naturales, tales como, el perfil de un río, la longitud de una costa, entre muchos otros. Los más convenientes para este caso son el Método de Box-Counting y el método de Variogramas. A continuación se presentaran los aspectos más relevantes de estos dos métodos:

2.2.1 Dimensión por conteo de cajas (Box-Counting)

Este método es ampliamente usado para determinar la dimensión fractal de muchos fenómenos tales como: imágenes digitales de líneas de costa, fotografías de vegetación, patrones de fracturas determinados de imágenes remotas, entre muchos otros, puede ser aplicado a un conjunto de puntos, características lineales, áreas y volúmenes. Antes de ser aplicado en investigación fractal, fue usado para determinar de una manera rápida el área de características cartográficas irregulares (Gierhart, 1954; Maling, 1968, en Klinkenberg, 1994). Es

también conocido como el método de las rejillas, o el método de conteo a través de celdas reticulares.

Su implementación puede ser concebida de la siguiente manera:

1. Se cubre la característica de interés con una sola caja.
2. La caja es dividida en cuatro cuadrantes de lado $1/s$ y se cuenta el número de celdas $N(s)$ que cubren algún sector de la figura.
3. Enseguida, cada cuadrante es dividido nuevamente en otros cuatro cuadrantes de lado s y se vuelve a contar el número de celdas $N(s)$ que cubren algún sector de la curva de interés. Este procedimiento se repite hasta que el tamaño de la caja sea igual a la resolución de los datos, contando siempre el número de celdas que están ocupadas por algún sector de la figura.
4. Luego se hace una gráfica $\text{Log}(N(s))$ vs. $\text{Log}(1/s)$. Se calcula la pendiente de esta gráfica de la siguiente manera:

$$\text{Sea } x_i = \text{Log}(1/s_i)$$

$$y_i = \text{Log}(N_i)$$

Entonces la pendiente es:

$m = \frac{n \sum_1^n x_i y_i - \left(\sum_1^n x_i \right) \left(\sum_1^n y_i \right)}{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2}$	EC. (6)
---	----------------

De donde m es la dimensión Box Counting (D_B).

Según Liebovitch y Toth (1989) en Klimkemberg (1994), este método requiere de un computador con gran capacidad de memoria y alta velocidad, para que puedan ser almacenados la mayor cantidad de datos encontrados en las celdas; el tamaño de las celdas debe ser cuadrada, para que se cumpla la Ley de Potencias y la dimensión pueda ser correcta; además de necesitar un gran número de datos de puntos ordenados para hallar la dimensión, se requiere que el tamaño de la caja cubra la totalidad de los datos para que no se presenten problemas de residuo.

2.2.2 Dimensión por Variogramas

Este método es ampliamente utilizado para determinar dimensión fractal de superficies, según Carr y Benzer (1991), Klinkenberg y Goodchild (1992) en Klinkenberg (1994), consideran el método muy cómodo y de fácil uso, por lo que es preferido con respecto al análisis espectral. Por medio del muestreo de un gran número de pares de puntos, (con un espaciado diferente), a lo largo de un perfil y las diferencias estimadas en sus atributos de interés (por ejemplo, intensidad de fracturas, altura, profundidad, intensidad de gris); la dimensión fractal puede ser fácilmente derivada de una gráfica logarítmica de la *semivarianza vs. la distancia entre los pares de puntos*.

La elección de las distancias máximas de los pares de puntos usada en el análisis requiere de algunos conceptos. La distancia máxima entre los pares de puntos toma usualmente un medio de la distancia máxima absoluta entre los puntos, pero, algunos autores como, Roy, Gravel y Gauthier (1987) en Klinkenberg (1994), consideran puntos más cortos tales como un cuarto de la distancia máxima; sin embargo esta regla es más restringida que necesaria.

Para objetivos estadísticos, es importante que la muestra de los pares de puntos usados en los análisis iguale uniformemente el rango de distancia. Además de obtener estadísticamente promedios válidos para las diferencias del atributo de interés, las distancias de los pares de puntos están usualmente colocadas en un número de órdenes definido. Mientras que otros métodos usan regresiones lineales en la determinación de la pendiente, en este se usa una regresión por mínimos cuadrados.

Semivarianza: La semivarianza es una medida del grado de dependencia espacial entre observaciones a lo largo de un perfil y es usada para expresar la tasa de cambio de una variable a lo largo de una orientación específica.

Para cada pareja de puntos, la semivarianza se calcula con (7)

$\gamma_h = \sum_i^{n-h} (x_i - x_{i+h})^2 / 2n$	Ec. (7)
--	----------------

Donde γ_h es la semivarianza a una distancia h , x_i es el valor que toma el atributo de interés en la posición i y x_{i+h} es otro valor tomado h intervalos después. Por lo tanto, con esta fórmula se encuentra el cuadrado de las diferencias entre parejas de puntos separados por una distancia h . El número de puntos es n , luego el número de comparaciones entre las parejas de puntos es $n - h$.

La siguiente figura ilustra el procedimiento; para las diferentes distancias que pueden ser aplicadas, en el caso de $h=1$ cada punto es comparado con su vecino, si $h=2$ el punto se compara con el punto localizado dos espacios después y así sucesivamente.

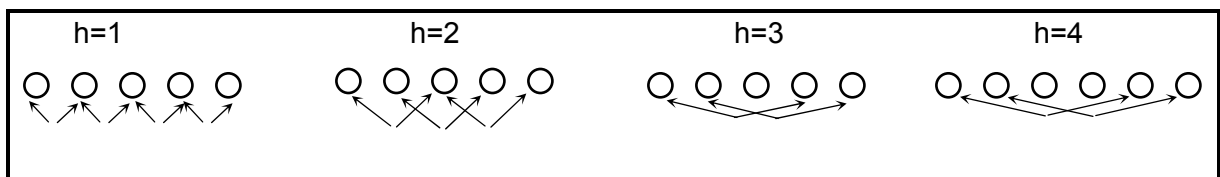


Figura 5. Observación de Puntos igualmente espaciados

En la figura anterior se observa un ejemplo de cómo se toma la distancia de los puntos, teniendo en cuenta que: Para $h=1$, la semivarianza es calculada con valores de puntos adyacentes. La semivarianza para $h=2$ se calcula con los valores de los puntos separados por una posición. Para $h=3$, los puntos comparados están separados por dos posiciones. Y para $h=4$ los puntos comparados están separados por tres posiciones. La semivarianza para valores mayores de h , es calculada de manera análoga.

Semivariograma: Al calcular las semivarianzas para diferentes valores de h , se puede graficar los resultados en un semivariograma, tal como lo muestra la siguiente figura:

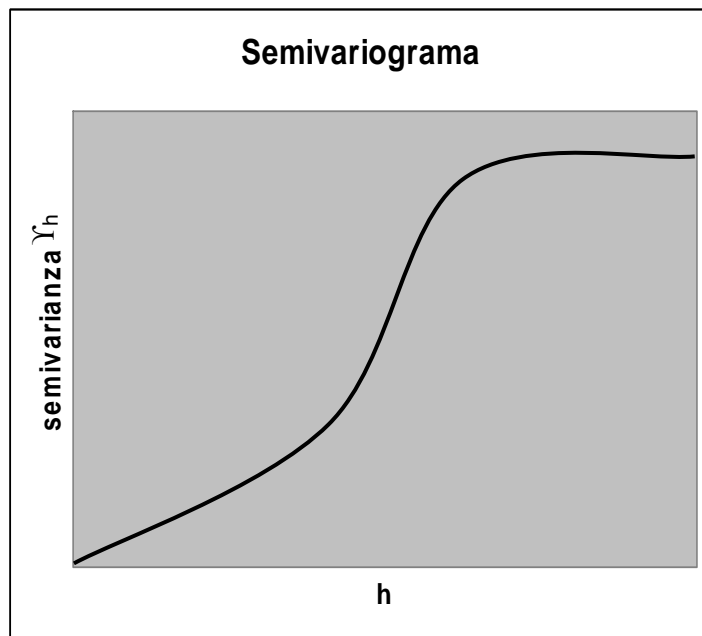


Figura 6. Semivariograma

La grafica superior muestra la relación de la magnitud h vs. la semivarianza. En está figura se observa como crece h a medida que aumenta la semivarianza; el intervalo donde no varia la semivarianza se denomina **umbral**. Nótese también que cuando la distancia h entre los puntos de muestra es cero, el valor de cada

punto está siendo comparado consigo mismo, por lo tanto, la semivarianza es cero. Si h es una distancia corta, los puntos que están siendo comparados tienden a tener valores muy similares, y la semivarianza es un valor pequeño. A medida que se incrementa h , los puntos que se comparan están cada vez más lejos, por consiguiente la semivarianza empieza a tomar valores más grandes.

En alguna distancia h , los puntos están tan apartados que entre ellos no existe relación alguna, y sus diferencias cuadradas llegan a ser igual en magnitud a la varianza. En estos puntos, la semivarianza no se incrementa y el semivariograma describe una región plana llamada **umbral**.

El cálculo de la dimensión fractal por medio del método de Variogramas debe seguir los pasos que a continuación se describen:

1. Construir el semivariograma (γ_h vs. h)
2. Realizar la gráfica de $\log(\gamma_h)$ vs. $\log(h)$
3. Calcular la pendiente θ de la regresión lineal de la gráfica
4. Hallar la dimensión fractal mediante la siguiente expresión **(8)**

$D = 2 - \frac{\theta}{2}$	Ec. (8)
----------------------------	----------------

Donde θ es la pendiente calculada de la regresión lineal de la gráfica logarítmica

Este método es usado para producir dimensiones fractales consistentes cuando es aplicado a rasgos que contienen diferentes dimensiones topológicas. Estudios realizados por Klinkenberg y Goodchild (1992), en Klinkenberg (1994), prueban que la dimensión fractal de los contornos proveniente del método de variogramas

es igual a la dimensión fractal de superficies. Este método presenta inconvenientes cuando los puntos de datos están dispersos en la grafica logarítmica ya que puede causar algunas inestabilidades en los parámetros derivados de los mínimos cuadrados.

Según Lovejoy y Schertzer (1987), en Klinkenberg (1994), este método solamente tiene en cuenta el escalamiento natural de las fluctuaciones verticales, mientras que el escalamiento en las estructuras horizontales no lo admite.

2.3 Conceptos Geológicos

2.3.1 Introducción a las fracturas.

Las fracturas son características de las rocas afectadas por esfuerzos tectónicos o cambios diagenéticos y representan una buena opción para el entrapamiento de cualquier yacimiento mineral. En la actualidad los yacimientos en los cuales las fracturas naturales tienen un efecto significativo sobre las características que definen el flujo de fluidos son denominados Yacimientos Naturalmente Fracturados.

La manera como se comportan las fracturas y las características de las mismas están siendo estudiadas mediante métodos directos e indirectos, los cuales son la base para entender el mecanismo al que esta sujeto toda la unidad rocosa y además comprender el efecto de estas fracturas sobre el yacimiento.

2.3.2 Conceptos Previos.

Fractura: Se denomina fractura natural a una discontinuidad planar causada por la pérdida de cohesión del material en el momento en el que toma lugar el movimiento que resulta de los esfuerzos que exceden la resistencia a la ruptura de la roca. (Stearn, et al, 1965 en Borrero M. 2003); en Nelson (1985) está definida la fractura como una característica de la roca debido a la deformación o a la diagénesis física; según Engelder et al, 1993 en Sevillano A. 2000 una fractura es una discontinuidad de la roca planar o curviplanar originada a partir de un proceso de deformación frágil que da lugar a la separación o deslizamiento relativo de los bloques a ambos lados del plano de rotura. Las fracturas se han estudiado desde diferentes puntos de vista, y por consiguiente existe una gran variedad de clasificaciones, dependiendo del interés del estudio y de lo que se quiere lograr, algunas de esas clasificaciones se mencionarán a continuación.

Algunos geólogos diferencian los tipos de fractura en función del modo en que se produce la propagación de la misma y el desplazamiento relativo de los bloques afectados, así como, de la naturaleza de los esfuerzos; Anderson (1953) en Sevillano A. (2000), clasificó las fracturas bajo tres tipos principales, (Figura 7).

Fracturas Modo I (de apertura, “*opening*”): Son fracturas de tensión, en las que se produce la separación de los bloques perpendicular al plano de la fractura, sin movimiento de cizalla y bajo la acción de esfuerzos efectivos tensionales normales al plano de fractura.

Fracturas Modo II (de deslizamiento, “*sliding*”): Son fracturas de cizalla, que producen un deslizamiento paralelo al plano de fractura y perpendicular a su frente. Se desarrollan bajo la acción de esfuerzos cuya orientación es perpendicular al frente de fractura.

Fracturas Modo III (de desgarre, “tearing”): Son semejantes a las mencionadas anteriormente, fracturas de cizalla que presentan un movimiento paralelo al plano de fractura y al frente de la misma. Se desarrollan bajo la acción de esfuerzos también paralelos al frente de fractura.

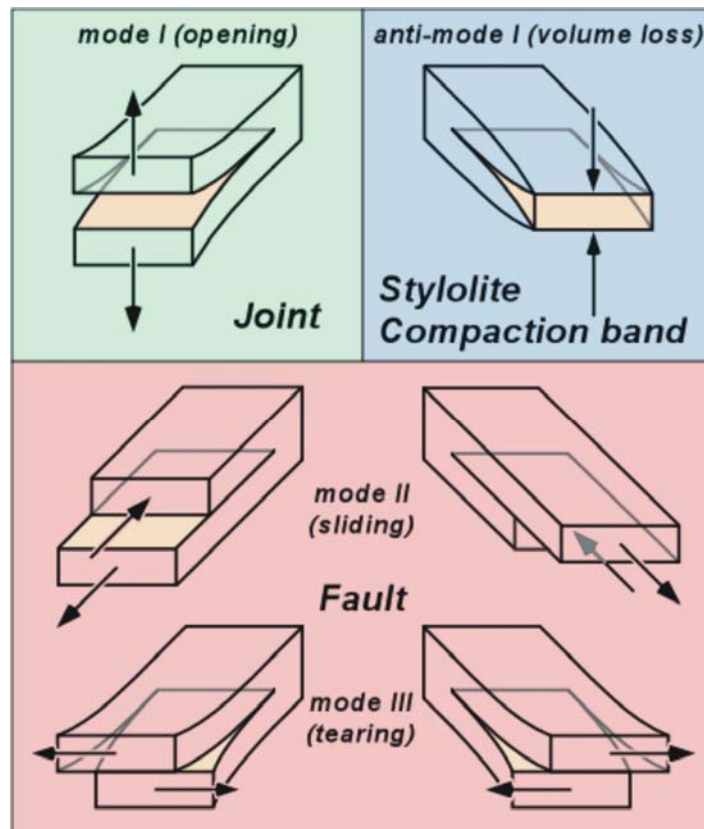


Figura 7. Tipos de Fractura en función del modo en que se propagan

Basados en la clasificación anterior y según lo observado en la figura superior (figura 7), este trabajo concentra el estudio en las fracturas de Modo I, las fracturas de Modo II y Modo III suelen denominarse fallas. Además de estas fracturas cuya formación responde únicamente a la acción de un régimen de esfuerzos, se producen en la naturaleza otras originadas debido a la actuación conjunta de dos regímenes de esfuerzos distintos, de este modo se originan las fracturas mixtas: **Modo I+II** y **Modo I+III**, (Younes y Engelder, 1999 en Sevillano A. 2000).

Falla: Es una superficie de fractura comúnmente plana a lo largo de la cual ha habido permanente desplazamiento. Es un caso de fractura en una masa de roca. Es un tipo de fractura natural en la roca formada predominantemente por fracturas del Modo II o del Modo III y que están asociadas a fracturas de cizalla, en la cual ha existido movimiento.

Las fallas se han estudiado desde varios puntos de vista y por ende existe una gran variedad de clasificaciones, dependiendo del interés del estudio y del objetivo que se quiere lograr, a continuación se nombra una de sus clasificaciones geológicas más usada que está basada en la orientación del vector de deslizamiento. Para esta clasificación se tienen principalmente dos tipos de fallas (Figura 8 y 9).

Fallas “*Strike-Slip*”: Son fallas en las cuales el vector de deslizamiento es predominantemente horizontal, donde el desplazamiento de los bloques ocurre paralelo al plano de falla y pueden ocurrir movimientos hacia la dirección derecha o izquierda (Figura 8).

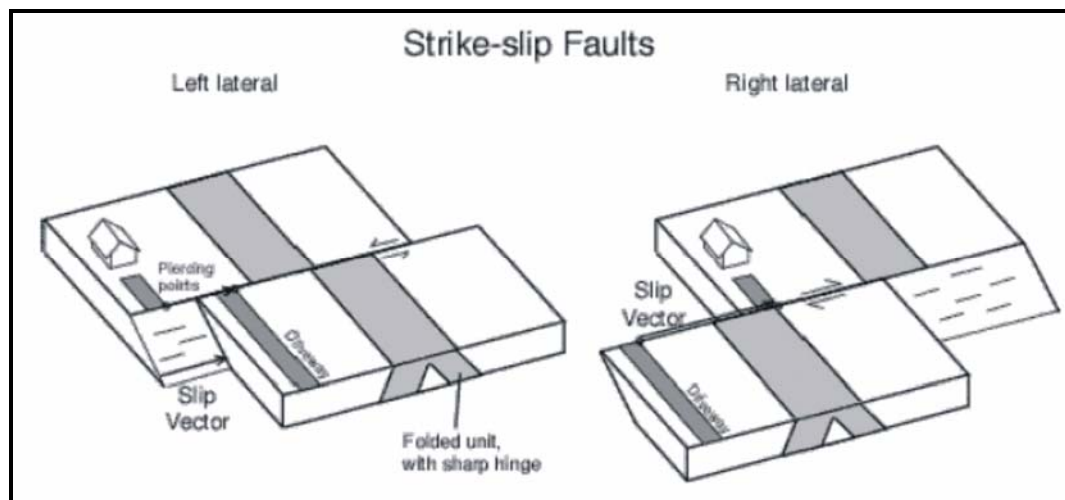


Figura 8. Tipos de falla basados en la orientación del vector de deslizamiento en el cual se observa los dos tipos de movimientos que pueden ocurrir en el caso de las fallas tipo “*Strike-Slip*”

Fallas “*Dip-Slip*” : Son fallas en las cuales el vector de deslizamiento es paralelo a la inclinación del plano de falla, es decir que este movimiento tiene componente tanto en el plano vertical como en el plano horizontal, en este tipo de falla se pueden observar dos tipos de movimientos relativos en los cuales uno de los bloques se desplaza hacia abajo con relación a la base de la superficie y el otro se mueve hacia arriba(Falla Normal), y el otro movimiento ocurre cuando el techo del estrato sube con relación a la base del mismo(Falla Inversa)(Figura 9).

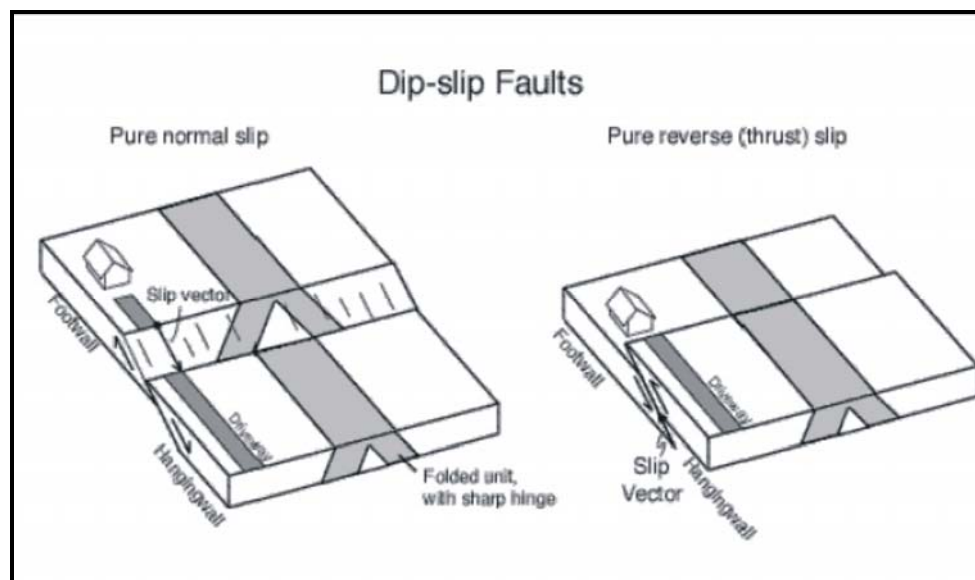


Figura 9. tipos de falla basados en la orientación del vector de deslizamiento en el cual se observa los dos tipos de movimientos que pueden ocurrir en el caso de las fallas tipo “*Dip-Slip*”

Diaclasa: Son un tipo de fractura cuyo estudio comenzó ya a finales del siglo pasado. La terminología que hace referencia a las fracturas en las que se produce apertura (Modo I), es decir desplazamiento perpendicular al plano de fractura, ha dado lugar a una amplia y controvertida cantidad de términos. Cuando estas fracturas no están rellenas, son denominadas *diaclasas* (Badgley, 1965 en Sevillano A. 2000), *fracturas de extensión* (Griggs y Handin, 1960 en Sevillano A.

2000) o incluso *grietas de tensión* (*gashes*), (Blés y Feuge, 1986 en Sevillano A. 2000). Desde este punto de vista existe una gran controversia. Inicialmente algunos autores utilizaron el término *fracturas de tensión* (Van Hise, 1896 en Sevillano A. 2000), para designar las diaclasas porque pensaban que éstas se formaban bajo la acción de esfuerzos de tensión remotos (entendiendo el concepto “remoto”, como aquel esfuerzo aplicado desde una distancia muy grande en relación a las dimensiones de la fractura, longitud y altura). El término *diaclasa* (*joint, en lengua inglesa*) es utilizado en la actualidad, preferiblemente para aquellas fracturas de apertura producidas bajo una tensión neta y perpendicular al plano de fractura; mientras que el término *fracturas de extensión* queda restringido a las originadas por compresión en el laboratorio bajo pequeñas presiones de confinamiento (P_c).

El estudio de las diaclasas hizo pensar que la extensión se producía en gran cantidad de situaciones y ambientes distintos en la corteza terrestre, de modo que se observaron diaclasas en la cresta de anticlinales, otras producidas por enfriamiento de cuerpos ígneos o de sedimentos, etc. Además se comprobaron anteriores afirmaciones, tales como, las diaclasas se originan bajo una tensión neta, produciendo apertura sin presentar movimientos de cizalla y que se propagan perpendiculares al esfuerzo principal menor.

Sin embargo, las diaclasas pueden formarse también sin necesidad de una tensión remota, bajo la acción de una importante presión de fluido, a una determinada profundidad (Secor, 1969 en Sevillano A. 2000). Experimentos de laboratorio indican también que estas fracturas pueden originarse bajo la actuación de esfuerzos compresivos (Griss y Handin, 1960 en Sevillano 2000).

En resumen, la formación de una diaclasa requiere siempre la existencia de una tensión perpendicular al plano de fractura, sin embargo, estas condiciones pueden darse bajo la aplicación de esfuerzos remotos tanto tensionales como

compresivos. De modo que el esfuerzo de tensión perpendicular a la fractura, que se requiere para su desarrollo y propagación, puede obtenerse bajo distintas condiciones en la naturaleza (Engelder, Fischery Gross 1993 en Sevillano A. 2000):

Bajo una tensión absoluta (enfriamiento, plegamiento,...)

Cuando una roca está sometida a una compactación y a un esfuerzo compresivo, si además existe una presión de poro cuya magnitud supera la del esfuerzo compresivo (Secor, 1965 en sevillano A. 2000), entonces el esfuerzo efectivo en la roca es aproximadamente cero. En este caso se produce una tensión efectiva neta (basado en el concepto del esfuerzo efectivo introducido por Hubber y Rubey, 1959 en Sevillano A. 2000) a pesar de la existencia de un esfuerzo compresivo remoto perpendicular al plano de fractura. Esto puede ocurrir bajo una presión de poro hidrostática.

Cuando existe un esfuerzo de tensión cerca del extremo (*tip*) de la fractura mientras que el esfuerzo remoto perpendicular a ella es aproximadamente cero o ligeramente compresivo, la diaclasa puede propagarse sin necesidad de una tensión efectiva neta a lo largo de toda la longitud de la diaclasa.

A partir de todas estas consideraciones las **diaclasas** pueden definirse, como fracturas mesoscópicas que presentan exclusivamente un desplazamiento perpendicular al plano de fractura, es decir, una apertura en la que no se aprecian movimientos de cizalla, esto implica ángulos rectos a la estratificación y en juegos. Pueden propagarse de modo continuo o bien como una serie de fracturas discontinuas que resultan de la aplicación de un esfuerzo de tensión efectivo. Son formadas cerca de la superficie por deformación frágil de la roca.

La consecuencia más importante que de todo esto se deduce, es que las diaclasas son indicadores de la orientación del campo de esfuerzos existente durante el momento de su propagación, esto nos permitirá llegar a algunas de las conclusiones de este estudio tal y como iré explicando en sucesivos capítulos.

Vena: Son fracturas dentro de las cuales ha precipitado algún mineral, dentro de los minerales más comunes en precipitar para formar este tipo de fractura están el yeso y el carbonato de calcio (Calcita), entre otros.

Macrofracturas: Son aquellas fracturas vistas sin tener que hacer uso de algún instrumento en particular, es decir aquellas fracturas que pueden ser observadas a simple vista, como por ejemplo las fracturas que se observan en un afloramiento.

Microfracturas: Son fracturas que necesitan un instrumento como lupa, microscopio petrográfico, microscopio electrónico de barrido (SEM) o sonda de catodoluminiscencia para ser observadas, es decir que a simple vista no se pueden ver.

2.3.3 Caracterización Geológica de las fracturas

Morfología de las fracturas: La morfología de la fractura puede influenciar la permeabilidad y la porosidad de las rocas. La morfología de las fracturas también está relacionada con las características de sus planos de fractura y también con el tipo de relleno de estas; hay cuatro tipos básicos de planos de morfología de fracturas según Nelson (1985):

1. Fracturas Abiertas: Como su nombre lo dice no poseen material de relleno entre las paredes de las fracturas. Estas fracturas son potencialmente conductos abiertos para el flujo de fluidos. En general, las fracturas

abiertas aumentan ampliamente la permeabilidad del yacimiento que es paralelo al plano de fractura.

2. Fracturas Deformadas: Son fracturas que inicialmente fueron abiertas y han sido subsecuentemente alteradas físicamente por posteriores movimientos tectónicos de cizalla, pueden ser de dos tipos:
 - Fracturas rellenas de “*Gouge*”: El “*gouge*” está definido como un material finamente corroído que se presenta entre las paredes de la fractura como resultado de la trituración o por el movimiento de desplazamiento. Las fracturas rellenas de “*gouge*” son frecuentemente las morfologías de fracturas más fáciles de observar en corazones o afloramientos, porque el material “*gouge*” es usualmente más resistente al intemperismo y a la abrasión que las rocas no fracturadas.
 - Fracturas “*Slinkensides*”: Los “*Slinkensides*” son superficies pulidas o estriadas que resultan de la fricción a lo largo de los planos de fractura. Como resultado de esta deformación hay una disminución en la permeabilidad en la dirección perpendicular a la superficie que se desliza. Dentro de este tipo de morfología se pueden establecer algunas características denominadas por Kulander et al (1984) en Borrero M. (2003): “*Slickenlines*” son ranuras o marcas grabadas dentro de la superficie de falla por partículas duras durante el deslizamiento y los “*Slickenfibers*” que son minerales fibrosos que crecen paralelos a las direcciones de desplazamiento local durante el movimiento de la falla; los “*Slickencryst*” incluyen minerales fibrosos o cristales que son alineados en ángulo estrecho a la pared de la fractura.
3. Fracturas Rellenas: Como su nombre lo dice son fracturas que han sido rellenas por mineralización secundaria o diagenética. En este caso la

permeabilidad depende de si esta o no completamente rellena y de la historia diagenética del material. Las fracturas rellenas son muy comunes y ocurren frecuentemente en areniscas, esquistos y calizas. Este tipo de fracturas puede presentarse completamente relleno o parcialmente relleno, en el primero de los casos el sistema de fractura no actúa positivamente en el yacimiento; para el segundo caso existe un espacio poroso limitado dentro del material de relleno, frecuentemente, la porosidad secundaria desarrollada en la fractura rellena es el resultado de la disolución de la calcita.

4. Fracturas “*Vuggy*”: Este tipo de fracturas no están consideradas como una verdadera morfología de fracturas, estas fracturas representan una alteración de la matriz alrededor de la fractura. Se forman cuando los fluidos entran a una roca de permeabilidad baja a lo largo de los planos de fractura; si el fluido está en desequilibrio con la matriz de la roca, puede ocurrir disolución. Las fracturas “*vuggy*” están frecuentemente asociadas a inconformidades en los carbonatos y al desarrollo de “*Karst*”; la porosidad secundaria asociada con estas fracturas puede ser más grande que los valores de porosidad en las fracturas normales.

Otro tipo de clasificación de acuerdo a la morfología de las fracturas y a su conectividad es la siguiente:

5. Fracturas Aisladas: Son definidas por ser fracturas simples, no están conectadas o sobrepuestas con otras fracturas dentro de una dirección o menor que la longitud de las fracturas.
6. Fracturas en Echelon: En contraste con las fracturas aisladas, tienen espaciamiento cerrado, fracturas subparalelas y tienen sus terminaciones sobrepuestas.

7. Fracturas “*Linked*”: Son fracturas que están conectadas, se refiere a dos o más fracturas en echelon que son conectadas durante un tercer estado de fracturamiento. En algunas ocurre traslape de segmentos y mantienen una continuidad entre las paredes de la roca o los lados de la fractura.

2.3.4 Clasificación de las Fracturas

La clasificación genética de las fracturas presentada a continuación está basada en Stearn y Friedman (1972):

Fracturas Tectónicas: Tienen una orientación, distribución y morfología asociada con eventos tectónicos; se forman por la aplicación de fuerzas de superficie, Nelson (1985) afirma que en afloramiento estas fracturas tienden a ser mayores. Se subdividen en dos categorías: fracturas asociadas a procesos de fallamiento y fracturas asociadas a procesos de plegamientos. Las fracturas que se desarrollan en los alrededores de una falla puede presentarse de diferentes maneras, tal como, fracturas de cizalladura paralelas a la falla, fracturas de cizalladura conjugadas a la falla o fracturas de extensión que dividen el ángulo agudo entre los dos tipos anteriores; la intensidad del fracturamiento asociado con el fallamiento parece ser función de la litología, la distancia a los planos de falla, al esfuerzo total de la masa de roca, profundidad de enterramiento y al tipo de falla.

En las fracturas asociadas con plegamientos, los patrones de fractura que se desarrollan en los pliegues son muy complejos y no siempre están relacionados a esfuerzos regionales. Las fracturas tectónicas son el tipo de fractura más importante con respecto a la producción de hidrocarburos.

Fracturas Regionales: Se desarrollan a través de grandes áreas de la superficie, los cambios en la orientación son muy leves. Este tipo de fracturas generalmente

se desarrolla en conjuntos ortogonales a la estratificación y a menudo cambia de dirección al cambiar de formación. No están relacionadas con estructuras locales y en algunos casos son superpuestas a fracturas tectónicas.

Fracturas Diagenéticas: Esta clase de fracturas esta asociada a la reducción del volumen en la roca; son formadas debido a cambios genéticos en la roca, las más comunes son:

- Fracturas de Desección: Se forman en superficies inconsolidadas de Shale o sedimentos ricos en arcillas, su formación se debe al secamiento por la pérdida de agua (reducción de volumen). Ocurren en sedimentos delgados y superficiales (No son relevantes en la producción de hidrocarburos), toman formas de mallas de polígonos.
- Fracturas de Sinéresis: Son llamadas fracturas de “*Chickenwire*”, se forman como resultado de los cambios químicos que promueven la deshidratación de los sedimentos. Pueden llegar a tener relevancia en la producción de hidrocarburos debido al tipo de roca en la cual ocurren y a la interconexión del sistema de fracturas en 3D. Suelen ocurrir en Shale y lutitas.
- Fracturas Térmicas: Ocurren por enfriamiento de la roca, los esfuerzos de tensión térmica suelen ser compensados con esfuerzos de compresión por compactación. De esta manera el efecto que este tipo de fractura causa en la producción de hidrocarburos suele ser despreciable.
- Fracturas por cambios en las facies minerales: Son virtualmente idénticas a las de sinéresis, pero se forman durante la reducción de volumen asociada con cambios mineralógicos, tal como, calcita a dolomita o motmorillonita a illita.

- Fracturas de superficie: Esta clase de fracturas incluye fracturas desarrolladas por descarga litostática y son en general debidas a procesos de meteorización. Deben reconocerse con respecto a las fracturas que se generan y preservan en el subsuelo. Estas fracturas tienen una morfología muy irregular.

2.4 Toma de datos de Fracturas

El trabajo de tomar los datos de fracturas y sus atributos, merece una especial atención, ya que el grado de detalle es importante porque determina la resolución y el grado de precisión en la compilación de estos atributos.

Existen varias formas de coleccionar los datos de las fracturas:

Usando datos de pozo: Los pozos raramente interceptan las macrofracturas por la verticalidad de las fracturas en muchos casos paralela al pozo o porque el espaciamiento entre las fracturas es mayor que el diámetro del pozo. El estudio de microfracturas provee una herramienta útil, ya que estas son más abundantes y pueden ser coleccionadas sistemáticamente de áreas pequeñas con muestras orientadas.

Usando datos de afloramiento: Para el trabajo a realizar, se utilizará la información coleccionada de las fracturas a escala de afloramiento, en la cual se tienen en cuenta los atributos de estas fracturas con el propósito de predecir más adelante el comportamiento de los patrones de fracturamiento a diferentes escalas.

Según Gómez (2002), los afloramientos son importantes para caracterizar fracturas por las siguientes tres razones:

1. Proveen abundante información sobre diagénesis y tectónica.
2. Permiten calibrar las técnicas de detección.
3. Permiten estudiar postulados sobre evolución de los sistemas fracturados.

El propósito de medir los patrones de fracturamiento en campo es establecer las orientaciones y características morfológicas de los patrones de fracturamiento y llegar a extrapolar estas medidas de superficie al subsuelo. La predicción puede ser incierta pero un estudio cualitativo de las condiciones en la superficie, sumado a la evolución estructural del área conduce a entender las características de un yacimiento en el subsuelo.

Las fracturas comúnmente ocurren en patrones compuestos por varios miembros subparalelos o paralelos y una región en particular puede ser cortada por varios patrones de fracturas. Cada arreglo de fracturas es llamado sistema de fracturas; esta información ayuda en la determinación de la historia de esfuerzos de una región y de esta manera constituye una herramienta útil en los análisis tectónicos regionales.

2.4.1 Atributos básicos para caracterizar fracturas.

Muchos atributos de las fracturas que son críticos y afectan las propiedades hidráulicas y mecánicas de las rocas del subsuelo son desconocidos; las siguientes características son usadas en el estudio de un sistema fracturado usando muestras de superficie, núcleos o “sidewallcores”, los cuales están determinadas tanto cualitativa como cuantitativamente. Entre las cuales se encuentran:

Orientación: Se refiere a la tendencia de las fracturas en una dirección preferencial. Estos datos deben ser tomados en afloramientos o con muestras

orientadas, para que los datos sean exactos. La orientación no es un criterio suficiente debido a la dificultad de medición en tres dimensiones.

Apertura: (Apertura de desplazamiento), es la distancia entre las paredes de la fractura, medida perpendicularmente a la dirección de la fractura en un plano, incluye mineral de relleno y porosidad preservada.

Espaciamiento: Nelson (1985) lo define como la distancia promedio entre las fracturas regularmente espaciadas medida perpendicular a los juegos de fracturas que tienen una orientación predominante. Este parámetro es importante para medir la porosidad y permeabilidad de la fractura en el reservorio. En afloramiento puede ser medido directamente.

Tipo de relleno: Se refiere al material que esta presente en las fracturas. Si la fractura es abierta puede ser rellena parcial o totalmente de minerales de calcita, cuarzo, arcilla, etc. El tipo de relleno también puede ser cemento, el cual se puede definir mediante análisis petrográficos.

Facies: Se refiere a las características sedimentológicas de la roca en donde se encuentra la fractura.

Longitud: Es la distancia medida entre los extremos visibles de la fractura. En afloramiento la medida de la longitud es complicada debido a los cambios en la exposición de las capas fracturadas. El mejor criterio para medir es identificar la terminación de la fractura.

Densidad: Es un criterio cuantificable el cual tiene en cuenta la cantidad de fracturas que existen en un espacio determinado.

2.4.2 Aspectos teóricos de rocas calcáreas

Las rocas de la formación Rosablanca se definen como calizas debido a su alto contenido de calcita con variaciones locales de yeso, dolomita, siderita y ankerita. Este tipo de roca se deposita predominantemente en aguas cálidas ($>25^{\circ}\text{C}$) y poco profundas pero con diferencias en el nivel de energía de las corrientes oceánicas.

El área de estudio está asociada a condiciones únicas y ambientes propicios para la formación de yeso, es decir ambientes *Sabkha* en donde el proceso de evaporación ocurre en la zona vadosa y en la parte superior del nivel freático.

Al igual que las rocas siliciclásticas, las rocas calcáreas también poseen una clasificación basada en los constituyentes primarios, los cuales son básicamente tres:

Componentes aloquímicos: Son las partículas propias de la cuenca de depositación que pueden haber tenido o no transporte. A este grupo pertenecen los fragmentos o partes de fósiles como bivalvos, equinodermos, braquiópodos, etc., que pueden o no estar en posición de crecimiento y los intraclastos. Estas partículas están consideradas como el armazón de la roca.

Componentes ortoquímicos: Son materiales producidos por precipitación química dentro de la cuenca y no tienen evidencia de transporte, dentro de este grupo se encuentran la micrita, esparita, y dolomita de origen diagenético. En muchas ocasiones se consideran como los materiales constituyentes de la matriz y el cemento de la roca.

Componentes terrígenos: Son los materiales derivados de la erosión de áreas fuera de la cuenca de depositación y transportadas dentro de la misma como

sólidos, dentro de estos se encuentran los fragmentos de rocas y minerales como el cuarzo, hematita, feldespatos, micas, etc.

La formación Rosablanca se observa afectada por procesos diagenéticos, los cuales están controlados por factores como: composición, presión (debido al enterramiento), temperatura, composición y naturaleza de los fluidos, etc.; Estos cambios diagenéticos se reflejan en la transformación de la composición y las características texturales de la roca y por lo tanto en las características como permeabilidad y porosidad de la roca.

2.5 La geometría fractal y las redes de fracturas

La geometría fractal se considera una buena opción para describir y cuantificar muchos fenómenos naturales, ya que ésta tiene en cuenta la rugosidad de las superficies y la geometría aleatoria del medio; en el caso de las redes de fractura la geometría fractal proporciona una alternativa muy llamativa, porque al emplear la técnica de Box-Counting para calcular la dimensión fractal de las redes de fracturas se tiene en cuenta la cantidad de fracturas que están contenidas en un espacio determinado y el tamaño de las celdas que contienen las fracturas, esto implica una relación directa con la densidad de fracturas el cual es un parámetro cuantificable para caracterizar las fracturas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, la geometría fractal es útil en la caracterización de las redes de fracturas porque permite observar la distribución espacial de los patrones de fracturamiento y el comportamiento de los mismo cuando varia alguna propiedad de la red de fracturas, lo cual se identifica en las mediciones de la dimensión fractal. Si se tiene en cuenta las implicaciones de las redes de fractura en un yacimiento naturalmente fracturado, hablar de la caracterización de las fracturas usando el método de Box-Counting ayudaría a

reducir la incertidumbre que genera este tipo de yacimientos, ya que la geometría fractal introduce los efectos de la escala con la dimensión fractal; lo que permite evaluar el comportamiento de las redes de fracturas y los efectos de la escala en las mismas.

Este estudio hizo medición de la dimensión fractal en la Formación Rosablanca a escala mesoscópica o de afloramiento, posteriores estudios podrán abordar mediciones microscópicas que deberán arrojar resultados similares a los obtenidos para esta Formación. A medida que se integren diferentes escalas de estudio se mejorara la predicción de aquellas que no sea posible integrar por su tamaño.

3 ASPECTOS GENERALES

3.1 Localización Geográfica

El área esta situada a 62 Km. Al sur de Bucaramanga, sobre el cañón del río Chicamocha-Sogamoso, en las vecindades de su confluencia con el Suárez, en el municipio de los Santos, departamento de Santander. Limita por el norte con los municipios de Girón y Piedecuesta, por el Oriente con Aratoca, por el Sur con Jordán y Villanueva, y por el Occidente con Zapatota (Figura 10).

De acuerdo con la nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (I.G.A.C.), la zona de trabajo se encuentra localizada dentro de las planchas 135-II-A y 120-IV-C, a escala 1:25000 y en las planchas 120-IV-C-3, 120-IV-C-4, 135-II-A-1 y 135-II-A-2 a escala 1:10000, enmarcada entre las coordenadas geográficas:

X: 1.242.250 – 1.242.600

Y: 1.097.350 – 1.097.700

Geológicamente se sitúa al SW del Macizo de Santander en la región de la Mesa de los Santos, aledaña al cañón del río Chicamocha, en el lado oriental de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Figura 10. Localización del área de estudio

3.2 Vías de Acceso

Se llega al área estudiada por la carretera pavimentada Bucaramanga-San Gil hasta el sitio de Los Curos, a 31 Km. de Bucaramanga, donde aparta la carretera destapada que conduce a la población de los Santos a 35 Km. de distancia. De este municipio se sigue por un carreteable en regulares condiciones, el cual se bifurca a 7 Km. Llegando al ramal del Norte a la mina El Carrancho, sector El Guayacán (18 Km.) y el del Sur a la mina La Caldera, Sector el Toro (9 Km.).

3.3 Clima Y vegetación

En esta área donde aún se dejan sentir los vientos Alisios del Nordeste, predomina un clima Cálido-árido, con altas temperaturas que oscilan entre 30°C-40°C, y baja pluviosidad, lo cual incide en el desarrollo de una vegetación escasa, de tipo desértico, caracterizada por arbustos espinosos, tales como Guazábara, Bagari y diferentes especies de cactus. La capa vegetal es muy delgada y en algunos sectores no existe, además la ausencia de árboles maderables es absoluta.

3.4 Topografía y Drenaje

La zona corresponde geomorfológicamente a una gran meseta marginal profundamente disectada por erosión de los ríos Chicamocha, Sogamoso y Suárez; presentando una topografía abrupta con alturas que varían entre 400 y 1.100 m.s.n.m., y pendientes entre 25° y 90°. Estos ríos han labrado profundos cañones hasta de 600 metros de altura, de escarpadas paredes, dividiendo la meseta primordialmente en una serie de mesetas tales como Los Santos, Ruitoque, Zapatoca y Barichara.

Los afluentes menores del sistema hidrográfico principal Chicamocha-Suárez-Sogamoso, los constituyen en el área, torrentes de carácter invernal, los cuales se precipitan por los flancos de los cañones y por causa de la escasa vegetación, han labrado profundas incisiones en ellos. De estos torrentes, el único en las vecindades con mínimo caudal de agua permanente es la Quebrada de Los Santos, de la cual se obtiene el agua para el acueducto de la población de Los Santos.

3.5 Metodología

Uno de los puntos más importantes para que un proyecto sea desarrollado con éxito, es la elección adecuada de la metodología, de acuerdo a la clase de proyecto a desarrollar, ya que ésta es la que guiará la definición de tareas y la secuencia de las mismas en el proceso de desarrollo del proyecto, además contribuirá a optimizar el tiempo de duración del mismo.

La metodología utilizada en este proyecto se fundamentó en cinco etapas principalmente:

3.5.1 Etapa de Precampo

En la cual se realizaron varias actividades que se mencionarán a continuación:

Recopilación y análisis de la información existente, revisión bibliográfica de material de consulta en la biblioteca de la UIS, ICP e Internet.

Selección de área de estudio y reconocimiento de la zona, en donde se consideraron varias situaciones logísticas que fueron tenidas en cuenta para la realización del trabajo en esta área.

3.5.2 Recolección de Datos y muestras en campo:

Esta etapa del proyecto se realizó en los túneles de la mina el Carrancho, por ser un área de fácil acceso que hace factible la recolección de la información, además posee un alto contenido de fracturas y esto hace posible que la adquisición de los datos sea de buena calidad. La toma de datos se centro básicamente dentro de los túneles de explotación, los cuales exponen extensas áreas de superficie perpendiculares a la estratificación, así como también paralelas a los estratos, esta adquisición se realizó de manera técnica ya que se contó con el uso de un Nivel Láser, que es una herramienta que permite obtener información en 3D, ya que emite tres rayos luminosos de direcciones diferentes, el sistema de energía con que cuenta el equipo es de batería teniendo un alcance areal de más de cien metros, los puntos de intersección de las fracturas se adquirieron con esta herramienta.

Los datos de fracturas fueron tomados por medio de “**scanline**” la cual corresponde a una línea que posee una dirección preferencial y para este caso de estudio se tomaron en varios tramos de “**scanline**”, ya que así lo permitía el terreno. A lo largo de esta línea se tomaron atributos como dirección de fracturas, la cual se realizó haciendo una proyección de esta sobre el piso del túnel y observando los puntos de corte con el “scanline”, el espaciamiento también se observó sobre dicha línea.

En el caso de las medidas de campo para corregir los errores se tuvo en cuenta que la línea del scanline estuviera más hacia la derecha y que no hubiera muchas fluctuaciones en la superficie, también el momento de la lectura para la orientación

de la fractura se tubo en cuenta que la brújula se encontrara lo más nivelada posible, al igual que el Nivel Láser, ya que esto evita que se tengan algunas imprecisiones en la medida y en la lectura de la misma.

3.5.3 Tratamiento y análisis de los datos

Los datos de fracturas obtenidos en campo se procesaron mediante el método de las proyecciones estereográficas usando el programa Georient, también se realizaron histogramas relacionando las direcciones de las fracturas con el número total de las mismas.

Se elaboró el mapa de fracturas para la mina “El Carrancho” teniendo en cuenta las orientaciones obtenidas en campo y facilitar así el proceso de análisis fractal en sectores que contengan gran cantidad de fracturas naturales y posteriormente relacionar estos dos parámetros.

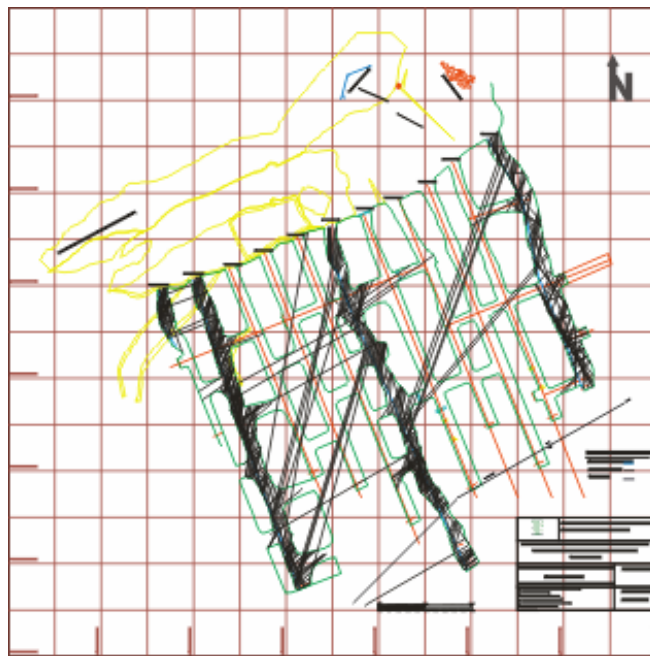


Figura 11. Mapa de Fracturas “Mina el Carrancho”. Escala 1:500

En el Mapa de la figura 11 los túneles están numerados de derecha a izquierda en forma ascendente y los trazos de las fracturas se realizaron en los túneles: 1, 6, 10 y 11. Para una mejor observación del mapa de fracturas remítase al **ANEXO A**.

3.5.4 Determinación de la dimensión fractal

Para obtener la dimensión fractal de las fracturas a la escala macro, se utilizarán algunos métodos mencionados en el artículo de Brian Klinkenberg⁵, los cuales se mencionarán enseguida con una breve descripción: -**Box counting** su procedimiento se basa en cubrir la superficie total del objeto con una sucesión de mallas cuadradas y simplemente se cuenta el número de cuadros en los cuales aparece el objeto, la dimensión fractal se deriva de una gráfica logarítmica del número de cuadros ocupados vs. la escala del cuadro. -“**Variogram Analysis**” este método se basa en el muestreo de un gran número de pares de puntos, (con espaciado diferente), a lo largo del perfil topográfico y las diferencias estimadas en sus valores verticales (por ejemplo, los valores de z) la dimensión fractal puede ser fácilmente derivada de una gráfica logarítmica de (diferencias esperadas en z)² vs. la distancia entre los pares de puntos.

Para esta etapa se utilizarán imágenes de la red de fracturas encontradas en el área de estudio, que fueron obtenidas mediante el uso del programa Adobe Photoshop 7.0 y el cual permite extraer la red de la imagen, para los posteriores análisis.

⁵ Klinkenberg, Brian. A review of Methods Used to Determine the Fractal Dimension of Linear Features. *Mathematical Geology*. Vol. 26. No.1. 1994

3.5.5 Análisis de datos obtenidos

Luego de haber calculado las dimensiones fractales a escala de afloramiento, es necesario relacionar estos resultados con los atributos que se obtuvieron de las fracturas, con el fin de comprobar la validez de los mismos y confirmar la aplicabilidad de la geometría fractal a las redes de fracturas.

3.6 Estudios Anteriores

Son varios los estudios geológicos realizados en el área de La Mesa de los Santos. Las primeras publicaciones están relacionadas con el conocimiento de la geología de la Cordillera Oriental en este sector, estudiado por Julivert (1958y 1961). Zamarreño (1963), presenta la descripción petrográfica de la Formación Rosablanca en la sección aflorante en el cañón del río Sogamoso, al W de La Mesa de los Santos en la quebrada Lagunetas. La sucesión tiene unos 318 m. de potencia, en campo. Zamarreño diferencio los siguientes niveles de base a techo: calizas dolomíticas, micrita, micritas fosilíferas, esparita, intramicrítas, biomicrítas y micritas fosilíferas, intramicrítas, micritas fosilíferas, ortocuarцитas y un último nivel de biomicrítas.

Posteriormente se publica el Proyecto Cretácico en donde en donde se encuentran los estudios de Alfonso (1985) y Guzmán (1985). En el primero se realizó una descripción facial y su respectiva interpretación ambiental de la base de la Formación Rosablanca en el sector SW de La Mesa de los Santos. En el segundo estudio, realizado en el área de Zapatoca, se encontraron las especies *aetostreon couloni* y *ceratostreon boussingaulti*, que son interpretadas como indicadores de oscilaciones marinas, ocurridas durante la depositación de la

Formación Rosablanca, en rocas correspondientes a la parte media-superior de dicha formación.

Eljaiek y Moreno (1991), realizaron el estudio de génesis, estratigrafía y evaluación del yeso en las minas de la concesión 2491 pertenecientes al sector SW de la mesa de los santos. Igualmente Macias y Quijano (1993), realizaron un estudio geomecánico de las minas de yeso el “Carrancho” y “La Caldera”, municipio de los Santos Santander. Posteriormente Delgado y Galvis (1994), realizaron la evaluación geológico minera de las calizas en la vereda la Laguneta orientada a la explotación con fines ornamentales.

Ortiz et al. (1997) realizan el estudio “estratigrafía secuencial del grupo calcáreo basal del valle medio del Magdalena”. En este estudio se hace un análisis de estratigrafía de secuencias del cretáceo inferior, a partir de afloramientos que incluyen las formaciones los santos. Cumbre, Rosablanca y Tablazo, con columnas levantadas en los alrededores de los municipios de Zapatota, Barichara y San Vicente de Chucurí, se definieron las facies dominantes, ambientes de depositación y ciclos estratigráficos.

Ortiz et al, (1998), realizan el estudio “evaluación de la calidad de roca reservorio de las formaciones Rosablanca y Tablazo en el Valle Medio del Magdalena”. en este estudio se localizaron las secciones más representativas de las formaciones Tablazo y Rosablanca especialmente en el departamento de Santander, involucra el análisis facial y la interpretación ambiental principalmente para muestras de superficie. Respecto a la Formación Rosablanca, se afirma que la mayor parte de las rocas analizadas son lodosoportadas (wackestone o mudstone de bioclásticos), en menor porcentaje están las rocas granosoportadas (grainstone o packstone), finalmente algunos niveles de rocas terrígenas (subarcosas, litoarenitas).

El aporte más reciente al entendimiento de la geología de la zona fue realizado por Montana y Suárez (2000), con el estudio de ordenamiento territorial del municipio

de los Santos. Seguidamente se encuentra el estudio realizado por Borrero (2003), en el que se realiza una caracterización de fracturas al SW del municipio de los santos, en el sector de la quebrada Chivatera y algunas zonas aledañas a esta.

Algunos estudios más regionales sobre la Formación Rosablanca, realizados fuera del área de interés fueron realizados por Etayo et al, (1985), quien plantea por primera vez, el carácter oscilante del avance del mar durante el cretáceo en Colombia. Cardozo y Ramírez (1985), realizan la descripción facial y ambiental para la Formación Rosablanca en el área de Villa de Leiva y Gambita (Boyacá); Rolón et al, (1999), realizan la adquisición de información de geología de superficie en el Piedemonte del Valle Medio del Magdalena; García et al, (2000), presenta el estudio modelos de generación del petróleo en el Valle Medio del Magdalena y León (2002), realiza el análisis de estratigrafía de secuencias en el Valle Medio del Magdalena.

4 GEOLOGÍA

El área de trabajo a pesar de estar en el flanco oeste del Macizo de Santander, geológicamente está ubicada dentro del llamado Valle Medio del Magdalena (VMM), una región destacada económicamente por presentar unas características petrolíferas importantes. En el VMM se depositaron sedimentos de origen marino y continental que conforman unidades cuyas edades van desde el Jurásico hasta el Cuaternario, las cuales han sido afectadas por eventos tectónicos de tensión y compresión a través del tiempo.

4.1 Geología General

Las rocas aflorantes en la zona constituyen un paquete de areniscas, calizas y arcillolitas principalmente, con edades desde el jurásico, cretáceo inferior, hasta depósitos recientes, correspondientes a las formaciones Girón, Tambor, Rosablanca, Paja y Tablazo.

4.1.1 Estratigrafía

La sucesión estratigráfica definida para el VMM, demarca como basamento económico la Formación Girón y desde esa formación se establece la columna estratigráfica presentada en la figura 12. Las formaciones comprenden rocas desde el Precretáceo representado por el Grupo Girón, (Triásico-Jurásico), sedimentos Cretáceos, pertenecientes a las Formaciones Los Santos (Berriasiano-Hauteriviano), Cumbre (Hauteriviano), Rosablanca (Valanginiano-Barremiano), Paja (Barremiano-Aptiano), Tablazo (Aptiano tardio-Albiano temprano), Simití (Albiano), La Luna (Huroniano-Santoniano), y Umir (Campaniano-Mastrichtiano),

los depósitos Terciarios están representados por las rocas de las Formaciones Lisama (Paleoceno), Grupo Chorro (En algunos sitios se encuentra el denominado miembro Toro Shale), este grupo está conformado por la Formación La Paz (Eoceno Medio-Tardío), y formación Esmeraldas (Eoceno Tardío), Grupo Chuspas, conformado por las formaciones Mugrosa (Oligoceno) y Colorado (Mioceno Temprano), Real (Mioceno Tardío), y Mesa (Plioceno-Pleistoceno).

Dentro del presente informe se detallara únicamente La Formación Rosablanca, ya que es el objeto de la investigación.

4.1.2 Estructural

La cuenca del Valle Medio del Magdalena es un sector altamente afectado por estructuras geológicas que hacen aun más interesante su estudio, ya que se encuentra limitada por las Cordilleras Central y Oriental y así mismo corresponde a una depresión enmarcada por estos dos grandes accidentes geográficos.

Marco Tectónico Regional: Estructuralmente el VMM es una depresión tectónica asimétrica con dos márgenes bien diferentes, su borde occidental está marcado por rocas metamórficas de la cordillera Occidental, de borde pasivo; hacia el oriente la deformación se incrementa y pasa a ser un margen de comportamiento compresional.

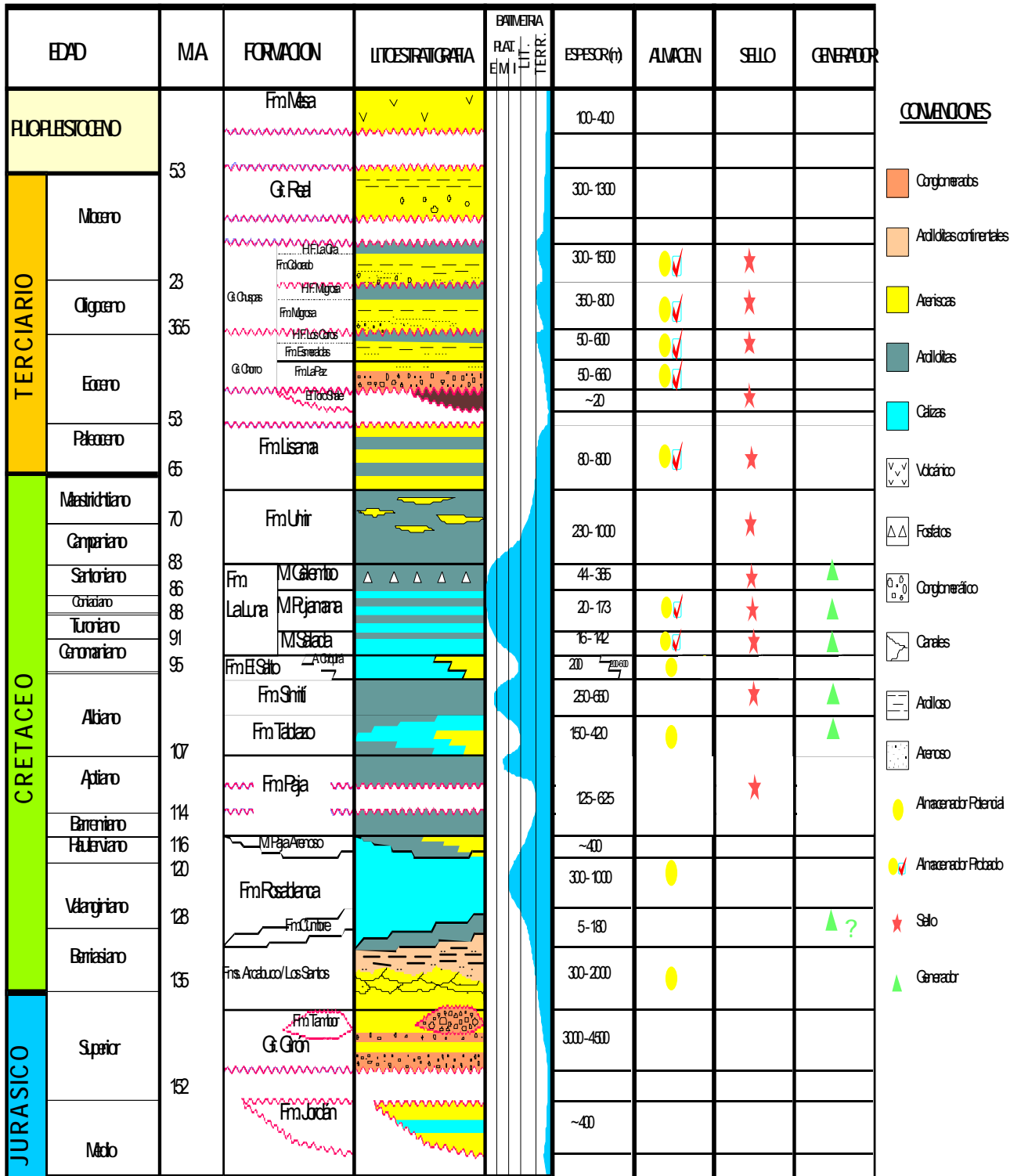


Figura 12. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena (Tomada de Suárez et al., 2000)

El límite occidental corresponde a un complejo de fallas de la Cordillera Central, al sur con la Falla de Palestina; en la parte Norte limita con el Sistema de fallas con rumbo Noreste y vergencia oriental cerca del “Alto del Banco”, las cuales corresponden a fallas satélites de la Falla Palestina. Al Oriente su límite con la Cordillera Oriental se caracteriza por sistemas de cabalgamiento con vergencia occidental que se van presentando en relevos continuos hacia el norte hasta truncar con el sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, que corresponde al límite nororiental de la cuenca contra el Macizo de Santander (Suárez et al., 2000).

Según Suárez et al., 2000, la sección Cretácea del VMM está afectada por tres estilos estructurales; (Ver figura 13). Estos se formaron durante dos episodios tectónicos mayores; el primero de ellos asociado al levantamiento de la Cordillera Central, ocurrido durante el periodo Paleoceno tardío-Eoceno temprano, el segundo evento tectónico está relacionado al levantamiento de la Cordillera Oriental ocurrido durante el lapso Mioceno medio-Plioceno. Los tres estilos estructurales que se presentan dan lugar a tres grandes zonas, las cuales se presentan seguidamente de la siguiente manera; la primera zona es el borde noroccidental o zona Transpresiva se caracteriza por fallas transpresionales regionales con tren nororiental y vergencia principalmente oriental; La zona media (parte central o zona deformada compresiva a transpresiva), localizada hacia el norte y centro de la cuenca, por debajo de la discordancia del Eoceno medio se presenta una zona deformada que separa dos depocentros estructurales subregionales que controlaron la depositación de las formaciones La Paz y Esmeraldas. Posiblemente esta zona deformada se encuentra controlada en sus bordes por fallas normales preexistentes del Jurásico; La franja oriental o zona de cabalgamientos donde predomina el carácter compresivo, consiste en un cinturón de cabalgamientos con vergencia occidental que afecta la sección Cretácea, Paleógena y del Mioceno inferior. Este estilo estructural fue ocasionado por pulsos intensos de levantamiento de la Cordillera Oriental ocurridos desde el

Mioceno medio hasta el Plioceno; las fallas en este sector se observan truncadas hacia la parte norte con la Falla Bucaramanga-Santa Marta.

Rasgos estructurales de la zona de estudio: La Mesa de los Santos forma parte del área de Mesas de Santander (Los Santos, Barichara y Ruitoque), hace parte de un bloque fallado en forma de cuña limitado por las Fallas Bucaramanga-Santa Marta y Suárez, el cual se observa hundido e inclinado suavemente hacia el oeste; la zona de las Mesas de Los Santos y Barichara, también presentan un basculamiento en dirección N-S, el lado suroccidental está hundido unos 400 a 500 m.

Los buzamientos en el área son verticales aunque en ocasiones presentan inclinaciones con ángulos inferiores a 90° , es decir, se observa una variación de 80° - 90° ; los plegamientos son muy locales y están influenciados por las fallas locales existentes; el diaclasamiento es el producto de los esfuerzos regionales.

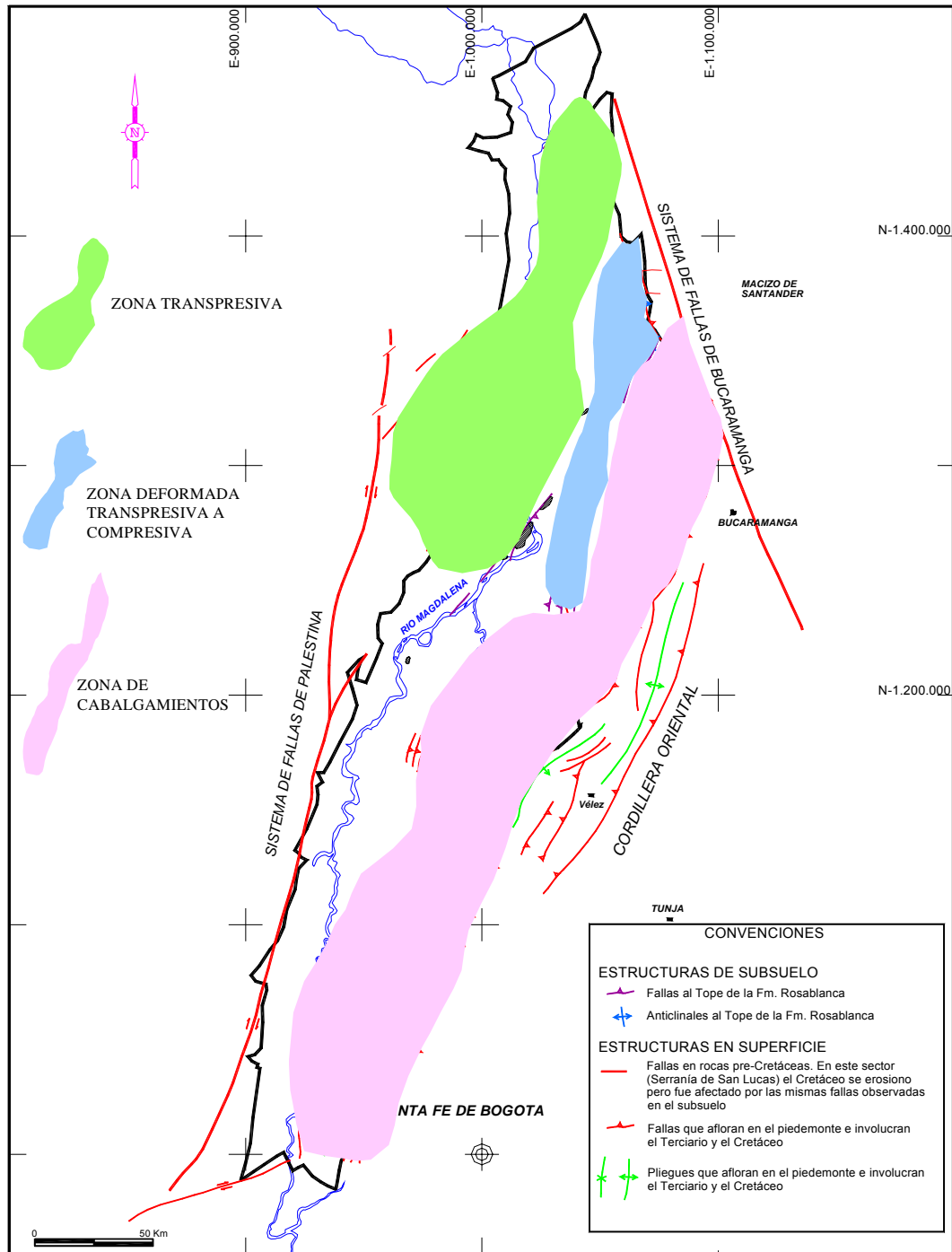


Figura 13. Estilos Estructurales del Valle Medio del Magdalena (VMM)(Tomado de Suárez et al., 2000)

Regionalmente las estructuras más importantes de la Mesa de Los Santos, aledañas a la zona de trabajo son las fallas Bucaramanga-Santa Marta, Suárez, los Santos, Los Teres.

Falla Bucaramanga-Santa Marta: Es una falla de rumbo sinistral de dirección N-NW que puede seguirse desde el Sur del Macizo de Santander hasta la costa Caribe en Santa Marta. Presenta un desplazamiento lateral de cerca de 110Km y se ha cartografiado en una longitud de 600Km. Parece que esta falla está relacionada con el levantamiento de la Cordillera Oriental (Campbell, 1965 en Ward et al., 1974). Juliver (1958), enfatiza en un desplazamiento vertical inverso y considera la falla como una falla marginal de bloque montañoso levantado, con desplazamiento primariamente vertical.

Falla del Suárez: Esta falla es paralela al curso del Río Suárez con una orientación general NE-SW, después de la unión de los ríos Chicamocha y Suárez, sigue la margen del recién formado río Sogamoso con orientación NW. En la zona de la Mesa de Los Santos la falla presenta un comportamiento inverso de alto ángulo con componente de rumbo sinistral. Se calcula que la dirección del esfuerzo principal que originó esta falla es N50W-SE que es subperpendicular a la falla (Díaz y Suárez, 1998). Es la estructura más cercana a la zona de trabajo; está estrechamente paralela al curso del río Sogamoso, 2Km al W en la mina El Carrancho, sector el Guayacán. Su desplazamiento vertical varía entre 400 y 700 metros siempre con el bloque occidental levantado.

Falla de Los Santos: Con dirección NW-SE a lo largo de la quebrada del mismo nombre desde la pendiente sur en la Mesa, muere al noroeste en la localidad de Los Santos. Probablemente tiene un desplazamiento mayor que cualquier otra falla en la superficie de la mesa, pero cerca de Los Santos este no supera los 100m. Presenta un comportamiento inverso de alto ángulo con componente de rumbo sinistral; enfrenta las areniscas de la Formación Los Santos en el bloque

Este con los niveles de calizas de la Formación Rosablanca en el bloque Oeste (Delgado y Galvis, 1994).

Falla Los Teres: Satélite a la falla Los Santos tiene una dirección NE-SW, afecta rocas de la Formación Rosablanca al SW, su trazo es paralelo a la de los Santos y su vergencia es occidental. Limita las mineralizaciones de yeso, dado que este mineral se encuentra en el bloque Oeste y en el Este no. Presenta un comportamiento normal, el buzamiento aproximadamente es de 25° a 30° al Este (Montana y Suárez, 2000).

Localmente la zona de estudio esta afectada por fallamiento normal el cual se observa dentro de los mismos túneles , encontrándose una falla de tipo normal que atraviesa transversalmente los túneles y tiene una dirección NE-SW , con buzamiento aproximado de 50° a 55° al W (ver figura 14 y 15).



Figura 14. Imagen de la falla observada en el túnel 6 de la mina “El Carrancho” costado izquierdo del Túnel.



Figura 15. Imagen de la falla observada en el Túnel 6 de la Mina “El Carrancho” Costado derecho del túnel.

Fracturamiento y Diaclasamiento: Según Delgado y Galvis (1994), en un estudio en la cantera la Esperanza en la pared oriental del río Sogamoso en la zona de estudio, se determino la presencia de dos familias principales de diaclasas con direcciones N50-60E y N50-60W y de dos familias de importancia intermedia con direcciones E-W y N20-30W.

En los estudios realizados por Linares et al., (1998) y Linares, Ortiz et al., (1999), en donde se hace un análisis estadístico de direcciones de fracturamiento en el Piedemonte del Valle Medio del Magdalena, para la formación Rosablanca, en el noroccidente de Boyacá y el suroccidente del departamento de Santander, se puede establecer una dirección preferencial de fracturamiento en dirección N30-40E y patrón ortogonal en dirección N40-60W.

En la sección de la Mina “El Carrancho” se observan tres familias principales de diaclasas con direcciones preferenciales N10-20E, N60-70E y otra dirección N70W, la cual se encuentra con menor densidad que las direcciones mencionadas primeramente. La mayoría de estas discontinuidades son producto del fallamiento regional y local y en menor proporción producidas por las voladuras efectuadas para extraer el mineral de yeso.

4.2 Evolución Tectonoestratigráfica Regional

La evolución del área de estudio, tiene como premisa la evolución de los Andes y más detalladamente a la evolución geodinámica de la esquina de Sudamérica durante el Mesozoico y Cenozoico.

La cuenca del VMM ha experimentado diferentes etapas deformativas de distensión y compresión (Figura 16). Durante el Triásico-Jurásico y principios del Cretáceo los esfuerzos tensionales-transtensionales, probablemente relacionados con el rompimiento de Pangea y más tarde la extensión en la región detrás del arco magmático localizado en el flanco oriental de la actual Cordillera Central, generaron cuencas extensionales angostas (<150 Km.), localizadas en los actuales Valle del Magdalena; durante el Cretáceo (Sarmiento, L. 2001).

La etapa de distensión de la cuenca continua en el Triásico-Cretáceo Temprano con una megasecuencia “*Sinrift*” relacionada a la separación de Norte América y Sur América en el Proto-caribe; se inicia con una depositación de un medio continental en el Cretácico Temprano correspondientes a sedimentos clásticos y conglomerados de la Formación Los Santos (Tambor); sigue la depositación de la Formación Cumbre que no se encuentra en toda la cuenca; la Formación Rosablanca se empieza a depositar a partir del Berriasiano; los sedimentos fueron

depositados sobre una plataforma somera, desde la zona submareal hasta la zona supramareal.

Durante el Cretáceo Temprano el VMM hacia parte de una cuenca de dirección NNE-SSE dividida en dos depocentros: Tablazo al W y Cocuy al E; separadas por el paleomacizo de la Floresta-Santander y prolongándose al norte en las llamadas fosas de Uribante (Hoy serranía de Perijá) y Machines (hoy Andes de Mérida) respectivamente. Al Sur estos dos depocentros se unían para conformar la subcuenca de Cundinamarca donde se registran los mayores espesores del Cretáceo (Sarmiento, 2001).

En el Aptiano la trasgresión marina avanza como producto de la subsidencia termal y el aumento relativo del nivel del mar, en este momento la cuenca alcanza un máximo nivel de inundación cuyo registro son los depósitos de arcillas y calizas de la Formación Paja (García et al., 2001); continua la depositación de una secuencia progradante de areniscas de frente costero de la Formación Tablazo; durante el Cenomaniano-Turoniano, el nivel del mar aumenta y se depositan calizas y arcillolitas calcáreas muy ricas en materia orgánica correspondientes a las formaciones Simití y La Luna.

En el campaniano-Maestrichtiano, se observa una disminución en el desarrollo de carbonatos y un aumento en el contenido limoso y arenoso correspondiente a la formación Umir, ocurre el primer evento compresivo con la acreción de la Cordillera Occidental, lo cual genera el levantamiento de la Cordillera Central, durante este tiempo se generaron cabalgamientos con transporte tectónico principalmente hacia el SW (Linares, et al., 1998), en el Valle Medio los principales cabalgamientos son La salina, San Luis y Arrugas.

Debido a la tectónica del área, los sedimentos Terciario son generalmente de origen continental y solamente durante el Oligoceno fueron intermitentes por

amplias invasiones marinas (Morales, 1958), esta secuencia comienza con la depositación de areniscas y arcillolitas con presencia de carbón de la Formación Lisama, durante esta etapa se observan periodos de erosión representados por la discordancia del Eoceno al tope de Lisama. Las formaciones La Paz y Esmeraldas compuesta de areniscas y limonitas que representan depósitos de llanuras de inundación (Ortíz et al., 1997).

Según Pindel y Dewet, (1982) y Pincel y Erikson, (1993), En García et al., (2001), a finales del cretáceo y hasta el Oligoceno, el norte de Suramérica estaba bajo la influencia del movimiento hacia el Sur-Este de la placa Caribe, la subducción de la placa de Farallones al Sureste de Colombia y la posterior convergencia oblicua de su porción Norte de Nazca.

Durante el Oligoceno y el Mioceno Temprano los pulsos del levantamiento de la Cordillera Oriental contribuyen a la subsidencia de la cuenca, los sedimentos provenientes de la erosión del área de la Cordillera Central, sirven como fuente de detritos para las Formaciones Mugrosa y Colorado, de facies continentales.

Durante el Mioceno Medio y Tardío, importantes fases de tectónica compresiva interrumpen la subsidencia de la cuenca, cuyos sedimentos son plegados y fallados, se crea la cadena plegada cabalgante con vergencia al W; las paleofallas normales de la etapa distensiva son reactivadas como fallas inversas; ya que representan planos de debilidad. Como producto de esta deformación se creó la cuenca ante país o de tipo "*fore-land*" de los Llanos Orientales y en el VMM, (Rueda y Vélez, 1999).

En el Mioceno Tardío Plio-Pleistoceno se deposita la última secuencia representada por el grupo Real, Grupo Mesa y depósitos recientes los cuales están poco deformados.

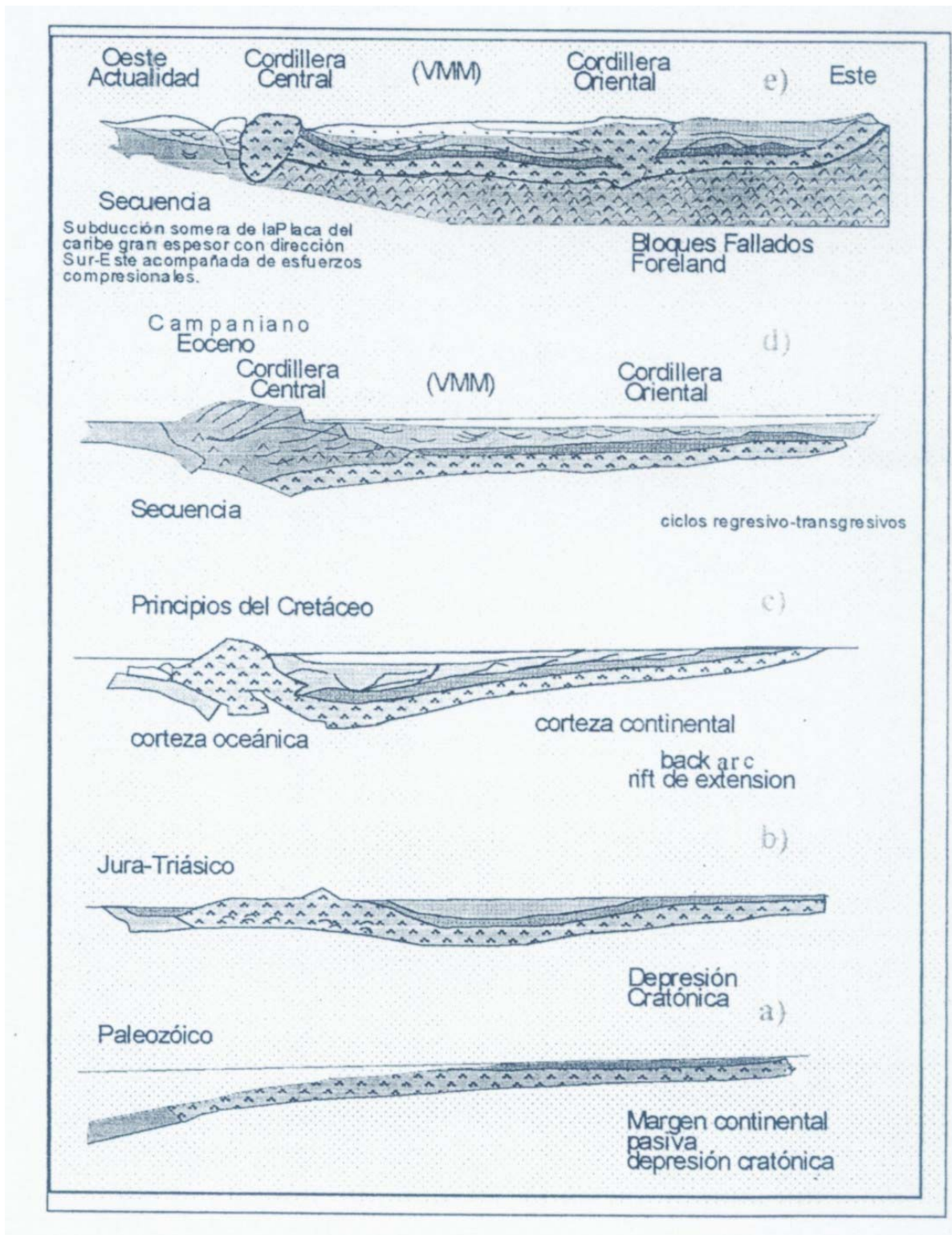


FIGURA 16. Evolución Tectonoestratigráfica del Valle Medio del Magdalena (Tomado y Modificado de Linares, 1998)

4.3 Formación Rosablanca

Como el área de estudio en el presente documento es la Formación Rosablanca, a continuación se presentan las características más relevantes de esta zona en la región del Valle Medio del Magdalena, como guía se tuvo en cuenta la organización presentada en el Léxico Estratigráfico (de porta, 1989).

4.3.1 Antecedentes:

Seguidamente se presentan las características generales de la formación Rosablanca.

Nomenclatura: Referida originalmente como Rosa Blanca (Wheeler, 1929 en Morales 1958), posteriormente conocida como Rosablanca (De porta, 1989).

Autor: O.C. Wheeler 1929 (informe inédito), según Morales (1958).

Descripción de unidad tipo: Morales (1958), coloca en conocimiento público, los trabajos realizados por Wheeler (1929), respecto a la Formación Rosablanca, afirma que su nombre fue asignado por Wheeler (1929), en alusión al cerro Rosablanca, localizado 5Km al Norte de la esquina noreste de la concesión de De Mares, aunque la localidad tipo para esta Formación, está ubicada cerca de la población de El Tablazo, a una distancia de 1 a 1,5Km aguas arriba del puente sobre el río Sogamoso, donde la Formación está compuesta por calizas duras masivas de color gris azulado, fosilíferas, con textura gruesa, la cual contiene muchos niveles de margas, pasando hacia el tope a calizas negras de grano muy fino a arcillosas.

Distribución Geográfica: El área de distribución de la Formación Rosablanca se sitúa en la región del Valle Medio del Magdalena, con una dirección aproximada

NNE-SSW dentro del departamento de Santander hasta Aguachica al Norte y en Villa de Leiva al Sur. No es aconsejable extenderlo fuera del área anteriormente citada (De porta, 1989).

Edad: La edad de la Formación Rosablanca varía de acuerdo con su posición dentro de la cuenca, haciéndose más joven hacia el noreste: de edad Valanginiano-Hauteriviano en el área de la Mesa de los Santo, Zapatoca, Chima y Contratación en el Departamento de Santander (M, Julivert, 1958; Etayo en Guzmán, 1985 y Rolón y Carrero, 1995) y Berriasiano-Valanginiano en Villa de Leiva (Etayo y Rodríguez, 1985).

Posición Estratigráfica: La parte basal de la Formación Rosablanca aparece sobre sedimentos detríticos de las Formaciones Los Santos y Cumbre; es suprayacido por los sedimentos de la Formación Paja.

Contacto Inferior: Neto Concordante.

Contacto Superior: Neto Concordante.

Espesor: Zamarreño, (1963), reporta un espesor de 318m en el área SW de la Mesa de Los Santos; Taborda, (1995), reporta un espesor que varía entre 150 y 425m para el Valle Medio del Magdalena; Cardozo y Ramirez, (1985) y Ballesteros y Nivia, (1985), reportan un espesor de 10m al suroeste de Villa de Leiva en el cerro San Marcos. Ortiz, et al., (1997), reporta una continuidad lateral tanto en el sector central de la cuenca como en el área Norte de la misma con un espesor entre 243,8m y 274,3m.

Correlación: Por su característica litológica es equivalente a las Formaciones Tibú-Mercedes de la cuenca de Maracaibo.

4.3.2 Características Petrolíferas:

Roca Generadora: En la Formación Rosablanca el grado de preservación de materia orgánica es malo (García et al., 2001).

Roca Reservorio: Las condiciones para que esta roca pueda ser considerada como almacenadora son:

La porosidad primaria de la Formación Rosablanca es baja, pero se puede obtener una buena porosidad secundaria por procesos de disolución de carbonatos o por la acción de los ácidos carboxílicos producto de la descomposición de la materia orgánica.

Los eventos tectónicos pueden generar en la roca una serie de fracturas por donde el petróleo circula y se entrapa en este tipo de litología. Esta parece ser la condición más común en la Formación Rosablanca.

Los eventos de diagénesis temprana pueden también generar fracturamiento en rocas granosportadas principalmente.

La dolomitización puede ser un factor importante en la porosidad secundaria, debido a que cuando ocurre este proceso, frecuentemente la dolomita que precipita suele ser menor que la cantidad de calcita o aragonito que se disuelve, dando lugar a un incremento neto en la porosidad. Hasta ahora este tipo de proceso dentro de la Formación estudiada solo se aprecia en zonas supramareales locales en el sector de la Mesa de Los Santos (Comunicación verbal, A. Ortiz, 2004).

4.3.3 Ambiente de Depositación de la Formación Rosablanca:

En general el ambiente de depósito de la Formación Rosablanca es de plataforma marina, probablemente de tipo perimareal con diferentes depósitos relacionados a condiciones de alta y baja energía.

La zona SW de la Mesa de Los Santos se define a continuación, teniendo en cuenta los trabajos realizados por Zamarreño (1963), Alfonso (1985), Guzmán (1985) y Ortiz et al., (1997 y 1998).

De acuerdo a sus características litológicas, facies y contenido faunístico, se infiere que el depósito tuvo lugar en un ambiente marino de plataforma somera con pendientes muy suaves y clima cálido con altos topográficos, las condiciones de depósito no fueron constantes y existieron variaciones en cuanto a salinidad, agitación y aporte de material terrígeno. La secuencia basal en donde se presentan los estratos de yeso, se caracteriza por una hipersalinidad y tranquilidad esto se debe a un medio restringido, (Zamarreño, 1963).

En el área de Zapatoca, Guzmán, (1985) encuentra las especies ***Aetostreon Couloni*** y ***Ceratostreon Boussingaulti*** (bancos de ostreidos) y las interpreta como indicadores de oscilaciones marinas, ocurridas durante la depositación de la Formación Rosablanca.

Alfonso (1985), interpreta tres subambientes de plataforma somera: mareal, intermareal y supramareal, paralelos a la línea de costa de dirección aproximada N-S; en el último ambiente, se desarrollaron condiciones de Sabkha, en el cual se formaron los niveles de yeso, propios en esta región. El avance del mar sería en dirección W-E.

Ortiz et al., (1997 y 1998), coinciden con Alfonso (1985) en la interpretación de los subambientes: En el área de Zapatoca, la base de la formación Rosablanca se caracteriza por depósitos intermareales a supramareales de borde de plataforma interna con rasgos muy evidentes como la presencia de yeso sinsedimentario y de colchones de algas, este subambiente de baja energía presenta facies como arcillolitas calcáreas negras, intercalaciones de arcillolitas negras con Mudstone y Wackstone; continua, estratigráficamente al tope, con subambientes de plataforma interna con depósitos de tormentas los cuales se interpretan por la alternancia de las facies Mudstone y Packstone oolítico con las intercalaciones de Mudstone y arcillolitas; este subambiente se localiza donde existe una mayor influencia de los sedimentos provenientes de la erosión de una barra (Shoal), ocasionados por tormentas y corrientes marinas; esto es evidente por la alternancia cíclica de las facies dentro de zonas de baja energía donde se originaron las facies.

La parte media y superior de la Formación Rosablanca, muestra una alternancia de subambientes asociados a condiciones submareales de alta y baja energía que corresponden a: **Plataforma externa** muy cercana al borde de una rampa (**Ramp facies**), identificadas por facies generalmente con abundantes bioclóstos, intercalaciones de Mudstone con arcillolitas, intercalaciones de Mudstone y Wackstone y arcillolitas con Wackstone-Packstone.

Se evidencia que las secuencias de rocas calcáreas somerizando hacia el tope (**Shallowing upward**), que son rasgos típicos de una plataforma perimareal (Walter y James, 1992) en Ortiz (1998).

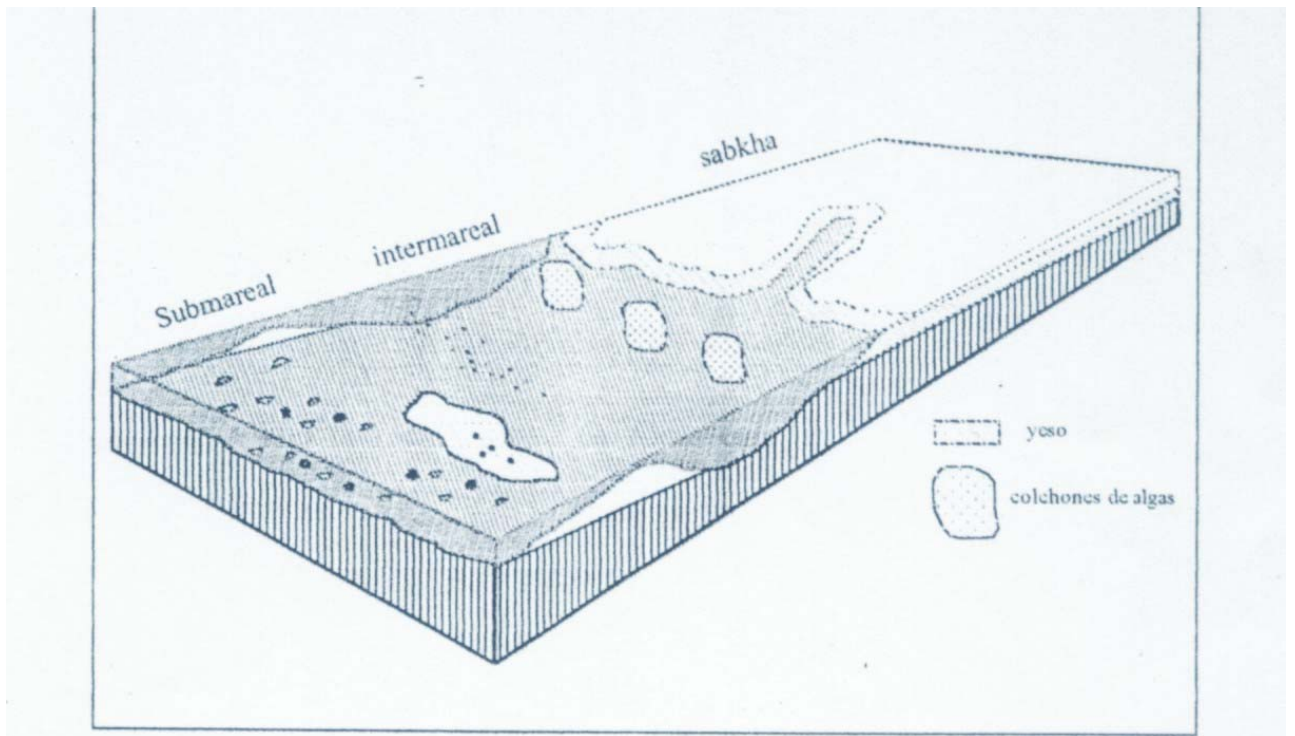


Figura 17. Ambiente de Deposición de la Formación Rosablanca
(Tomado de Borrero, 2003)

5 Resultados

En este capítulo se presenta el tratamiento de los datos de las fracturas tomados de los afloramientos de la mina “El Carrancho”, siguiendo la metodología presentada en el capítulo 2.

Los datos de estudio de los afloramientos fueron tomados en cuatro túneles de la mina “El Carrancho”, teniendo en cuenta ciertos aspectos analizados para este estudio, los cuales se pueden observar en la tabla 3.

TABLA 3. *Resumen de datos de la Formación Rosablanca, tomados en el área de estudio.*

TÚNEL	LONGITUD TOTAL (M.)	TOTAL DE DATOS	OBSERVACIONES
1	135,8	88	Observación de intenso fracturamiento en las paredes del túnel, la dirección con respecto al Norte es de Aproximadamente N15-20W.
6	199,5	182	Observación de intenso fracturamiento en las paredes del túnel, la dirección con respecto al norte es de aproximadamente N15-20W. La falla local se observa claramente, notándose un cambio de buzamiento de las capas en el sector cercano a la

			zona de falla
10	173,7	184	Observación de intenso fracturamiento en las paredes del túnel y presencia de infiltración de agua superficial.
11	184(33)	34	Observación de infiltración de agua superficial, interrupción de toma de datos por presencia de derrumbes.

En cuanto a los datos analizados en este estudio se cuenta con la información de la orientación de las fracturas y el espaciamiento de las mismas, ya que por razones de accesibilidad no fue posible recolectar datos de relleno de las fracturas, ni mucho menos medir sus aperturas, pero en lo realmente observado y en estudios anteriores que se han realizado dentro de los túneles trabajados en la Mina “El Carrancho” se puede decir que en esta área el tipo de relleno que se observa en las fracturas es calcita y yeso y que las aperturas observadas en los túneles tienen un rango aproximado de 0,050-0,095 mm, percibido por la estabilidad que se detalla en la zona de trabajo. En la figura 18 se puede observar el aspecto que toma una fractura rellena de calcita cuando esta afectada por la infiltración de agua.



Figura 18. Fracturas afectadas por procesos de infiltración

5.1 Datos para el Túnel 1

Las mediciones de las fracturas en este túnel fueron tomadas iniciando en la entrada del mismo y finalizando en el frente de explotación del túnel, para las mediciones de las fracturas realizadas en el túnel 1 se tomaron cuatro tramos los cuales se tazaran más cercanos a la pared derecha, los cuales presentan las siguientes direcciones , el tramo 1 S30E y una longitud de 36,40m, el segundo tramo S12E cuya longitud correspondiente es 42,60m, el tramo 3 S22E y una longitud de 42,50m, el último tramo S20E cuya longitud es 13,10m, la figura 19 representa las direcciones de las fracturas registradas para este túnel con sus respectivos Scanline.

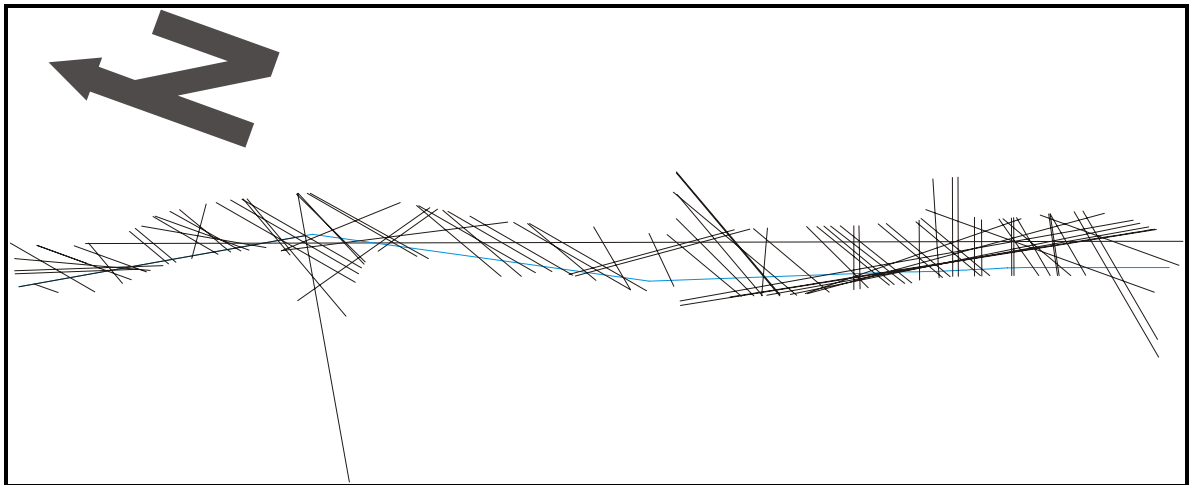


Figura 19. Scanline y trazos de fracturas para el túnel 1

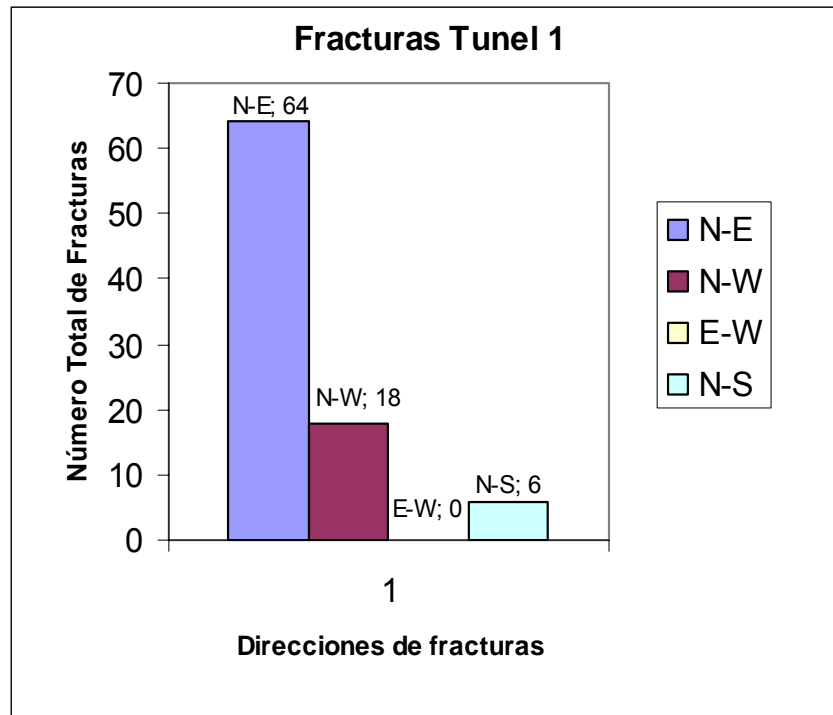
A continuación se presenta una tabla de los datos obtenidos para este túnel.

TABLA 4. Datos Túnel 1

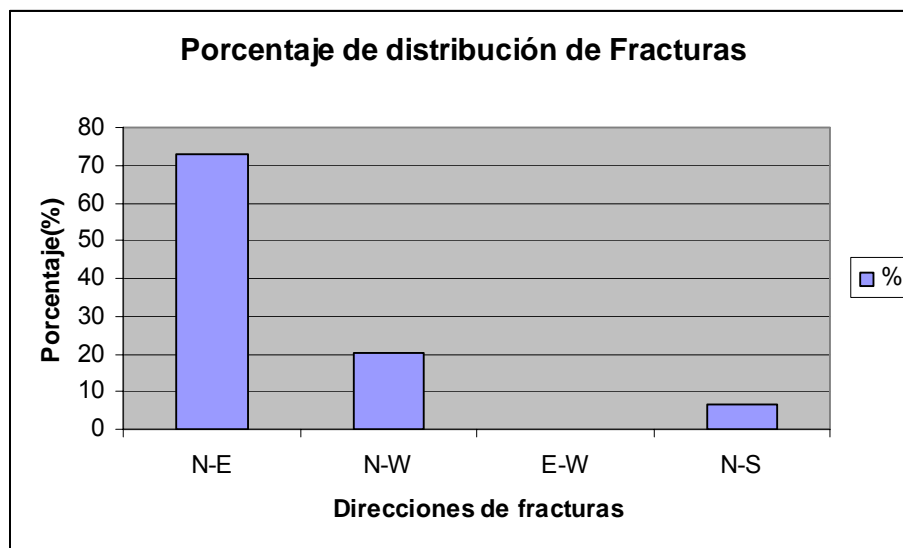
Datos Túnel 1	
Detalle	Cantidad
Total de Fracturas	88
Longitud Scanline	139,3m
Tendencias	3
Tendencia 1(T1) (N20E)	55
Tendencia 2(T2) (N70E)	16
Tendencia 3(T3) (N20W)	17
Densidad Total de Fracturas	0,63
Densidad de Fracturas T1	0,39
Densidad de Fracturas T2	0,11
Densidad de Fracturas T3	0,12

El porcentaje de cada dirección de fracturas y el número total de fracturas para cada dirección se grafico en un diagrama de barras (figura 20), la dirección principal de fracturamiento en el túnel 1 es N-E, con un 73% del total de la

población de fracturas, un 20% para las fracturas de dirección N-W y finalmente 7% para las fracturas N-S.



(a)



(b)

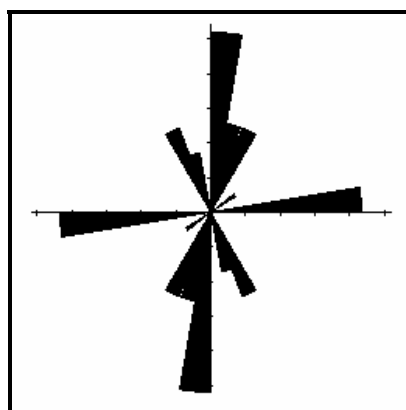
FIGURA 20. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de las mismas (b) para cada dirección.

Los datos de orientación de las fracturas para este túnel fueron graficados en un diagrama de rosetas (Figura 21), en el cual se observan las tres direcciones principales de fracturamiento; en el tramo 1 un total de 23 fracturas, las direcciones predominantes son de N15-20E y N50-60E y en menor proporción N20W, figura 21(a), las fracturas en este tramo se observan continuas y cerradas.

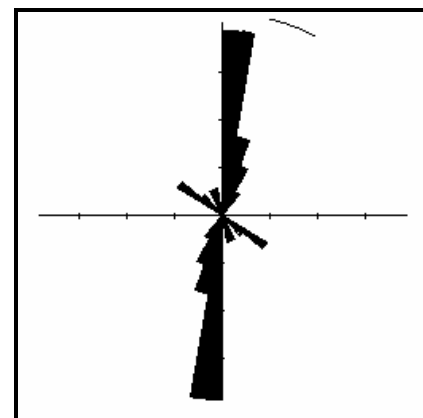
El segundo tramo tiene un total de 18 fracturas y presenta una dirección principal de N10E, figura 21(b), las fracturas se observan muy irregulares y presentan un gran espaciamiento de aproximadamente 2-3m.

En el tercer scanline se tiene 35 fracturas en total y se observan las tres direcciones predominantes de N20E, N70E y N30W, figura 21(c) en este sector del túnel es muy frecuente encontrar las fracturas formando una red, también se observa que las fracturas con dirección N-W son discontinuas pero con espaciamiento más pequeño de aproximadamente 1m, es decir, que su densidad en este sector tiende a aumentar.

El último tramo contiene 12 fracturas en total y predomina la dirección N40E, figura 21(d), en este sector las fracturas con dirección N-w no se observaron y la superficie de las fracturas se presenta muy irregular.



(a)



(b)

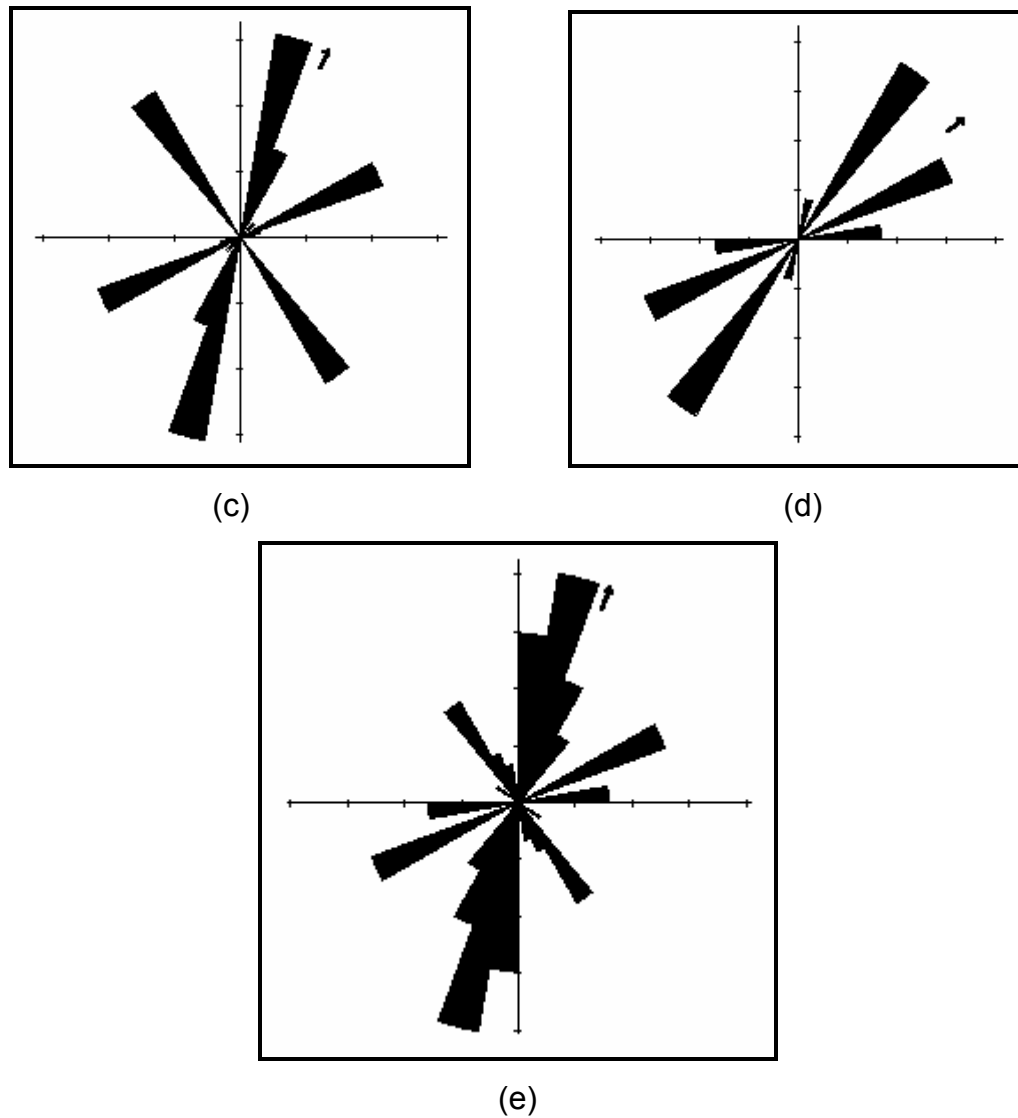


Figura 21. Diagrama de rosetas para las fracturas del Túnel 1.

(a) Primer tramo donde la dirección principal es N15-20E y N50-60E; (b) segundo tramo cuya dirección principal es N10E; (c) para el tramo tres donde las direcciones principales son N20E, N70E y N30W; (d) último tramo y para el cual se tiene una dirección predominante de N40E; (e) Diagrama general donde están representados la totalidad de los datos para el túnel 1.

5.2 Datos para el túnel 6

Las mediciones de las fracturas para este túnel se iniciaron a partir del frente de explotación hacia la entrada del túnel, ya que en ese momento la explotación del material se estaba realizando en los primeros 100m del túnel, para este caso se hizo necesario realizar las mediciones en seis tramos, teniendo en cuenta los trabajos que allí se estaban realizando se trazo la línea de Scanline más cercana a la pared derecha del mencionado túnel, las correspondientes direcciones para los tramos del scanline son las siguientes, para el primer tramo que corresponde a la parte inicial del túnel se tiene una dirección de S7E y una longitud de 20m; el tramo 2 con dirección S30E y cuya longitud es de 7m; el tercer tramo de dirección S19E y una longitud de 24m; el cuarto tramo S25E y su correspondiente longitud es 50m; el tramo 5 S23E y longitud 50m; para el último tramo la dirección es S25E y una longitud de 50m. La figura 22 representa los trazos de las fracturas con sus respectivos scanline.

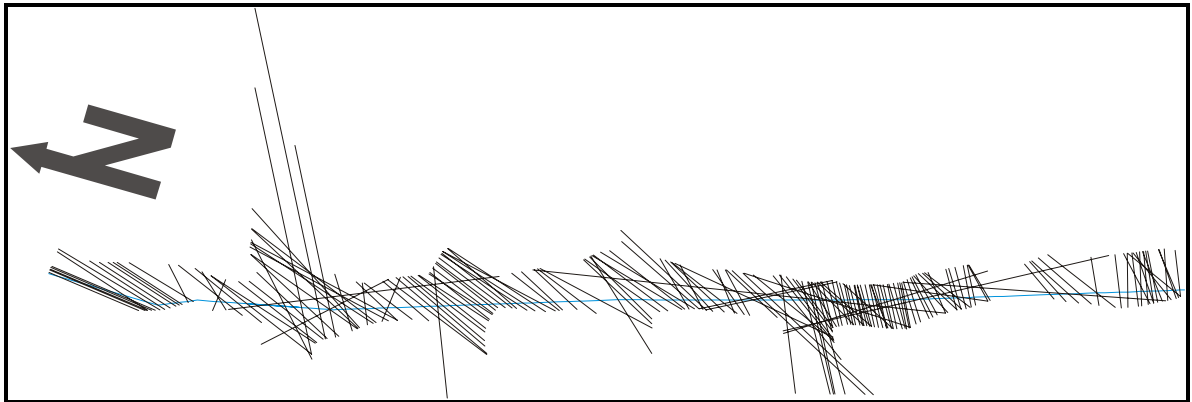


Figura 22. Scanline y trazos de fracturas para el Túnel 6.

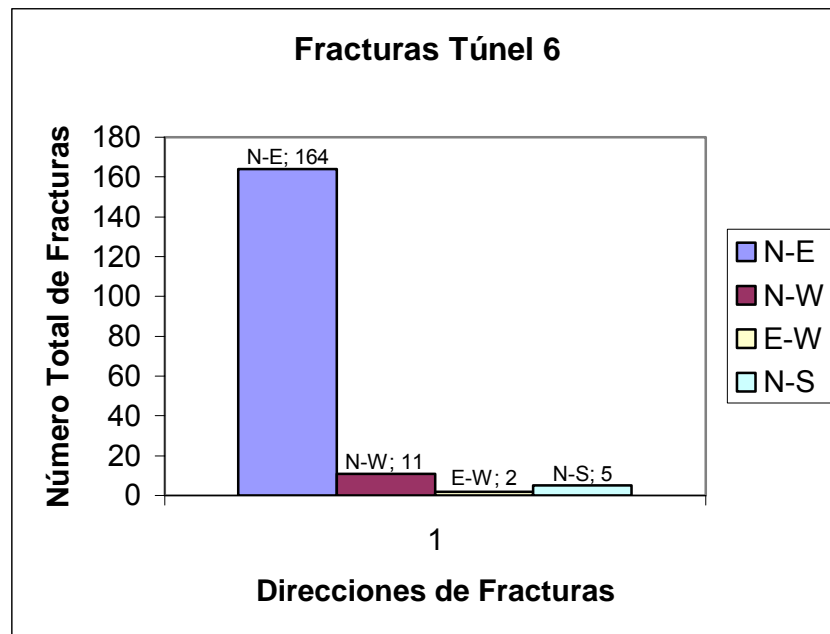
Seguidamente se presenta la tabla de datos obtenidos para este túnel:

TABLA 5. Datos Túnel 6

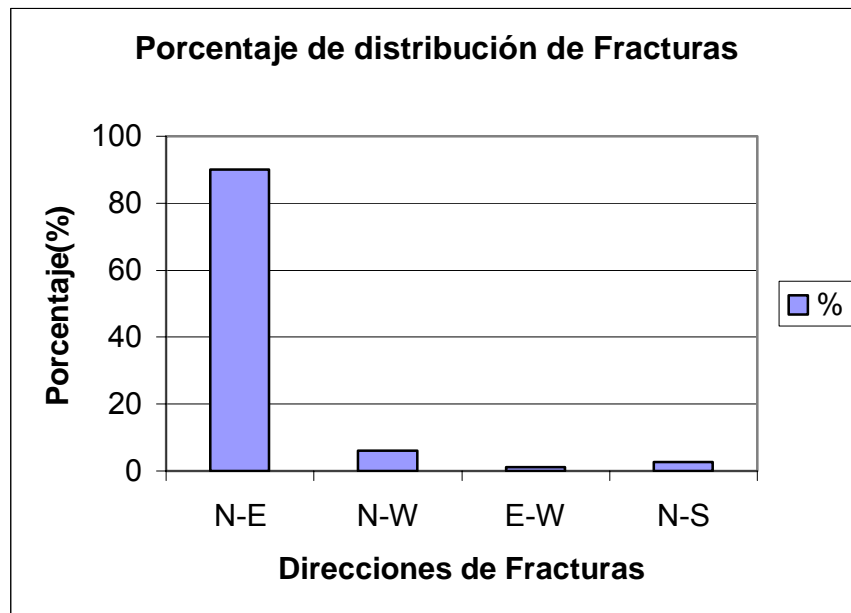
Datos Túnel 6	
Detalle	Cantidad
Total de Fracturas	182

Longitud Scanline	201m
Tendencias	3
Tendencia 1(T1) (N20E)	87
Tendencia 2(T2) (N50E)	83
Tendencia 3(T3) (N20W)	12
Densidad Total de Fracturas	0,91
Densidad de Fracturas T1	0,43
Densidad de Fracturas T2	0,41
Densidad de Fracturas T3	0,06

El porcentaje de cada dirección de fracturas y el número de fracturas por dirección se graficaron en un diagrama de barra (Figura 23), se observa que para el túnel 6 la dirección predominante del fracturamiento es N-E, representando un 90% de todos los datos registrados, 6% para las fracturas N-W, 1% las de dirección E-W y finalmente un 3% para las N-S.



(a)



(b)

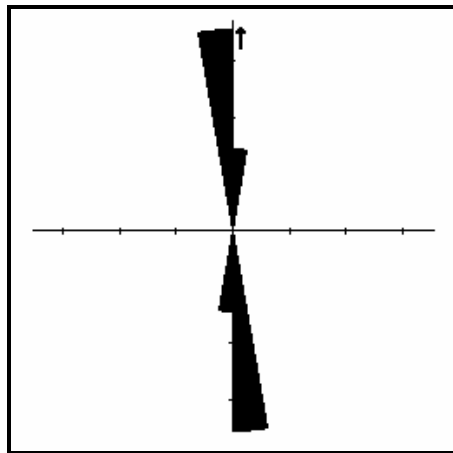
Figura 23. Diagrama de barras que ilustra el Número total de fracturas (a) y el porcentaje de las mismas (b) para cada dirección.

Los datos de orientación de las fracturas tomadas en este túnel fueron graficados en un diagrama de rosetas (figura 24), en el cual se observan las direcciones principales de fracturamiento; en el primer tramo se tomaron 7 datos de fracturas en total y se observa que la dirección predominante es N-S figura 24(a); para el tramo 2 el total de fracturas fue de 7 y predomina la dirección N10E figura 24(b). En este tramo se observan las fracturas muy irregulares.

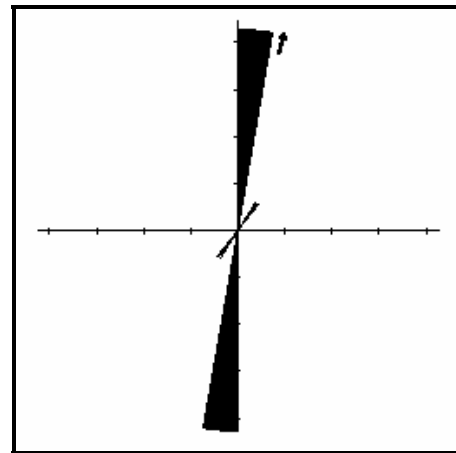
El tercer tramo tiene un total de 17 fracturas, las cuales presentan una dirección principal de N15-20E figura 24(c), se encuentran espaciadas en un rango de 2-3m. El tramo 4 tiene un total de 37 fracturas y su dirección principal es N15-20E figura 24(d), en este sector se observó que algunas de las fracturas presentaban discontinuidades en sus superficies.

El tramo 5 se observan un total de 69 fracturas, en el cual se pueden observar 2 direcciones principales de fracturamiento siendo estas N15-20E y N50-55E figura 24(e), para la dirección N50-55E se observa un espaciamiento relativamente pequeño, de aproximadamente 0,5-1m, mientras que las fracturas N15-20E su espaciamiento varia entre 2-5m.

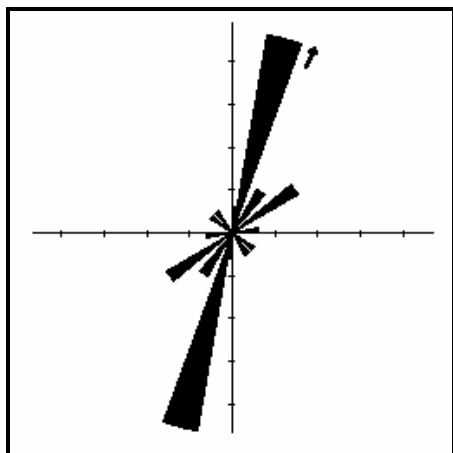
El último tramo corresponde a la parte final del túnel en que se encontraron 45 fracturas en total, y su dirección principal es N50-55E figura 24(f), en este sector se observa un espaciamiento que varia entre 0,5-2m.



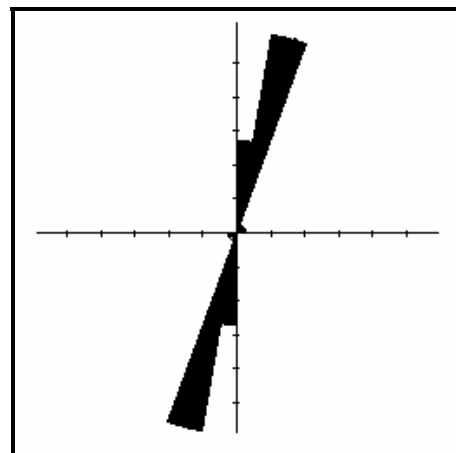
(a)



(b)



(c)

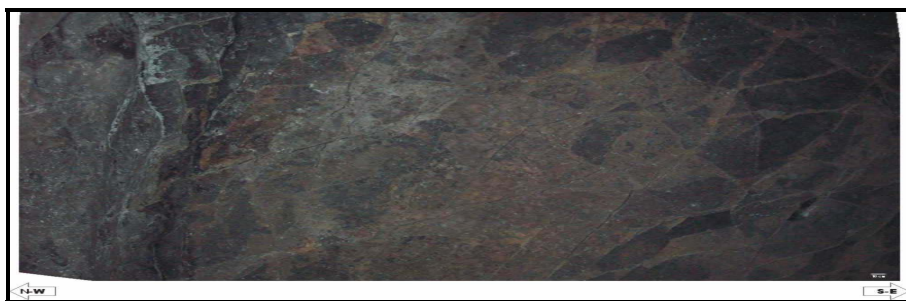


(d)

5.2.1 Dimensión Fractal para el Túnel 6

En este túnel se realizaron las medidas de la dimensión fractal de las redes de fracturas utilizando el Software Dimensión1.0 elaborado por la Ingeniera Johana Pinilla quien implemento las mediciones de dimensión fractal por los métodos de análisis de Variograma y Box-counting, para los cuales se usaron las imágenes de las redes, las cuales fueron adquiridas de la siguiente manera:

Se tomo la fotografía de las redes de fracturas, las imágenes pueden ser observadas en el **ANEXO B**; las cuales representan 3,7m en escala real, éstas imágenes fueron procesadas para extraer únicamente la red de las fracturas y poder utilizar el Software para hallar la dimensión fractal; El procesamiento consistió en llevar la imagen inicialmente obtenida de la cámara digital al software Adobe Photoshop 7.0, con el fin de mejorar la resolución de la imagen y realizar los trazos de las fracturas, a la imagen se le aplicaron ciertos filtros como luminosidad, contraste, brillo, etc., después se crearon una nueva capa y un fondo para iniciar el proceso de binarización sobre la cual se fueron digitalizando los trazos de las fracturas y por último llegar a obtener una red de fracturas a la cual aplicarle los métodos para hallar la dimensión fractal, en la figura 25 se observan los pasos que se llevaron a cabo para este procedimiento.



(a) ↓

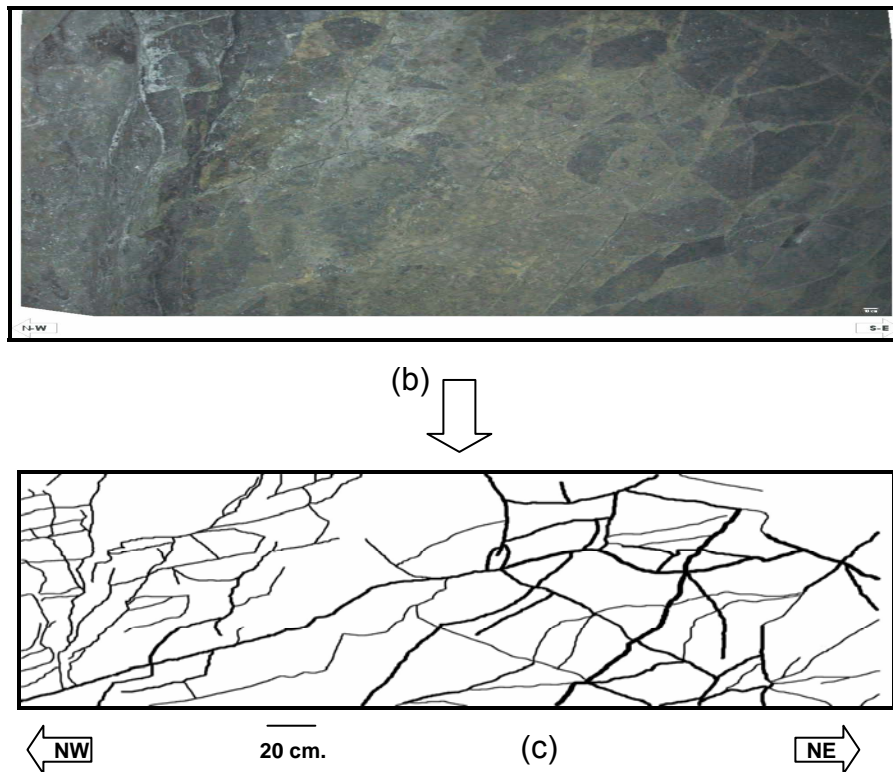


Figura 25. Pasos para extraer la red de fracturas de la imagen. (a) Fotografía; (b) imagen procesada en Photoshop; (c) Red de fracturas obtenida.

La dimensión fractal obtenida por los dos métodos mencionados anteriormente se presenta en las tablas 6 y 7, para ampliar más la información de los resultados remítase a los **ANEXOS C y D**; de las cuales se puede observar una gran deferencia entre los resultados; comparando los datos obtenidos para las redes de las fracturas calculadas por el método de Box-Counting y los datos obtenidos por el método de Análisis de Variograma, se puede concluir el método de análisis de Variograma no es el más adecuado para calcular dicha dimensión, debido a que se presentan valores muy altos de la dimensión y estarían indicando que las redes de fractura se comportan como superficies, lo cual en este caso es extraño ya que los datos adquiridos en campo fueron de los perfiles de las redes de fractura y no de su superficie.

Además se tienen datos anómalos en el análisis de Variograma, tal como el que se observa en el ovalo azul de la tabla 7, el cual es raro para este estudio, porque las imágenes estudiadas pertenecen a redes de fracturas para las cuales la dimensión fractal corresponde a un rango que varía entre 1 y 2, luego el valor mencionado es 2.0038 indicando que excede el rango permisible.

TABLA 6. *Dimensión fractal usando el método de box-counting*

Box-counting			
No. Iteración 6			
Imagen	Tamaño 64x64		
	X=1/Y=1	X=180/Y=40	X=350/Y=50
Red36-37	1.1827	1.2572	0.96086
Red39-40	0.26413	1.2943	1.2238
Red43-44	1.1902	1.2919	1.3411
Red45-49	1.0796	1.4014	1.3741
Red54-57	1.2797	1.4762	1.3353

TABLA 7. *Dimensión fractal usando el método de Variograma*

Dimensión fractal por Variograma						
Imagen	Vertical			Horizontal		
	No.	Tamaños		Tamaños		
		Completa/Pasos		Completa/pasos		
	1-10	2-10	3-10	1-10	2-10	3-10
Red36-37	1.7331	1.8006	1.8415	1.7312	1.7993	1.8412
Red39-40	1.8927	1.9541	1.9687	1.8747	1.9433	1.9701
Red43-44	1.9077	1.9601	1.9756	1.9287	1.9813	1.9987
Red45-49	1.9684	2.0001	2.014	1.9681	1.9945	1.9988
Red54-57	1.9519	1.9901	2.0038	1.9629	1.9911	1.9973

En la relación que se presenta a continuación se observa como la dimensión fractal varía con la intensidad de fracturamiento, de la cual se puede decir que la dimensión y la intensidad de fracturamiento tienden a aumentar; en la figura 26 se observa que cuando los valores de dimensión son altos los datos tienden a tener un comportamiento lineal, pero siempre en constante aumento. La figura 27 muestra una relación creciente entre la dimensión fractal y la intensidad de fracturamiento para redes de fracturas que presenten iguales aperturas.

Como la intensidad de fracturamiento está dada por la relación que hay entre el número de fracturas por unidad de medida, la cual en este caso se refiere al área, entonces para este estudio se tiene que:



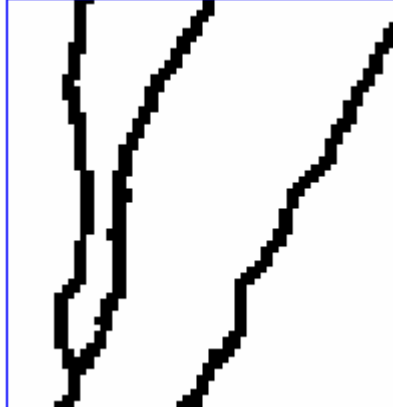
$$IF = \frac{N^{\circ} \text{defracturas}}{\text{área}} ; \text{en la cual } IF \text{ es la intensidad de fracturamiento, basada en la}$$

anterior apreciación se tiene el siguiente ejemplo para la primera imagen de la tabla 8, la cual tiene un área de 64x64 píxeles:

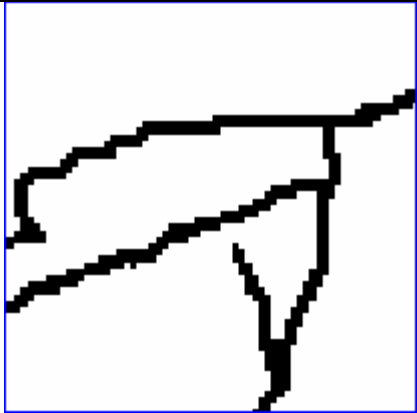
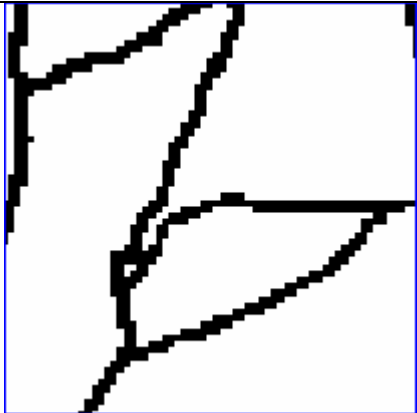
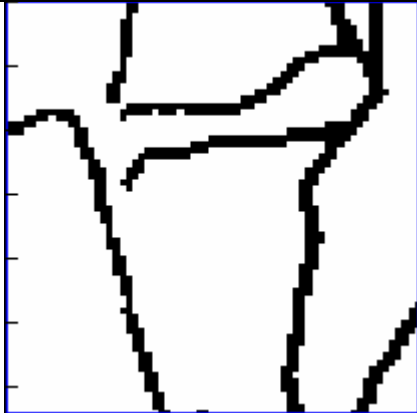
$$IF = \frac{1}{4096 \text{ píxeles}} = 2,44 \times 10^{-4} ; \text{ evaluando el área en función de } m^2, \text{ se tiene que}$$

$1 \text{ píxel} = 7,99 \times 10^{-6} m^2 \Rightarrow 4096 \text{ píxeles} = 0,0327 m^2$, lo que indica que se tienen para este ejemplo 31,25 fracturas en $1 m^2$. En este caso si se observa la tabla 8 se aprecia que la intensidad de fracturamiento se incrementa al aumentar el número de fracturas, esto se debe a que para todas las imágenes de las redes se tomo la misma área.

TABLA 8. Tabla de datos en la cual la intensidad de fracturas esta dada por el número de fracturas que hay en un área de 64x64 píxeles⁶

Imagen	No. Fracturas	Dimensión Fractal
	1	1.0078
	2	1.1083
	3	1.2675

⁶ Un píxel tiene un área de $7,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$.

	4	1.2859
	5	1.2965
	6	1.3102

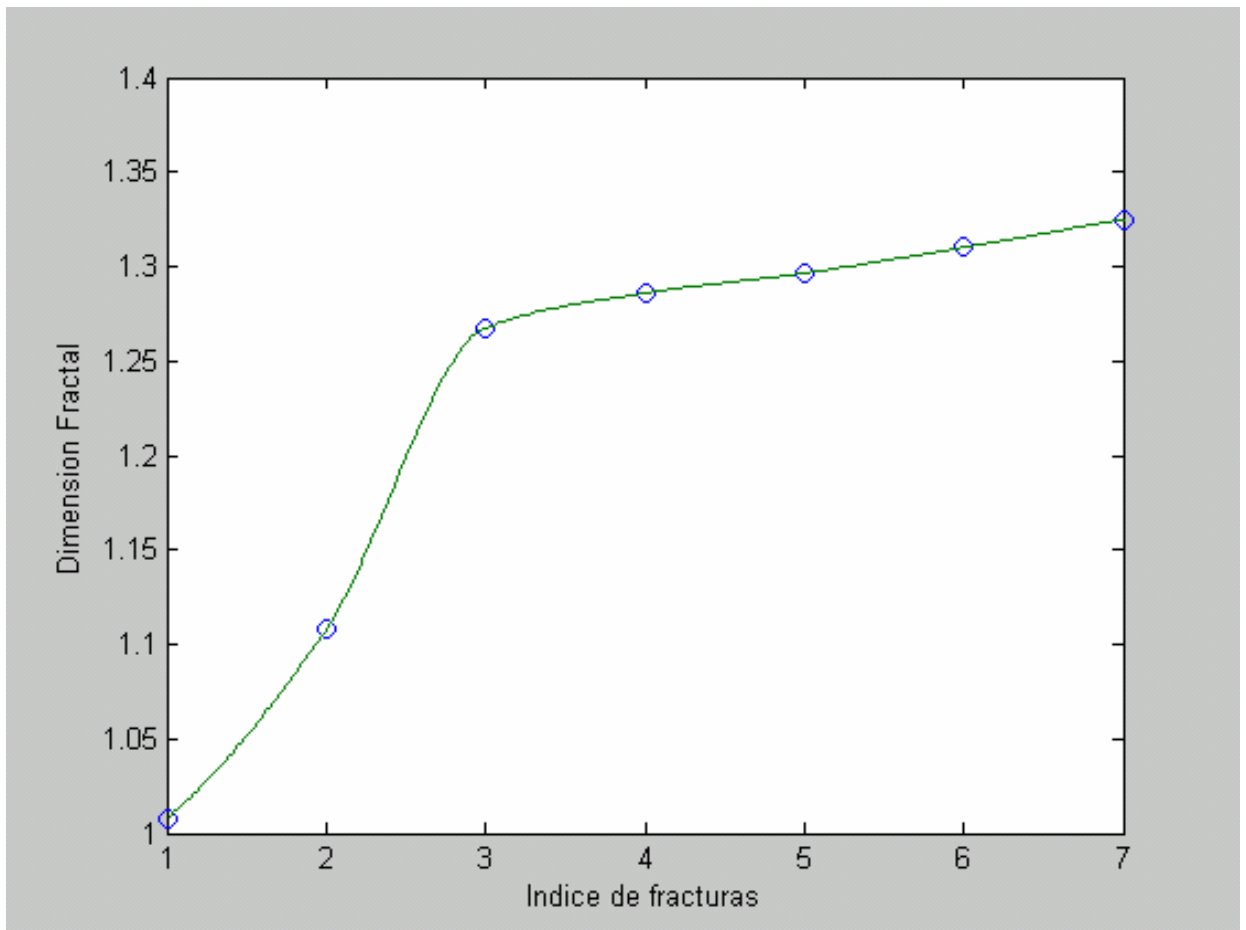
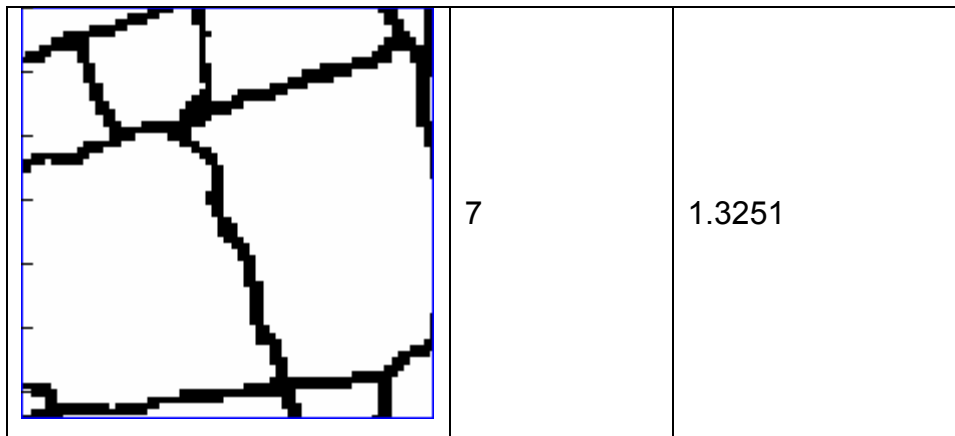
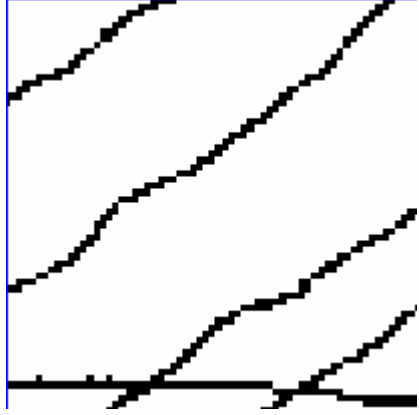

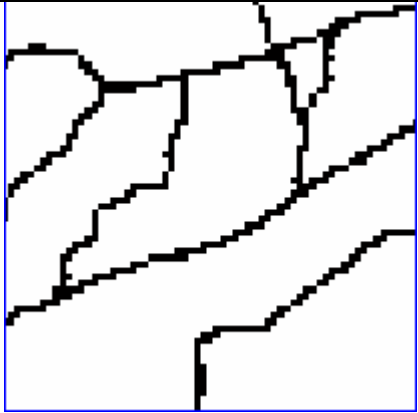

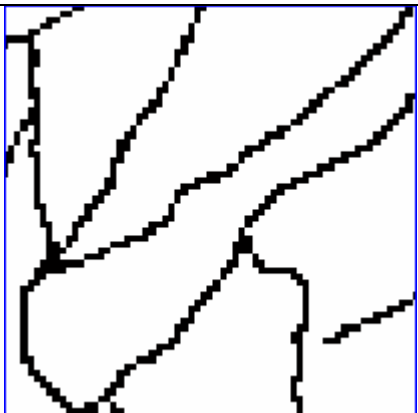


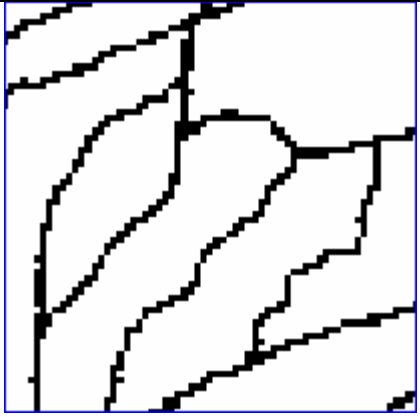
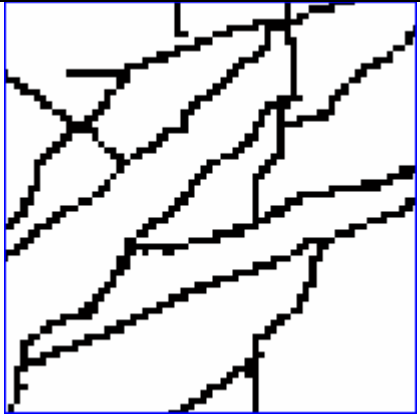
Figura 26. Relación de Dimensión Vs. Índice de fracturas

TABLA 9. Tabla de datos para redes de fracturas con iguales aperturas y en la cual la intensidad de fracturamiento esta dada por el número de fracturas en un área de 64x64 píxeles⁷.

Imagen	N° fracturas	dimensión
	5	1.1783
	6	1.2008

⁷ Un píxel tiene un área de $7,99 \times 10^{-6} \text{m}^2$.

	7	1.2385
	8	1.2482
	9	1.2713

	10	1.3005
	11	1.3721

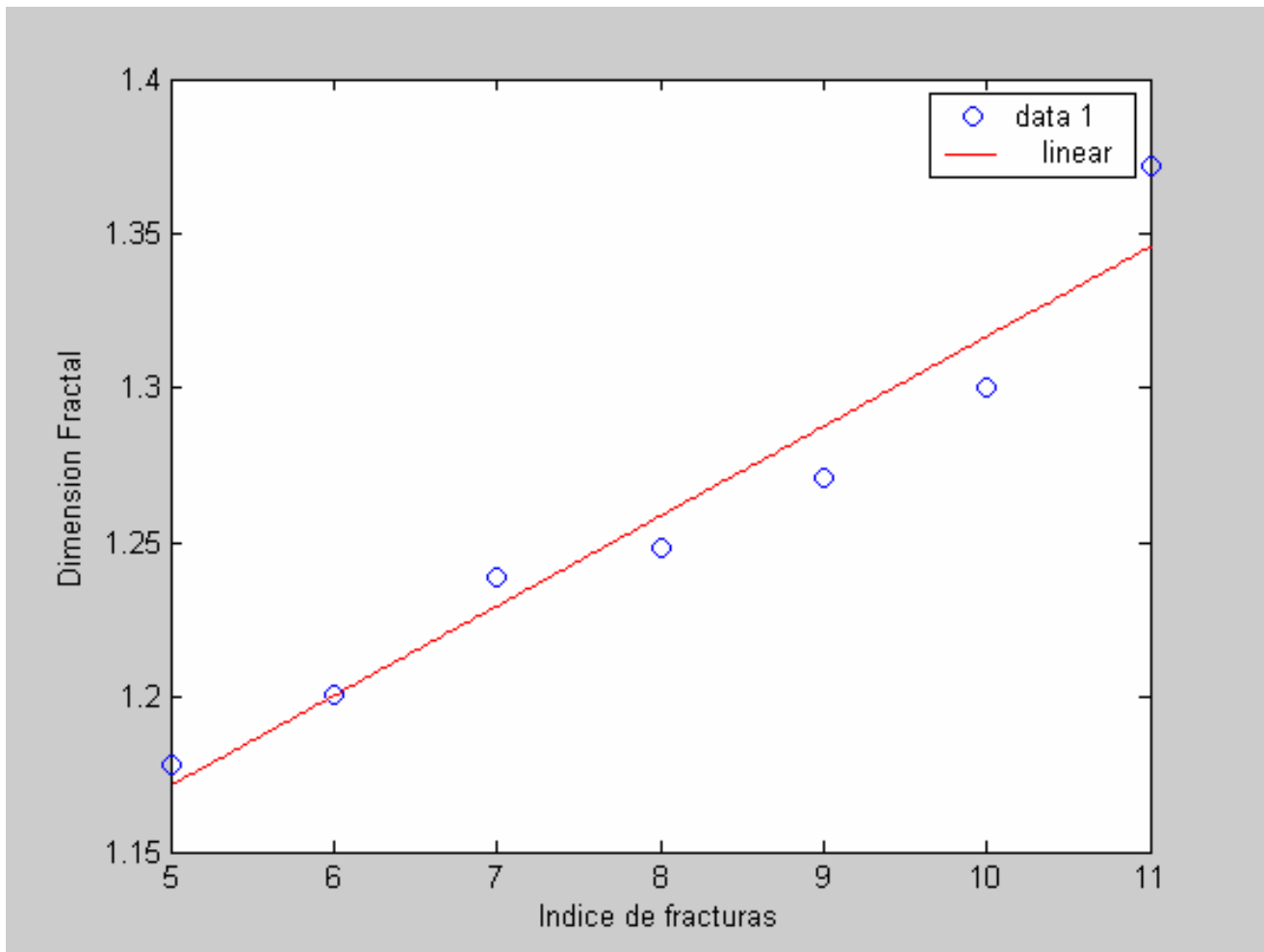


Figura 27. Relación de Dimensión Fractal Vs. Índice de Fracturas

La relación se observa casi lineal e indica la forma en que aumenta la dimensión fractal con el índice de fracturamiento, es decir, están relacionados directamente.

5.3 Datos para el Túnel 10

Las mediciones de las fracturas en este Túnel se realizaron iniciando a la entrada del túnel y se termino en el frente de explotación del mismo, para las mediciones de fracturas realizadas en este túnel se tomaron cuatro tramos de scanline, los cuales presentan las siguientes direcciones, el primer tramo S18E, con una longitud de 50m, el segundo tramo tiene una dirección S18E y su longitud es de 50m., el tramo 3 tiene una dirección de S20E y su longitud medida en metros es

50, el último tramo tiene una dirección de S21E y la longitud es de 27m., la figura 28 representa las direcciones de fracturas de este túnel con sus respectivos scanline.

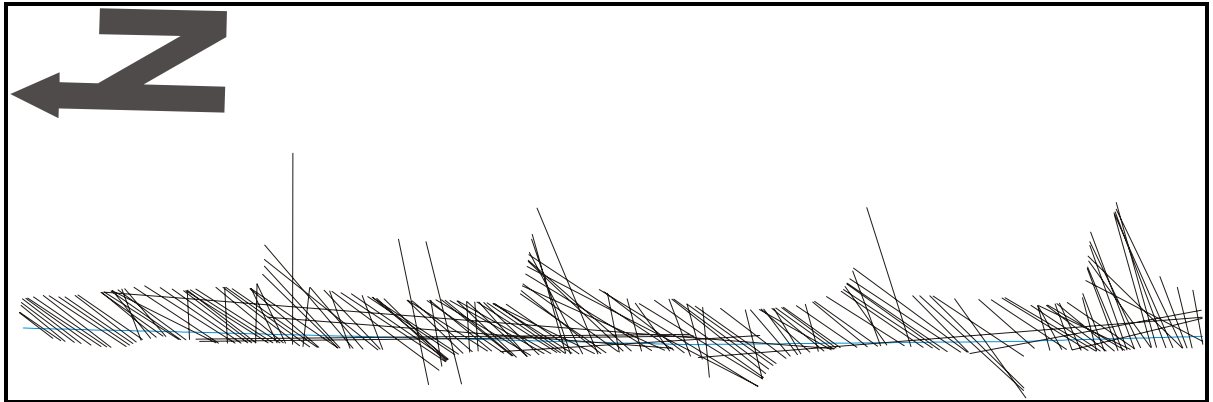


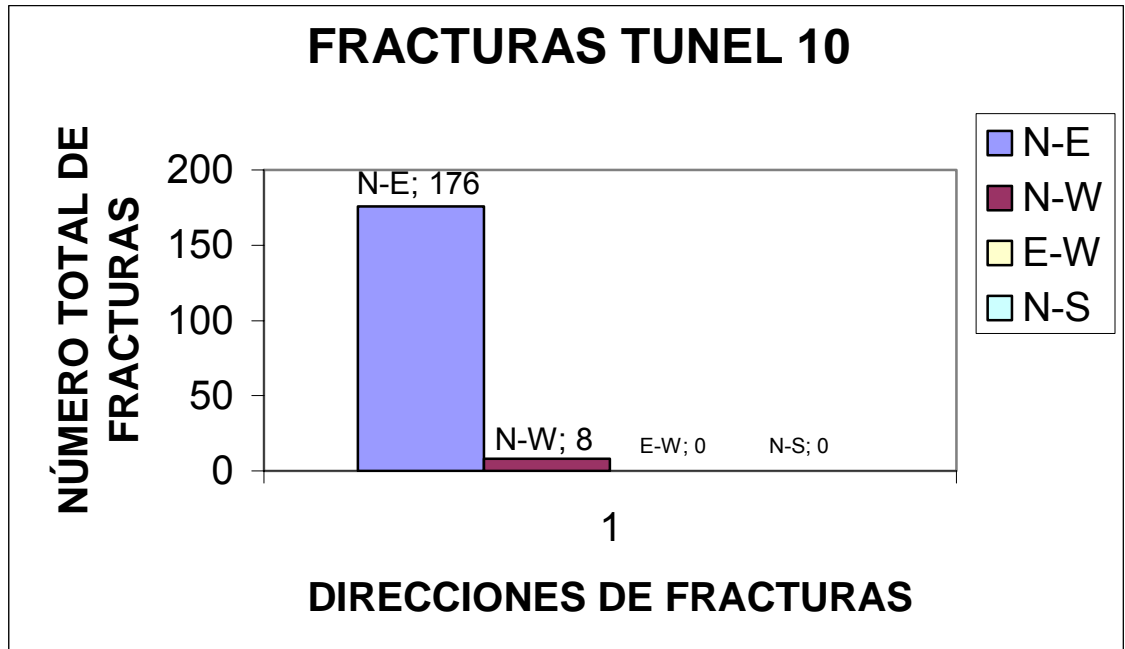
Figura 28. Scanline y trazos de fracturas para el Túnel 10.

Seguidamente se pueden observar los datos obtenidos para este túnel.

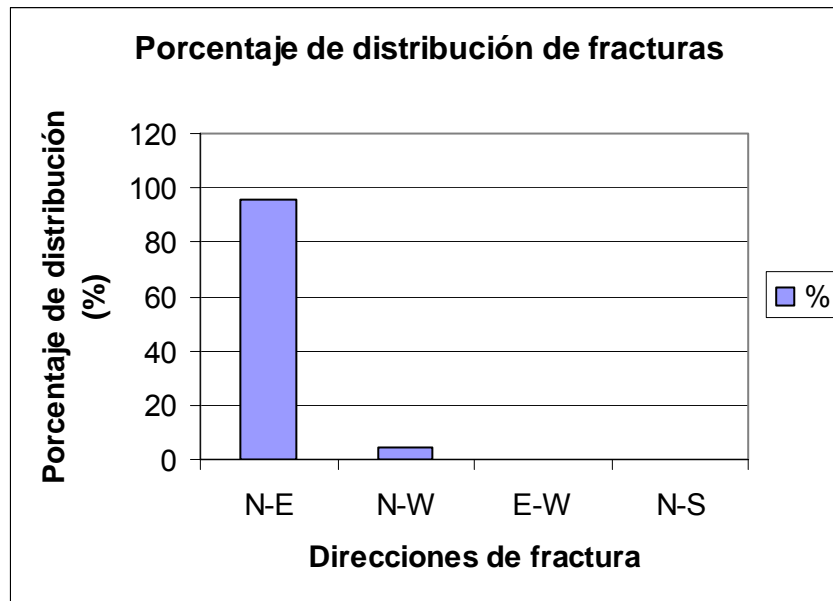
TABLA 10. Datos túnel 10.

Datos Túnel 10	
Detalle	Cantidad
Total de Fracturas	184
Longitud Scanline	177m
Tendencias	3
Tendencia 1(T1) (N20E)	126
Tendencia 2(T2) (N70E)	49
Tendencia 3(T3) (N20W)	9
Densidad Total de Fracturas	1,04
Densidad de Fracturas T1	0,71
Densidad de Fracturas T2	0,28
Densidad de Fracturas T3	0,051

El porcentaje de cada dirección de fracturas y el número de fracturas por cada dirección se graficaron en diagramas de barra (figura 29), la dirección principal de fracturamiento en el túnel 10 es N-E, representando un 95% del total de la población de fracturas, un 5% para las fracturas de dirección N-W.



(a)



(b)

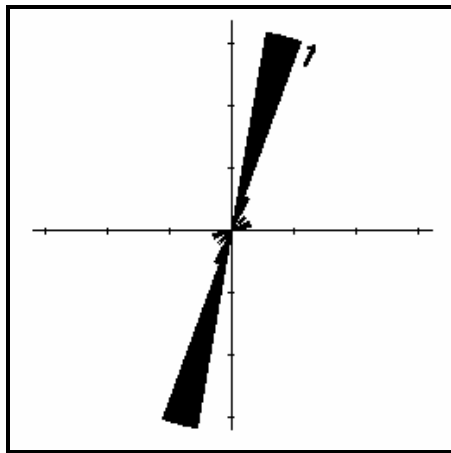
Figura 29. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de distribución de las mismas (b), para cada una de las direcciones.

Los datos de orientación de las fracturas correspondientes a este túnel fueron graficados en un diagrama de Rosetas (Figura 30), en el cual se observan las tres direcciones principales de fracturamiento; en el primer tramo se tienen en total 51 datos de fracturas en el cual la dirección principal de fracturamiento se encuentra entre N10E a N20E, figura 30(a), en este tramo se observa un alto grado de fracturamiento inducido por lo que el plano de discontinuidad de las fracturas naturales es difícil de seguir en las paredes del túnel; el espaciamiento para las fracturas correspondiente a esta dirección presenta un rango de 1-2 m.

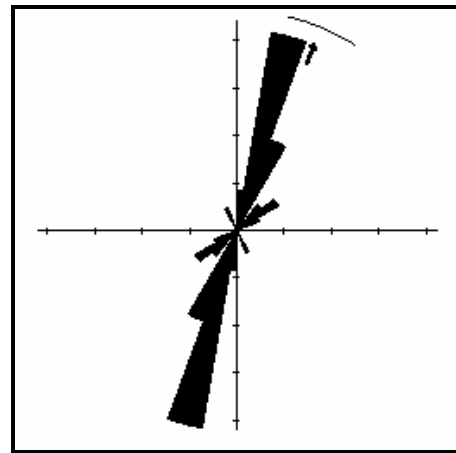
En el tramo 2 hay 59 fracturas en total y se tienen dos direcciones predominantes del fracturamiento una en dirección N20-30E y N60-70E, figura 30(b), las fracturas en este tramo conservan el mismo espaciamiento mencionado anteriormente.

En el tercer tramo se observaron 40 datos de fracturas dentro de los cuales esta predominando la dirección N10-20E, figura 30(c), el espaciamiento en esta dirección no varia.

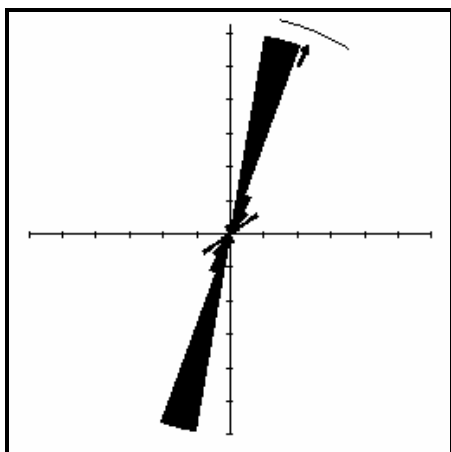
En el último tramo se tienen 34 datos de fracturas en las cuales se observaron dos direcciones predominantes del fracturamiento, N10-20E, N50-60E, figura 30(d); para este sector del túnel las fracturas con direcciones N50-60E se observan discontinuas y su espaciamiento varia entre 1-2m.



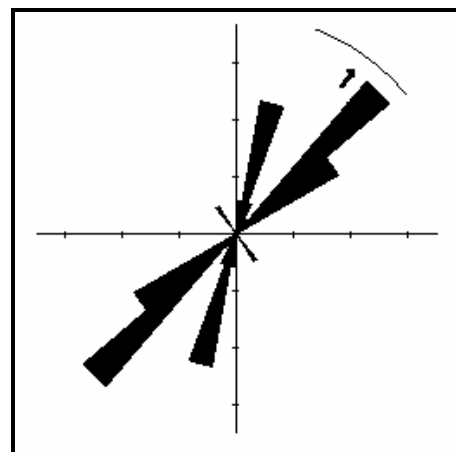
(a)



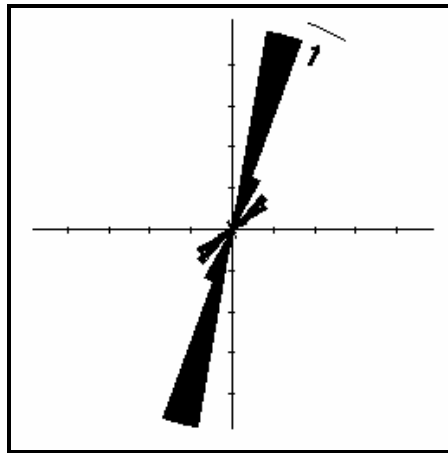
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 30. Diagrama de rosetas para las fracturas del túnel 10.

(a) Primer tramo donde la dirección principal es N10-20E; (b) segundo tramo cuyas direcciones principal son N20-30E y N60-70E; (c) tramo tres donde la dirección predominante es N10-20E; (d) último tramo en donde se observan dos direcciones de fracturamiento predominantes, N10-20E y N50-60E; (e) diagrama general en donde están representados la totalidad de los datos para el túnel 10.

5.3.1 Dimensión fractal para el túnel 10

Para hallar la dimensión fractal en este túnel se utilizó el mismo procedimiento descrito en el túnel 6, en este caso solo se contó con dos imágenes de las redes las cuales se muestran en la figura 31.

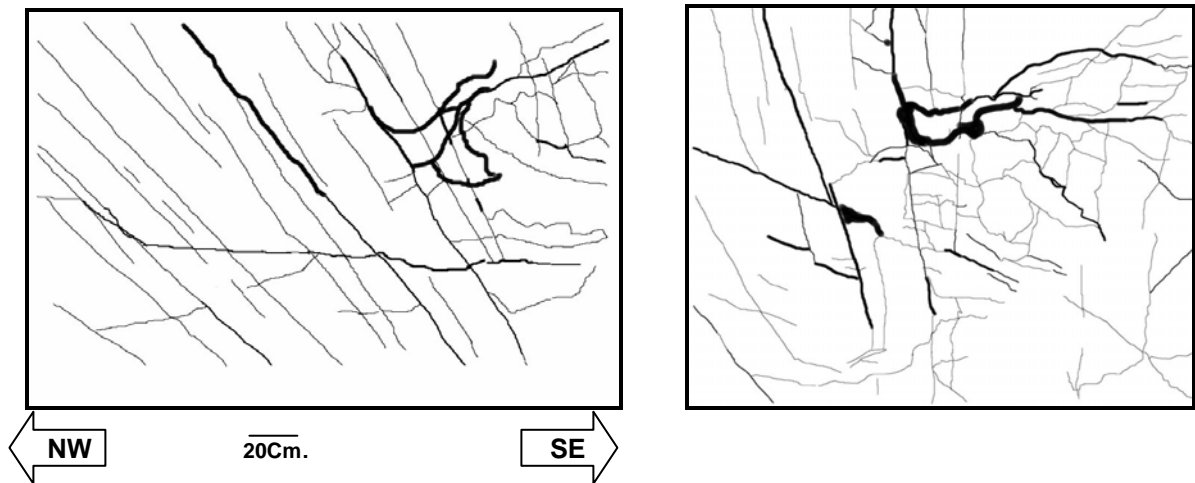


Figura 31. Imágenes de las redes de fracturas observadas en el techo del túnel 10.

Para este caso también se calculo la dimensión fractal por los dos métodos mencionados anteriormente, y obteniéndose los siguientes resultados (tablas 11 y 12), el método de Box-Counting se aplico a las dos imágenes obtenidas para este túnel, teniendo en cuenta diferentes posiciones en la imagen y la dimensión obtenida está en un rango de valores de 0,42083-1,204; en el método de análisis de Variograma, los valores de dimensión están en un rango de valores de 1,7648-1,8892, estos valores altos pueden estar significando una variación en la dirección de las fracturas y además con la variación de la distribución de las mismas fracturas.

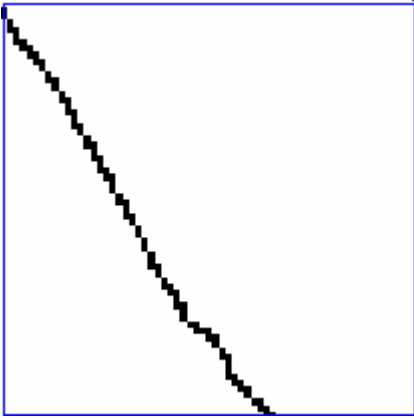
TABLA 11. Dimensión por el método de Box-counting

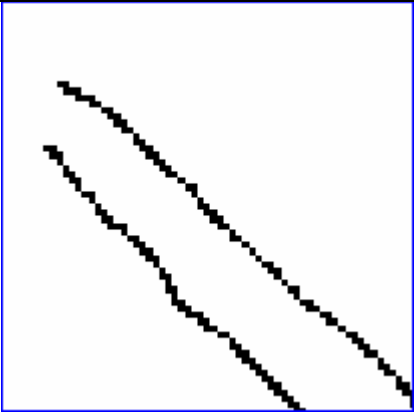
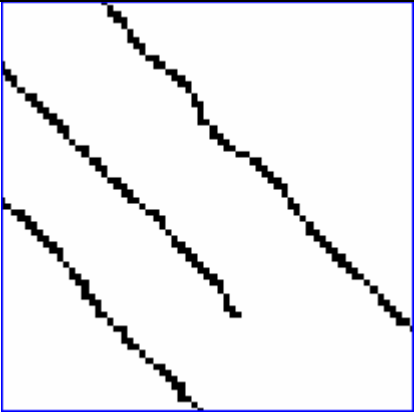
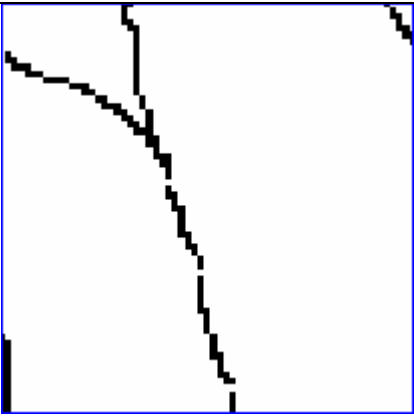
Box-Counting			
No. Iteraciones 6			
Imagen	Tamaño 64x64		
	X=100/Y=150	X=280/Y=360	X=450/Y=400
Red79	0.93672	1.021	1.0775
Red80	0.42083	1.0257	1.204

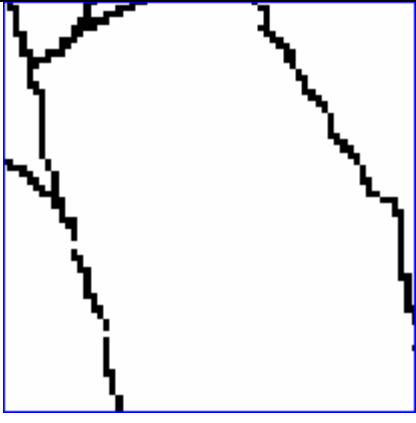
TABLA 12. Dimensión por el método de variograma

Dimensión Fractal por Variograma						
Imagen No.	Vertical			Horizontal		
	Tamaños Completa/Pasos			Tamaños Completa/Pasos		
	1-10	2-10	3-10	1-10	2-10	3-10
Red79	1.8146	1.8696	1.8892	1.8167	1.8642	1.8761
Red80	1.7648	1.7893	1.8078	1.782	1.806	1.8216

TABLA 13. Tabla de datos en la cual la intensidad de fracturas esta dada por el número de fracturas que hay en un área de 64x64 píxeles

Imagen	No. Fractura	Dimensión
	1	0.9211

	2	1.04
	3	1.0569
	4	0.97325

	5	1.0467
---	---	--------

Las observaciones de los datos para este túnel no generan resultados aceptables, ya que no se puede decir que exista una relación entre la intensidad de fracturamiento y la dimensión fractal, al parecer la dimensión fractal está siendo afectada en este caso por el espaciamiento de las fracturas, tal como se observa en las imágenes de la tabla superior.

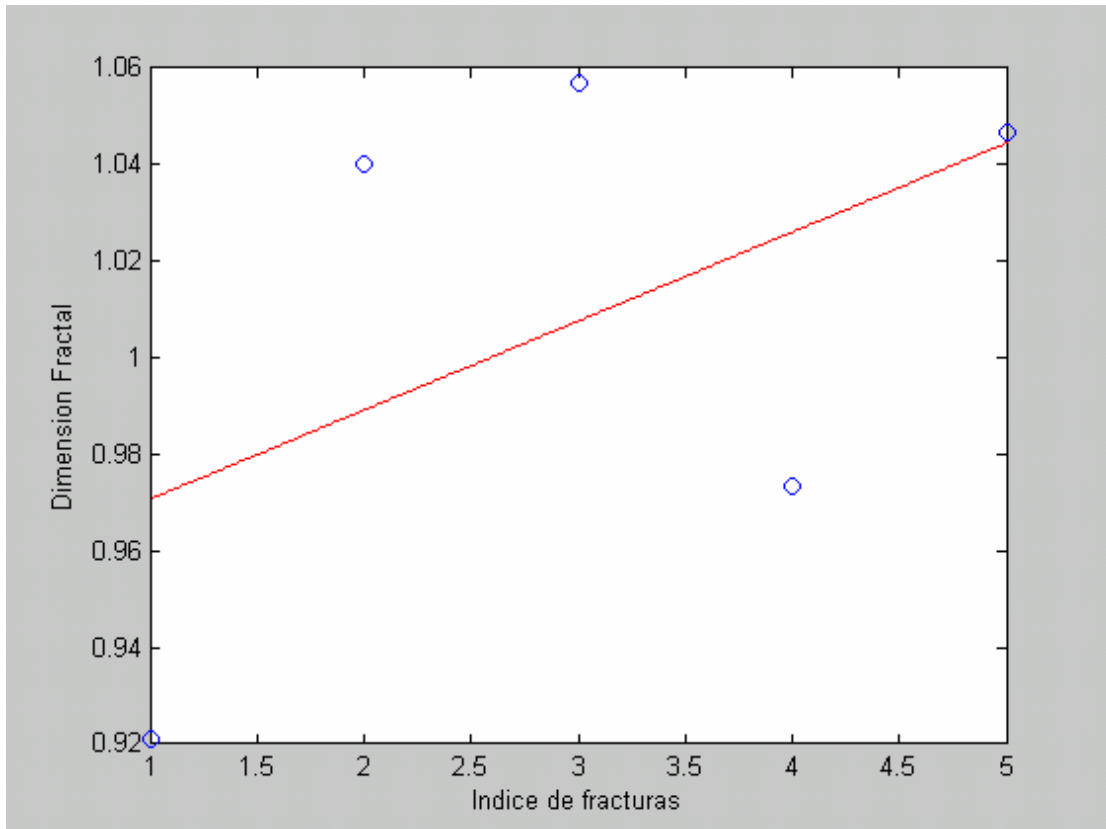


Figura 32. Relación de Dimensión Vs. Índice de fracturas

5.4 Datos para el túnel 11

Al igual que en el túnel 10 las mediciones de fracturas para este túnel se iniciaron en la entrada del mismo, abarcando solo los veintiséis primeros metros del túnel y dando por terminado la recolección de datos en este túnel, debido a los problemas de estabilidad que se presentaron en este mismo túnel. Las direcciones de los scanline y las longitudes de estos medidos en este túnel son, N5E y 18m., S25E y 15m., para los tramos 1 y 2 respectivamente. La figura 33 representa los Scanline con sus respectivos datos de fracturas.

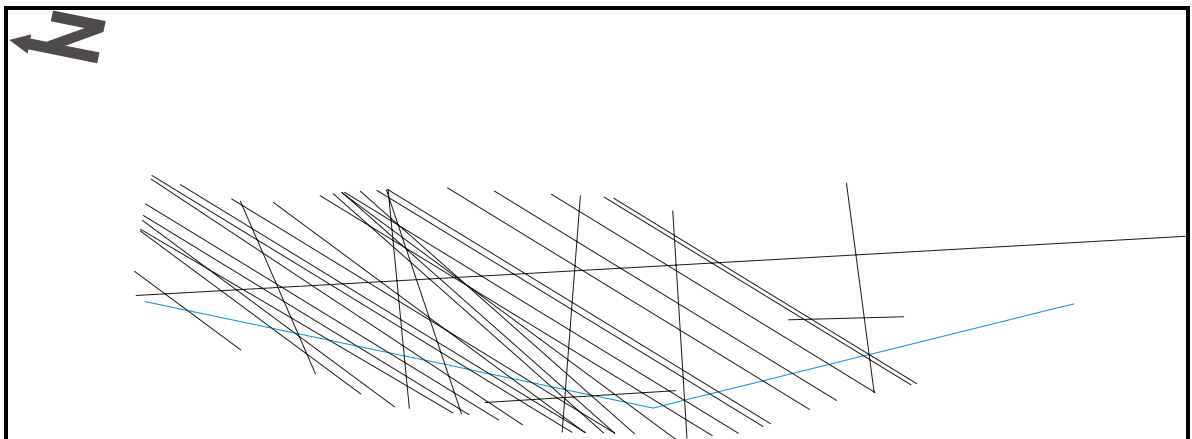


Figura 33. Scanline y trazos de fractura para el túnel 11.

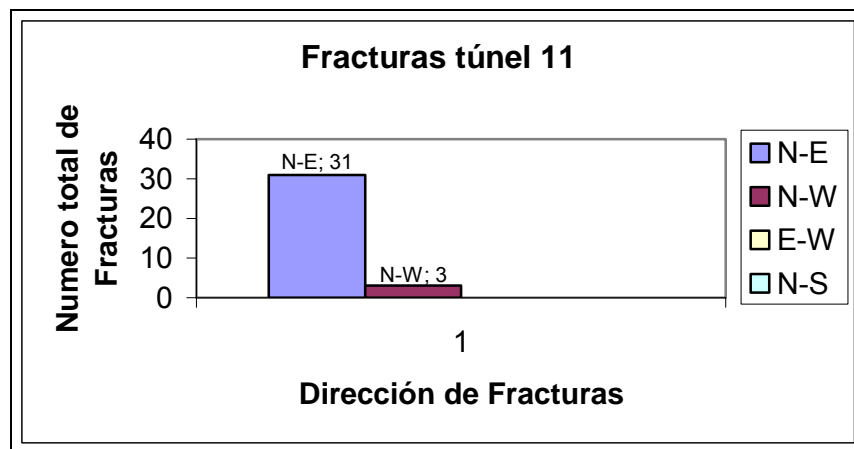
A continuación se presentan en la tabla 13 los datos obtenidos para este túnel

TABLA 14. Datos túnel 11.

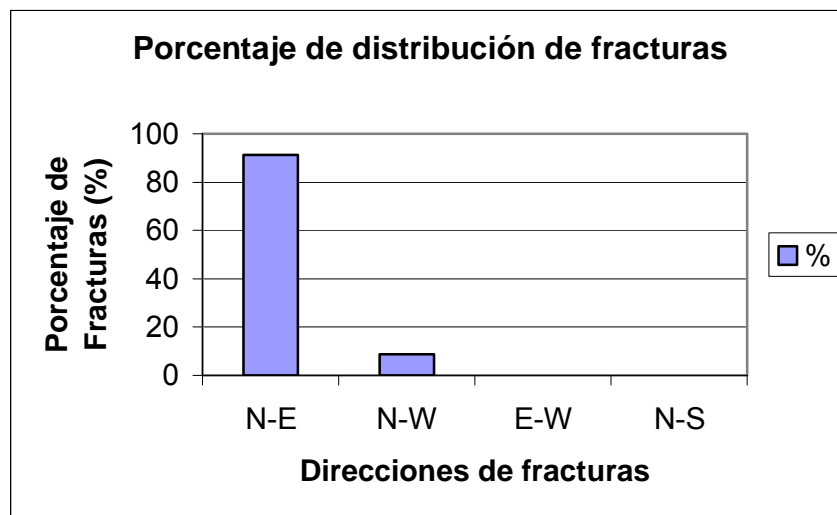
Datos Túnel 11	
Detalle	Cantidad
Total de Fracturas	34
Longitud Scanline	33m
Tendencias	3
Tendencia 1(T1) (N20E)	24
Tendencia 2(T2) (N70E)	7

Tendencia 3(T3) (N20W)	3
Densidad Total de Fracturas	1,03
Densidad de Fracturas T1	0,72
Densidad de Fracturas T2	0,21
Densidad de Fracturas T3	0,090

El porcentaje de cada dirección de fractura y el número de fractura por cada dirección se graficaron en los diagramas de barra (figura 34), en donde se puede observar que la dirección predominante es N-E, representando un 91% del total de los datos registrados y 9% restante corresponde a la dirección N-W.



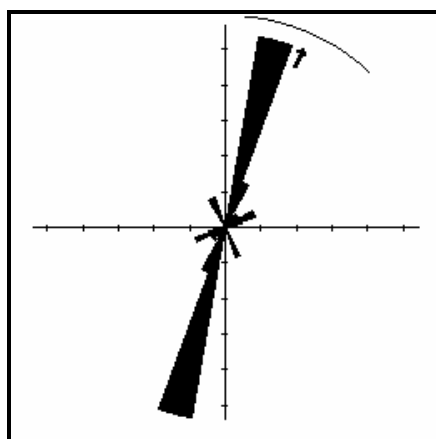
(a)



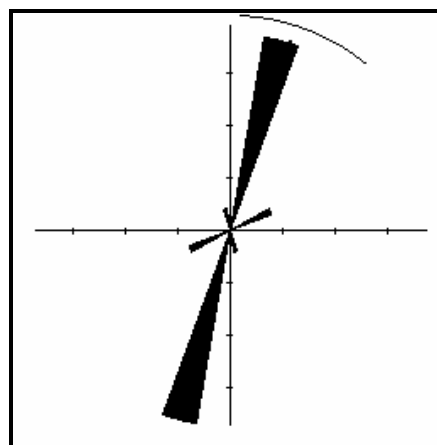
(b)

Figura 34. Diagrama de barras que ilustra el número total de fracturas(a) y el porcentaje de las mismas (b) en cada dirección.

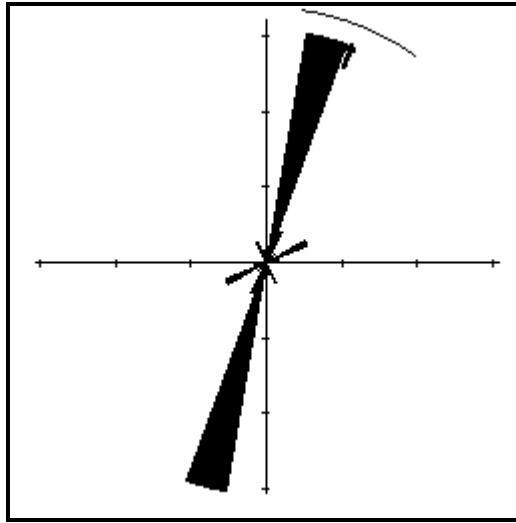
Los datos de orientación fueron graficados en los diagramas de rosetas (figura 35), en los cuales se observan las direcciones principales de fracturamiento para este túnel; en el primer tramo se obtuvieron 22 datos de fracturas en el cual la dirección principal del fracturamiento es N15-20E; las fracturas en este tramo se observan muy irregulares y además no son continuas. En el tramo 2 hay 12 datos de fracturas y predomina la dirección N15E.



(a)



(b)



(c)

Figura 35. Diagrama de rosetas para el Túnel 11.

(a) Primer tramo donde la dirección predominante es N15-20E; (b) tramo 2 el cual la dirección principal de las fracturas es N15E; (c) diagrama total donde se representan todos los datos para este túnel.

6 Discusión

6.1 Origen del sistema fracturado

El proceso de fracturamiento es muy evidente en el sector de la mina “El Carrancho”, lo que sugiere que la roca ha estado expuesta a procesos de acomodación debido principalmente a los diferentes esfuerzos tectónicos locales, incluyendo los procesos geológicos como enterramiento y levantamiento de la cuenca, los cuales generaron tres direcciones principales de fracturamiento que se muestran en los resultados descritos en el capítulo anterior; así como también la formación de fallas de tipo normal que se observan en los alrededores de la mina y dentro de los mismos túneles.

6.2 Orientación de Fracturas

Las principales direcciones de fracturamiento son N10-20E, siendo esta la dirección en la cual se observan la mayor cantidad de fracturas, seguidamente se encuentran las fracturas N60-70E y un pequeño porcentaje de fracturas N70W, que sugieren por su poca densidad que los esfuerzos de cizallamiento no tuvieron una gran influencia en esta dirección.

6.3 Dimensión fractal y las redes de fracturas

La geometría fractal es relativamente una nueva aproximación para la descripción y modelamiento de procesos y objetos complejos. En particular, la aplicación de los fractales para las redes de fracturas es algo muy prometedor, ya que las redes

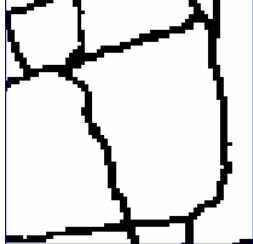

de fracturas son observadas desde el punto de vista de objetos autosimilares y esta particularidad permite que, conociendo el comportamiento de un objeto en una escala determinada se pueda extrapolar a una escala distinta. En el caso de la intensidad de fracturamiento, conociendo la distribución de la intensidad en una escala se puede determinar la intensidad del fracturamiento en otra o todas las escalas en las cuales el objeto presenta autosimilaridad, incluyendo aquellas escalas en las cuales no es posible observar o medir por ser demasiado pequeñas o muy grandes.

De los resultados obtenidos en el capítulo anterior para las redes de fracturas se demuestra que existe una gran inconsistencia entre las dimensiones fractales de las mismas redes de fracturas obtenidas por los dos métodos usados. Esto puede ser atribuido a las diferentes características de las redes, tales como, la orientación, el espaciamiento, la densidad, entre muchos otros factores. El método de box-counting proporciona una gran alternativa para medir la dimensión fractal de las redes de fracturas, y en la cual se puede establecer el número de fracturas por unidad de área.

En este estudio se observó que las redes de fracturas estudiadas a escala mesoscópica poseen un rango de valores de dimensión fractal obtenida por el método de Box-Counting variando entre 1,0796-1,4762, siendo 1,0796 el valor atribuido para las redes de fracturas que contengan valores de intensidad de fracturas más pequeños, y el valor de 1,4762 para las redes de fracturas cuya intensidad de fracturamiento sea alto, es decir, que este por encima de las 200 fracturas por m^2 ; los valores anómalos (0,26413 y 0,96086) obtenidos no fueron tenidos en cuenta ya que al observar la red se halló que no hay una mayor influencia de las fracturas en estas dos posiciones.

Del análisis de los datos de la figura 36 se encuentra que la dimensión fractal crece a medida que la intensidad de fracturamiento aumenta, pero este aumento

no es proporcional a la intensidad, posiblemente esto se deba a los diferentes atributos que poseen las fracturas, ya que se observó también que la apertura de la fractura juega un papel importante en este aspecto, es decir, que la dimensión fractal aumenta cuando la apertura de la fractura es alto, para este estudio la apertura corresponde al grosor de los trazos de la fractura. A continuación se muestra un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente:

Imagen	Dimensión Fractal
	1.3541
	1.476

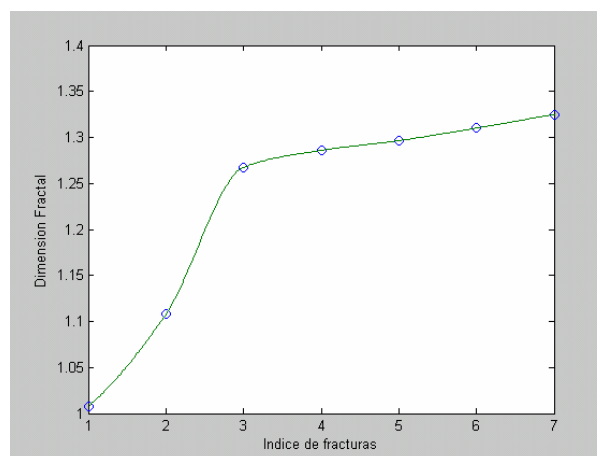


Figura 36. Dimensión Fractal Vs. Índice de fracturamiento

Considerando una red de fracturas que no este influenciada por el parámetro de apertura, es decir, que las fracturas posean la misma apertura, se elaboró una grafica para relacionar la Dimensión fractal y la intensidad de fracturamiento, de la cual se observa que sigue conservando la tendencia de los resultados discutidos anteriormente, es decir, la dimensión fractal crece a medida que aumenta la intensidad de fracturamiento, pero, no es posible determinar con claridad la tasa de aumento de estos dos parámetros, para una mejor claridad de lo anteriormente expuesto obsérvese la figura 37.

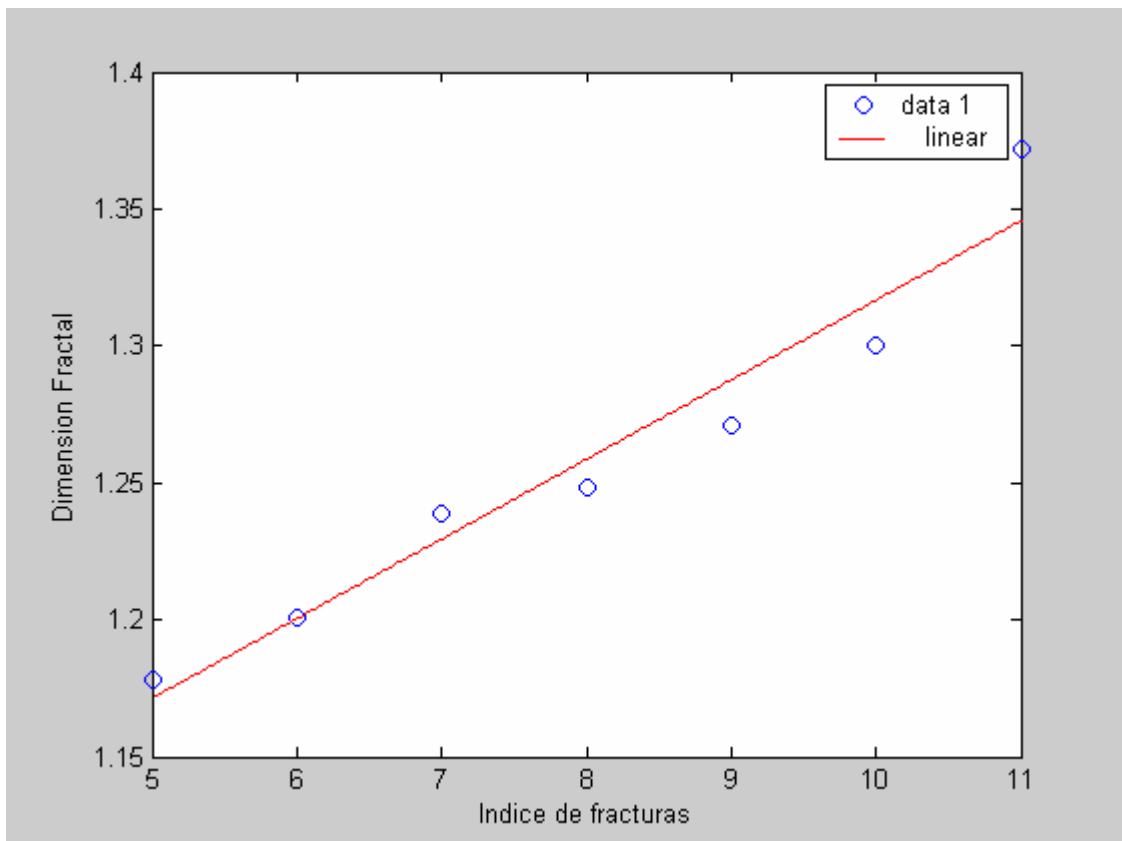


Figura 37. Dimensión Fractal Vs. Índice de Fracturas

En general el estudio de las redes de fracturas por medio de la geometría fractal es un trabajo que requiere gran atención, ya que las redes de fracturas están influenciadas por muchos parámetros y que a su vez también están relacionados

con la dimensión fractal como se observó anteriormente, por lo tanto el análisis fractal requiere un cuidado especial para poder realizar una buena caracterización del sistema de fracturas. De acuerdo con los resultados obtenidos el método de Box-Counting es el más acertado en este análisis, pero existe la posibilidad de utilizar otros métodos y que se puedan comparar con la conectividad de las fracturas, la cual es muy importante tener en cuenta cuando se analiza el flujo de fluido a través de la red de fracturas.

7 Conclusiones

1. Teniendo en cuenta las orientaciones de las fracturas tomadas en los túneles de la Mina “El Carrancho” se observa que existen patrones de fracturamiento en la Formación Rosablanca y que pueden ser estudiados usando la técnica de la geometría fractal para describir formas y objetos complejos con características similares.
2. Las principales direcciones de fracturas encontradas en la Mina “El Carrancho” fueron N10-20E, N60-70E, y N70W, observándose que la dirección N10-20E es la que más predomina en el sector, representando más del 80% del total de las fracturas.
3. Los valores de la dimensión fractal obtenidos por el método de análisis de variogramas están asociados más a superficies de fracturas que a las mismas redes de fracturas esto se debe a que el algoritmo para calcular la dimensión por el método de variogramas esta diseñado para definir vectores que almacenen rangos de colores y en este caso las imágenes usadas son binarias, es decir los colores se definen como blancos o negros.
4. Los valores de la dimensión fractal obtenidos por el método de Box-Counting presentan susceptibilidad a la identificación de las diferentes propiedades de las redes de fracturas, tales como la densidad de fracturas, apertura, direcciones de fracturas, dominantes en el rango de escala estudiado.
5. El método de Box-counting presenta una buena alternativa para relacionar la dimensión fractal con la intensidad de fracturamiento, ya que se observa que existe una dependencia directa entre estos dos aspectos.

6. La existencia del aumento de la dimensión fractal influenciada por el aumento en la intensidad de fracturamiento se traduce como una dinámica en el crecimiento de las redes de fracturas. Esta conclusión es fundamental ya que establece que las redes de fracturas puedan considerarse como sistemas que se propagan con relación a ciertos fenómenos naturales que afectan dichos sistemas, como por ejemplo cuando el material es sometido a una carga considerable.
7. Es importante resaltar que el análisis fractal realizado con las imágenes de las redes de fracturas es una nueva opción que se quiere implementar para caracterizar el comportamiento y los atributos de los patrones de fracturamiento en los Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) y además analizar estos comportamientos teniendo en cuenta las diferentes escalas a las que se presentan los sistemas fracturados.
8. Este trabajo de investigación es una fase inicial del análisis fractal aplicado a los Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF), teniendo en cuenta la intensidad de fracturamiento en un área determinada; corresponde a la siguiente fase realizar las pruebas y análisis correspondientes para determinar la relación de la dimensión fractal con los diferentes atributos de las redes de fracturas y la dependencia de estos a escalas diferentes.

8 Recomendaciones

Este trabajo de investigación es una primera aproximación a la aplicación del análisis fractal a los Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF), como los resultados encontrados son prometedores ya que existen parámetros de las redes de fracturas que se relacionan directamente con la dimensión fractal; se propone como trabajos de investigación:

1. Evaluar la dimensión fractal obtenida por el método de Box-Counting relacionándola con otros parámetros importantes en las redes de fracturas como por ejemplo con el espaciamiento y la apertura.
2. Hacer un análisis comparativo de la dimensión fractal obtenida para las redes de fractura teniendo en cuenta las mediciones a diferentes escalas.
3. Realizar las mediciones de las fracturas por el método de Scanline circular y evaluar los datos con el método "*Mass Dimension*", ya que estos dos procedimientos tienen en cuenta la distribución de los puntos de intersección de las fracturas y el número de fracturas.
4. Encontrar la relación existente entre la dimensión fractal y la conectividad de las redes de fracturas, ya que este parámetro es muy importante para estudiar el flujo de fluidos en Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF).
5. Complementar este estudio con mediciones realizadas a redes de fracturas en escala microscópica para evaluar la variación de la intensidad de fracturamiento a escalas más pequeñas con el propósito de confirmar la relación de la dimensión fractal con la intensidad de fracturamiento en diferentes escalas.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

1. Davis John C. Statistics and Data Analysis in Geology. Third Edition. Editorial John Wiley & Sons. United States, New York. 2002.
2. Nelson Ronald A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Second Edition. Gulf Professional Publishing. Houston, Texas. 2001.
3. Peitgen Heinz-Otto, Jürgens Harmut, Saupe Dietmar. Chaos and Fractals, New Frontiers of Science. Springer-Verlag. Alemania. 1992.
4. Turcotte Donald L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge University Press. United States, New York. 1993.
5. Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow. U. S. National Committee for Rock Mechanics. Rock Fracture and Fluid Flow. Contemporary Understanding and Applications. National Academy Press. Washington, D.C. 1996.

Tesis de Grado:

6. ARCINIEGAS Nelson, COGOLLO Magda Lucia, PINTO Flavio Augusto. Estudio de factibilidad para la caracterización fractal de las formas del relieve mediante el desarrollo de una herramienta computacional basada en un sistema de análisis de imágenes [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Facultad de Ciencias; 1995.

7. BORRERO Mary Luz. Caracterización de fracturas en la Formación Rosablanca usando datos de afloramiento del sector SW de la Mesa de Los Santos. Santander [Tesis de Grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 2003.
8. DELGADO Jesús y GALVIS Gabriel. Evaluación Geológica minera de las calizas en la vereda La Laguna del municipio de Los Santos (Santander) orientada a la explotación con fines ornamentales [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 1994.
9. DÍAZ German y SUÁREZ Marco. Evidencias neotectónicas del Sistema de Fallas del Suárez en su confluencia con el Sistema de Fallas de Bucaramanga [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 1998.
10. ELJAIK Juan Carlos y MORENO Gerardo. Génesis, estratigrafía y evaluación del yeso en los permisos 729 y 730 de la Concesión 2491. Municipio de Los Santos, Santander [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 1991.
11. LEÓN Javier. Análisis estratigráfico de la Formación Rosablanca en la cuenca del Valle Medio del Magdalena [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 2002.

12. MACIAS Yaquelin y QUIJANO Joaquín Alberto. Estudio geomecánico de las minas de yeso “El Carrancho” y “La Caldera”, Municipio de Los Santos, Departamento de Santander [Tesis de grado]. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica; 1993.
13. MONTANA Clara y SUÁREZ Giovanny. Geología aplicada al esquema de ordenamiento territorial del Municipio de Los Santos [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 2000.
14. ROLON L. y CARRERO M. Análisis estratigráfico de la sección cretácica aflorante al oriente del anticlinal de Los Cobardes entre los municipios de Guadalupe-Chima-Contratación, Departamento de Santander [Tesis de grado]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 1995.
15. RUEDA Edgar y VÉLEZ Beatriz. Patrones de fracturamiento en la Formación Guaduas Sinclinal Checua-Lenguazaque y su relación con los yacimientos de gas asociado en mantos de carbón [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología; 1999.
16. SEVILLANO Ana. Diaclasas sistemáticas en las rocas Mesozoicas del límite Cordillera Ibérica-Sistema Central desarrollo temporal y su relación con el ciclo alpino [Tesis de grado]. España: Universidad de Salamanca. Departamento de Geología; 2000.

Artículos:

17. Alfonso Carlos. Los episodios evaporíticos de la Formación Rosablanca. Bogotá. En: Contribuciones del Proyecto Cretácico [Publicaciones Especiales de Ingeominas]. Vol. 16. 1985.
18. Babadagli Tayfun, Develi Kayhan. Fractal Characteristics of rock fractured under tension. Theoretical and applied Fracture Mechanics 39. 2003. p.73-88.
19. Babadagli Tayfun, Develi Kayhan. Fractal Analysis of Natural and Synthetic Fracture Surfaces of Geothermal Reservoir Rocks. Proceeding World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000. p.2515-2520.
20. Babadagli Tayfun, Develi Kayhan. Evaluation of Outcrop Fracture Patterns of Geothermal Reservoirs in Southwestern Turkey. Proceeding World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000. p.2521-2526.
21. Babadagli Tayfun, Develi Kayhan. Quantification of Natural Fracture Surfaces Using Fractal Geometry. Mathematical Geology. Vol.30, N°8.1998. p.971-998.
22. Ballesteros I. y Nivia A. La Formación Ritoque: Registro sedimentario de una albufera de comienzos del Cretácico. Bogotá. En: Contribuciones del Proyecto Cretácico [Publicaciones Especiales Ingeominas]. Vol.16. 1985.
23. Baumeister Julia and Spratt Deborah. A Comparison of Fracture Sampling Techniques in the Field. FRP Research Report. Vol.9. 2003.

24. Cardozo E. y Ramirez C. Ambientes de depósito de la Formación Rosablanca. Área de Villa de Leiva. Bogotá. En: Contribuciones del Proyecto Cretácico [Publicaciones Especiales Ingeominas]. Vol.16. 1985.
25. Chiles J. P. Fractal and Geostatistical Methods for Modeling of a Fracture Network. Mathematical Geology. Vol.20. N°6. 1988. p.631-654.
26. De Porta Jaime. Léxico Estratigráfico. Bogotá. Ingeominas. 1989.
27. Etayo Fernando y Rodríguez G. Edad de la Formación Los Santos. Bogotá. En: Contribuciones del Proyecto Cretácico [Publicaciones Especiales Ingeominas]. Vol.16. 1985.
28. Feltham Gregory and Spratt Deborah. Analytical Field Methods and Borehole Techniques for Fractured Reservoir Characterization. FRP Annual Report. Vol.9. 2003.
29. García Diego y otros. Modelos de generación del petróleo en el Valle Medio del Magdalena. Piedecuesta. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL. 2001.
30. Gómez Leonel. Presentación Técnica: Estudios Empíricos y de Modelamiento en la caracterización de Reservorios Fracturados. Piedecuesta. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL. 2002.
31. González Virgilio, Guerrero Carlos. Fractales: Fundamentos y Aplicaciones. Parte I. Concepción geométrica en la ciencia e ingeniería. Ingenierías. Vol.4, N°.10. 2001.

32. Guzmán Georgina. Los grifeidos *Aetostreon couloni* y *Ceratostreon boussingaulti* como indicadores de posibles oscilaciones marinas. Bogotá. En: Contribuciones del Proyecto Cretácico [Publicaciones Especiales Ingeominas]. Vol.16. 1985.
33. Julivert Manuel. La Morfología de la Zona de Mesas al SW de Bucaramanga. Bucaramanga. En: Boletín de Geología UIS. N°.1. 1958. p.8-40.
34. Julivert Manuel. Las Estructuras del Valle Medio del Magdalena y su significación. Bucaramanga. En: Boletín de Geología UIS. N°.6. 1961. p.33-52.
35. Klimkemberg Brian. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features. *Mathematical Geology*. Vol.26, N°.1. 1994. p.23-46.
36. Linares Roberto y otros. Modelamiento Estructural Cordillera Oriental. Piedecuesta. Instituto Colombiano del Petróleo. ECOPETROL. 1998.
37. Linares Roberto y Ortiz Alberto. Adquisición de información de geología de superficie en el Piedemonte del Valle Medio del Magdalena. Piedecuesta. División de Exploración y Producción. Instituto Colombiano del Petróleo. ECOPETROL. 1999.
38. Morales L. General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. Bogotá. 1958.
39. Ortega Orlando and Marrett Randy. Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group, Sandstone, San Juan

Basin, New Mexico. Texas. Journal of Structural Geology. Vol.22. 2000. p.571-588.

40. Ortiz Alberto, et al. Estratigrafía Secuencial del Grupo Basal del Valle Medio del Magdalena. Litoteca Nacional. Instituto Colombiano del Petróleo. ECOPETROL. 1997.
41. Ortiz Alberto, et al. Evaluación de la Calidad de Reservorio de las Formaciones Rosablanca y Tablazo en el Cretáceo del Valle Medio del Magdalena. Piedecuesta. Litoteca Nacional. Instituto Colombiano del Petróleo. ECOPETROL. 1998.
42. Rolón L. Numpaque L. Análisis estratigráfico secuencial del Cretáceo inferior en el Valle Medio del Magdalena, sector Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental. Bogotá. Informe técnico. ECOPETROL. 1997.
43. Sarmiento Luis. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Bogotá. Netherlands Research School of Sedimentary Geology. Vrije University. 2001.
44. Stearn D., Friedman M. Reservoirs in Fractured Rock. Texas. AAPG. Bulletin, Vol.6. 1972. p.82-101.
45. Suárez M. y otros. Estilos estructurales y potencial de entrapamiento de la sección Cretácea, Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Caracas, Venezuela. En: Memoria VII Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las cuencas Subandinas. 2000. p.56-381.

46. Ward D., Goldsmith R. Memorias Explicativas del Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12. Vol.23. Ingeominas. Bogotá. 1974.
47. Zamarreño Inés. Estudio Petrográfico de las Calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de los Santos. Bucaramanga. En: Boletín de Geología. UIS. N°.15. 1963. p.5-34.

Sitios Web:

48. Tutorial Sobre fractales. <http://www.mathworks.com>
49. Descubriendo los fractales.
http://www.dcc.uchile.cl/~rmeza/proyectos/Nubes_Fractales
50. Determinación de la dimensión fractal. <http://life.csu.edu.au/fractop>
51. Medir dimensión fractal (Applets).
<http://matap.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo8/1.html>

Software sobre fractales:

52. FRACLIN. Software desarrollado en la Universidad de Antioquia. 1991.
53. WINFRACT. Software desarrollado en Argentina. 1998.
54. WINFEED. Software desarrollado por Richard Parris en Phillips Exeter Academy. 1999.

ANEXOS

ANEXO A

MAPA DE FRACTURAS DE LA MINA “EL CARRANCHO”.

N-1.242.550

N-1.242.500

N-1.242.450

N-1.242.400

N-1.242.350

N-1.242.300

N-1.242.250

E-1.097.400

E-1.097.450

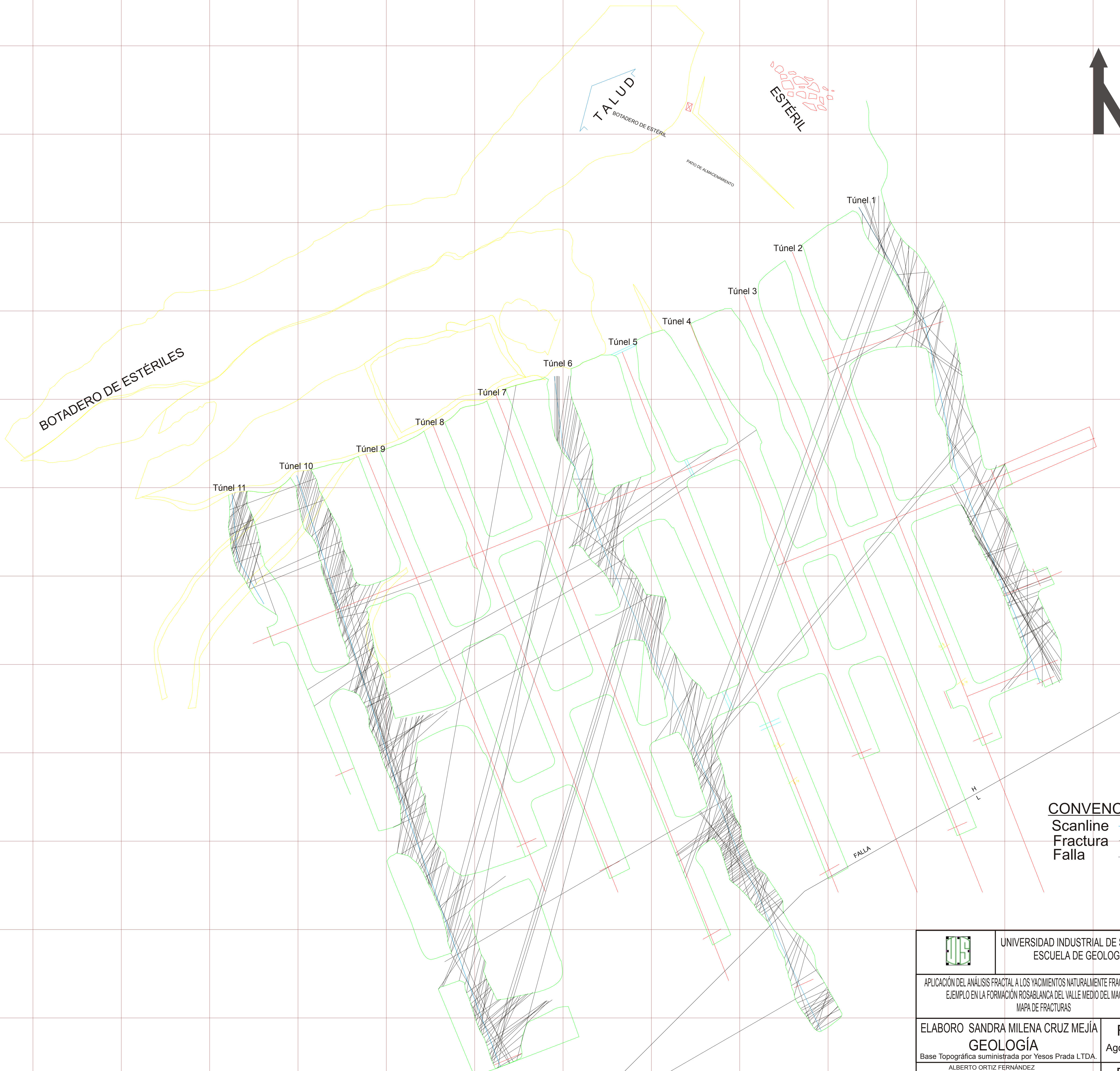
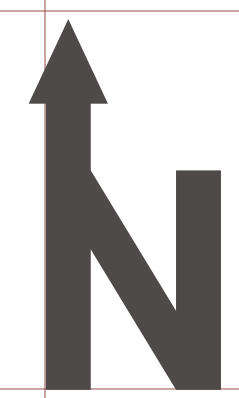
E-1.097.500

E-1.097.550

E-1.097.600

E-1.097.650

E-1.097.700



BOTADERO DE ESTÉRILES

TALUD

ESTÉRIL

PITIO DE ALMACENAMIENTO

Túnel 1

Túnel 2

Túnel 3

Túnel 4

Túnel 5

Túnel 6

Túnel 7

Túnel 8

Túnel 9

Túnel 10

Túnel 11

FALLA

CONVENCIONES
 Scanline ———
 Fractura ———
 Falla ———



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUOLA DE GEOLOGÍA

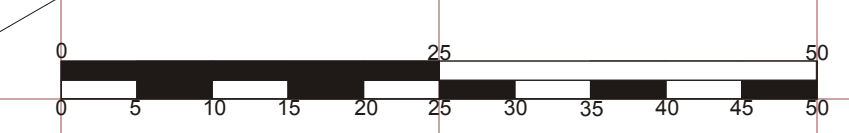
APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRACTAL A LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS (YNF):
EJEMPLO EN LA FORMACIÓN ROSABLANCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
MAPA DE FRACTURAS

ELABORO SANDRA MILENA CRUZ MEJÍA
GEOLOGÍA
Base Topográfica suministrada por Yesos Prada LTDA.

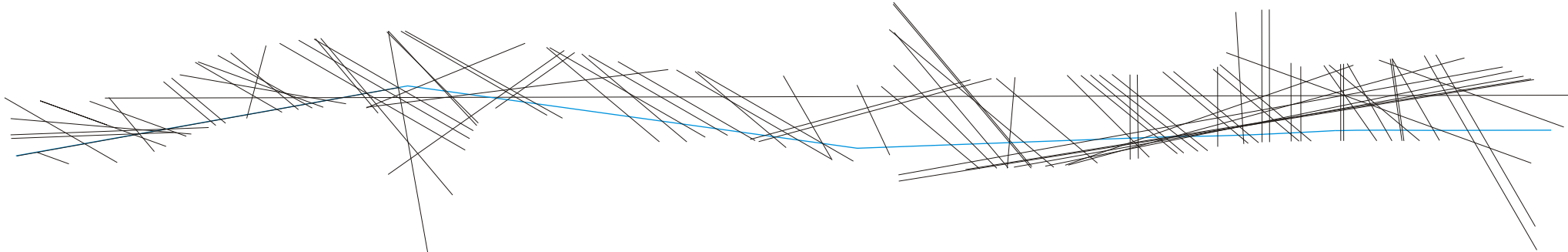
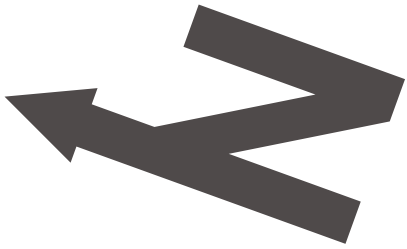
FECHA
Agosto de 2005

DIRIGIÓ ALBERTO ORTIZ FERNÁNDEZ
MSC.-ICP
RAFAEL ISAACS
MATEMÁTICO-UIS
RICARDO MIER UMAÑA
GEOLOGO-UIS

ESCALA
1:500



Scanline túnel 1



Tendencias: 3

Total de fracturas: 88

Tendencia 1(T1)(N20E) : 55

Tendencia 2(T2)(N70E) : 16

Tendencia 3(T3) (N20W): 17

Longitud Scanline Tunel 11: 139,3m

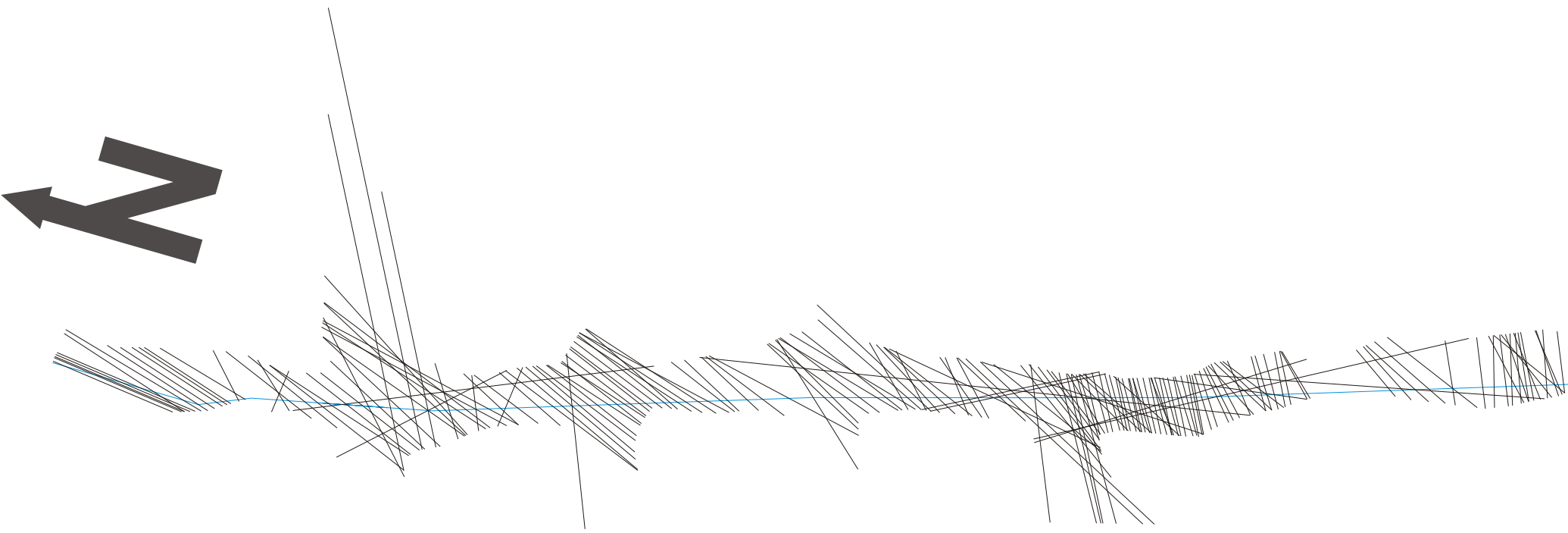
Densidad total de fracturas: No. de fracturas/longitud del scanline: $88/139,3=0,63$

Densidad de fracturas T1:0.39

Densidad de fracturas T2:0.11

Densidad de fracturas T3:0.12

Scanline túnel 6



Tendencias: 3

Total de fracturas: 182

Tendencia 1(T1)(N20E) : 87

Tendencia 2(T2)(N50E) : 83

Tendencia 3(T3) (N20W): 12

Longitud Scanline Tunel 11: 201m

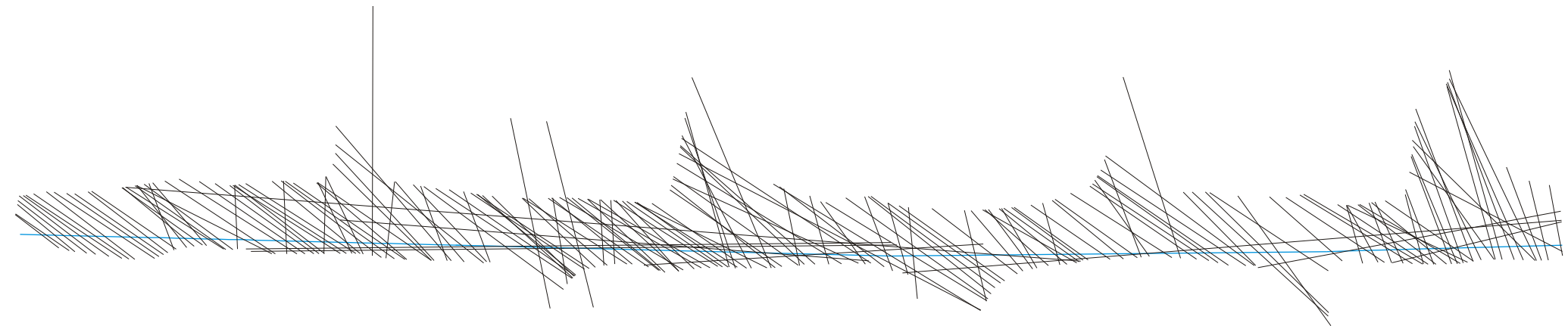
Densidad total de fracturas: No. de fracturas/longitud del scanline: $182/201=0,91$

Densidad de fracturas T1:0,43

Densidad de fracturas T2:0,41

Densidad de fracturas T3:0,06

Scanline túnel 10



Tendencias: 3

Total de fracturas: 184

Tendencia 1(T1)(N20E) : 126

Tendencia 2(T2)(N70E) : 49

Tendencia 3(T3) (N20W): 9

Longitud Scanline Tunel 10: 177m

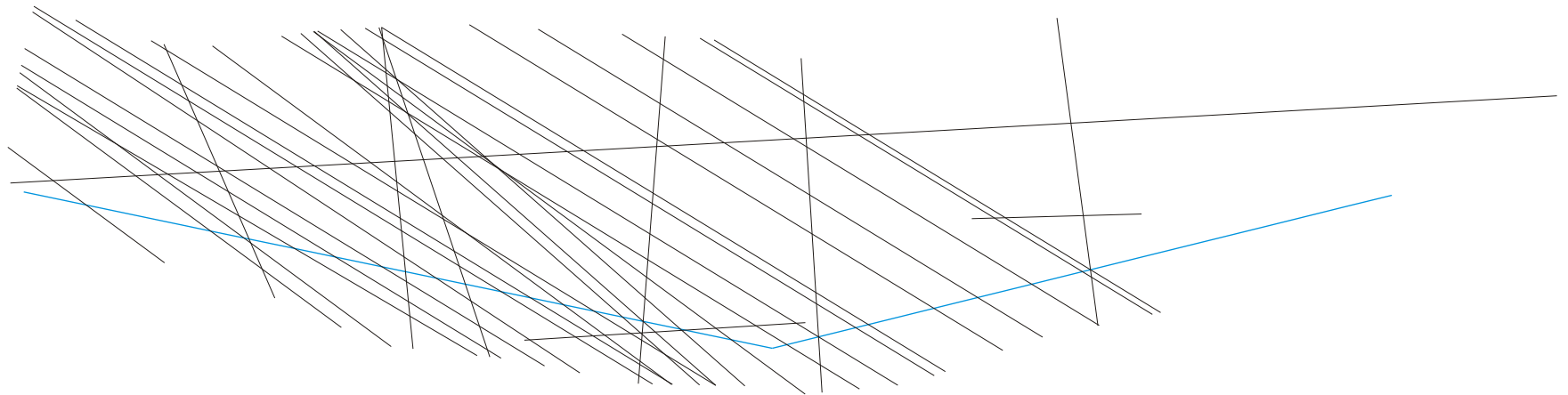
Densidad total de fracturas: No. de fracturas/longitud del scanline: $184/177=1.04$

Densidad de fracturas T1:0.71

Densidad de fracturas T2:0.28

Densidad de fracturas T3:0.051

Scanline túnel 11



Tendencias: 3

Total de fracturas: 33

Tendencia 1(T1)(N20E) : 24

Tendencia 2(T2)(N70E) : 7

Tendencia 3(T3) (N20W): 2

Longitud Scanline Tunel 11: 33m

Densidad total de fracturas: No. de fracturas/longitud del scanline: $33/33=1$

Densidad de fracturas T1:0.72

Densidad de fracturas T2:0.21

Densidad de fracturas T3:0.061

ANEXO B

CATÁLOGO DE IMÁGENES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LA DIMENSIÓN FRACTAL.

En las imágenes contenidas en este anexo se pueden apreciar con mayor detalle los rasgos característicos de los patrones de fracturamiento encontrados en el sector de La Mesa de Los Santos correspondiente a imágenes de fracturas tomadas del techo de los túneles, pertenecientes a la Formación Rosablanca.



N-W

S-E



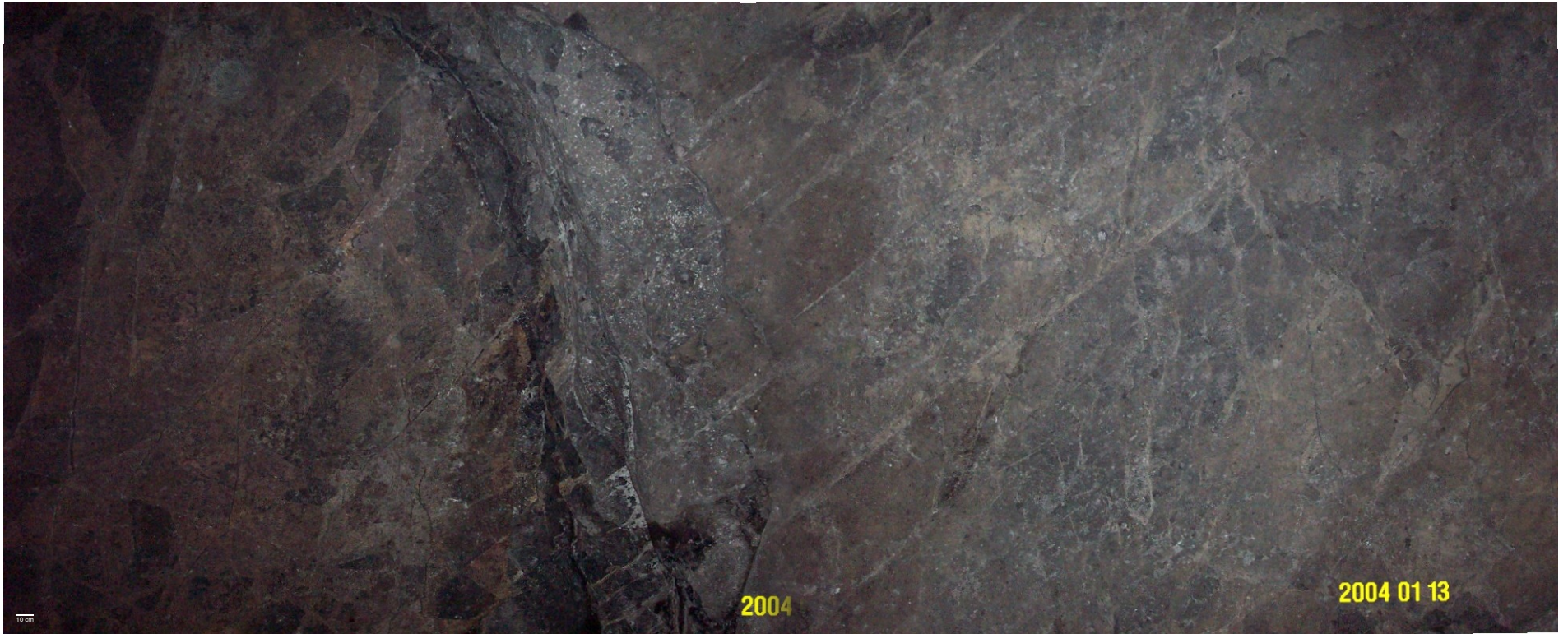
YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
Observándose triangulaciones en la superficie de la roca.



YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos

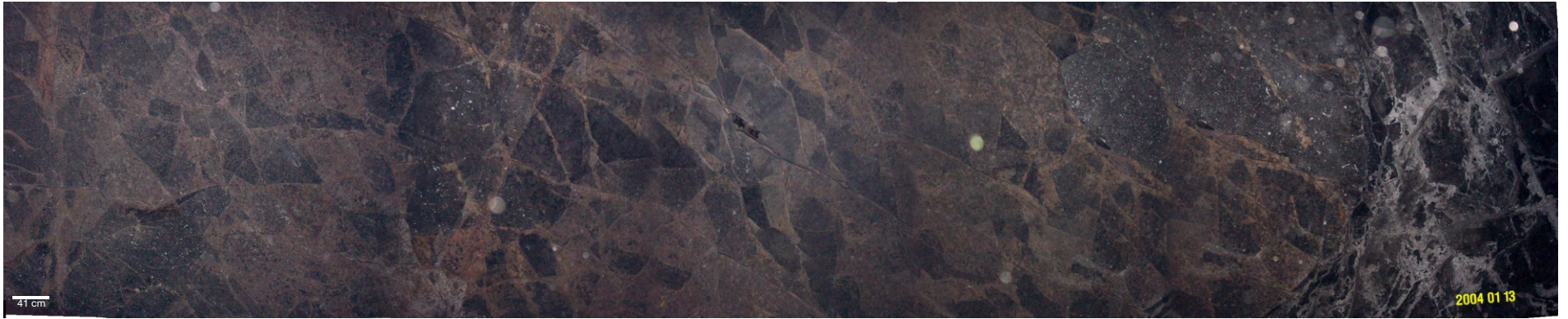


YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

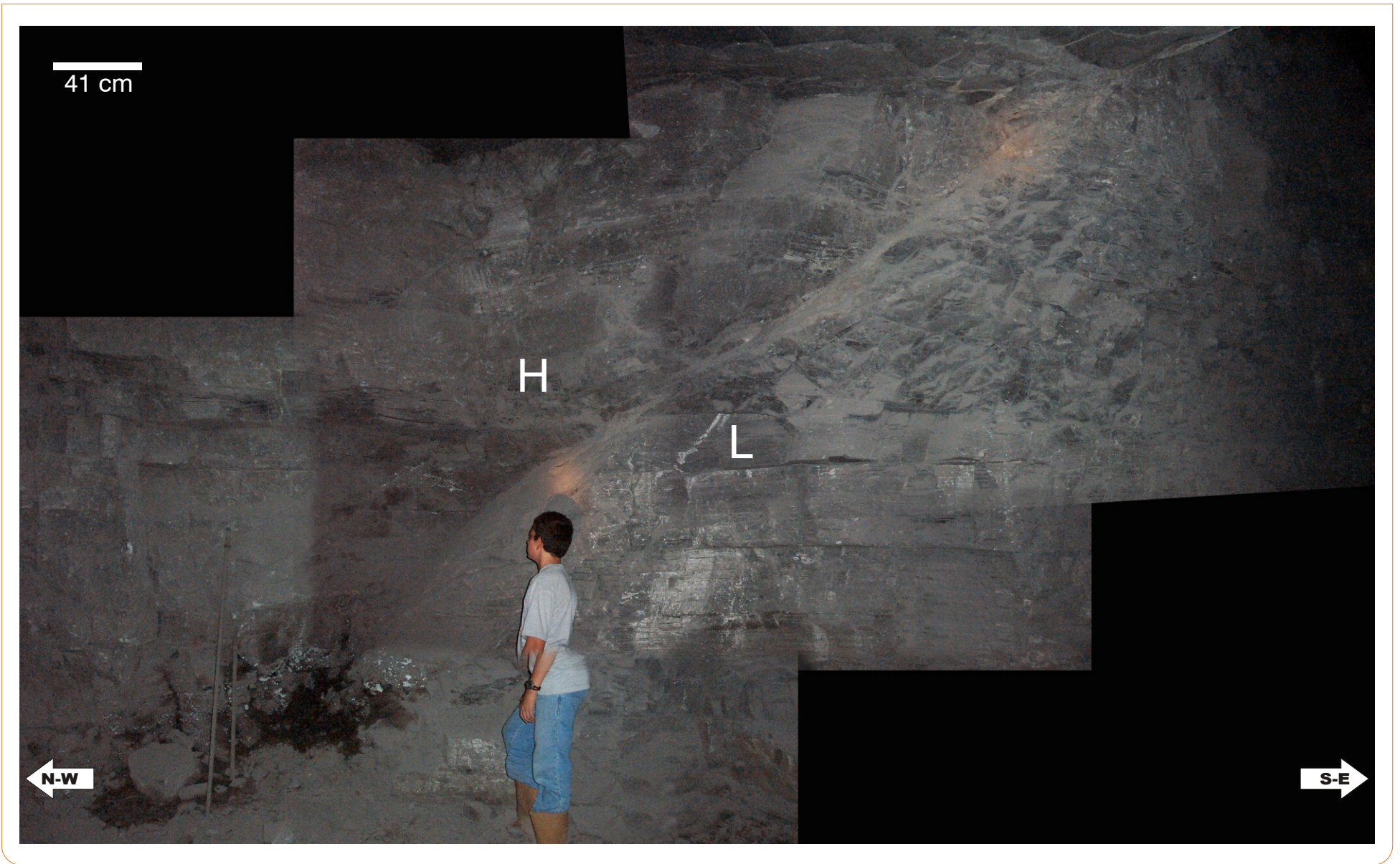
Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos



Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos

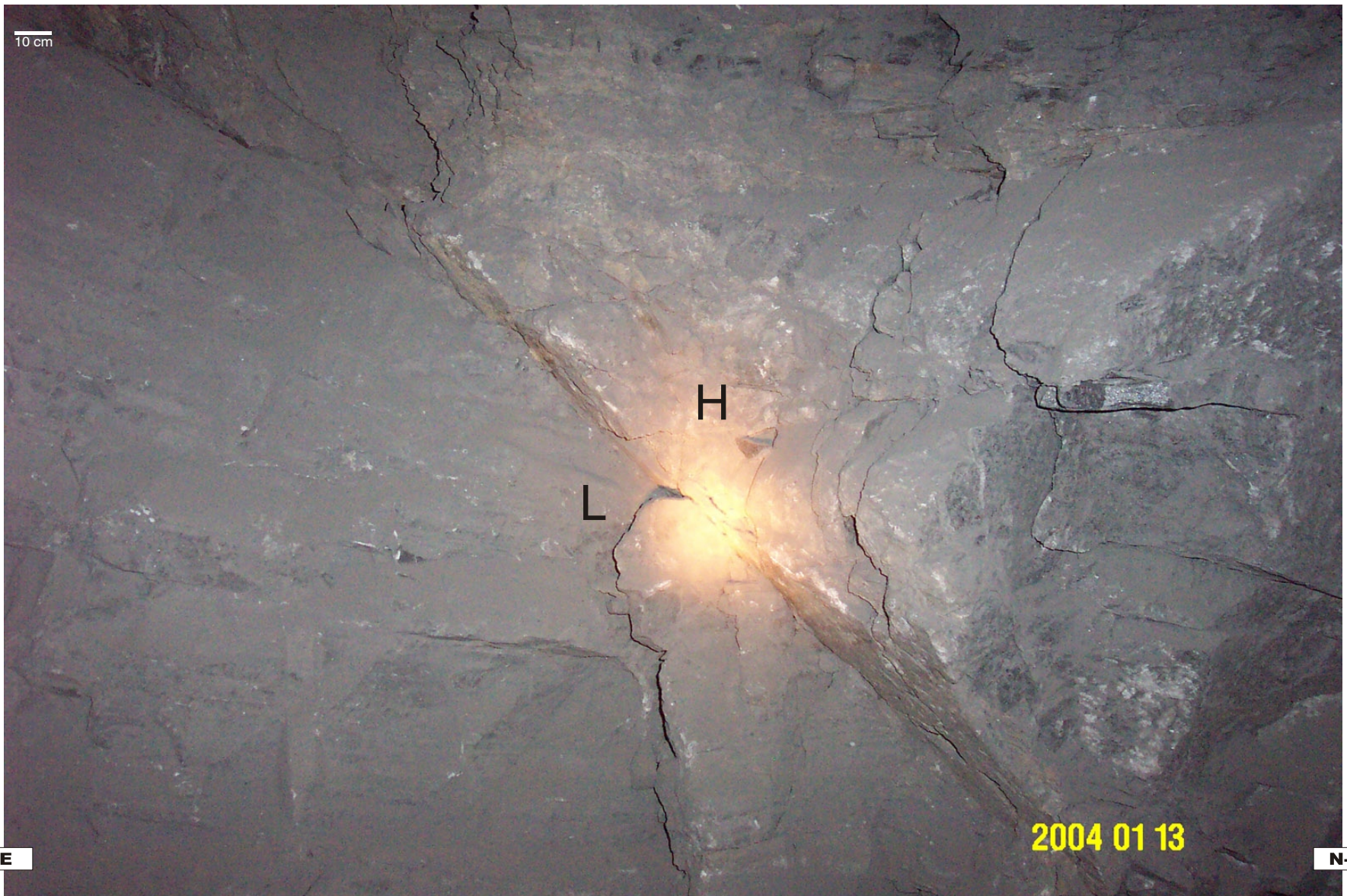


Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
Observándose triangulaciones en la superficie de la roca.

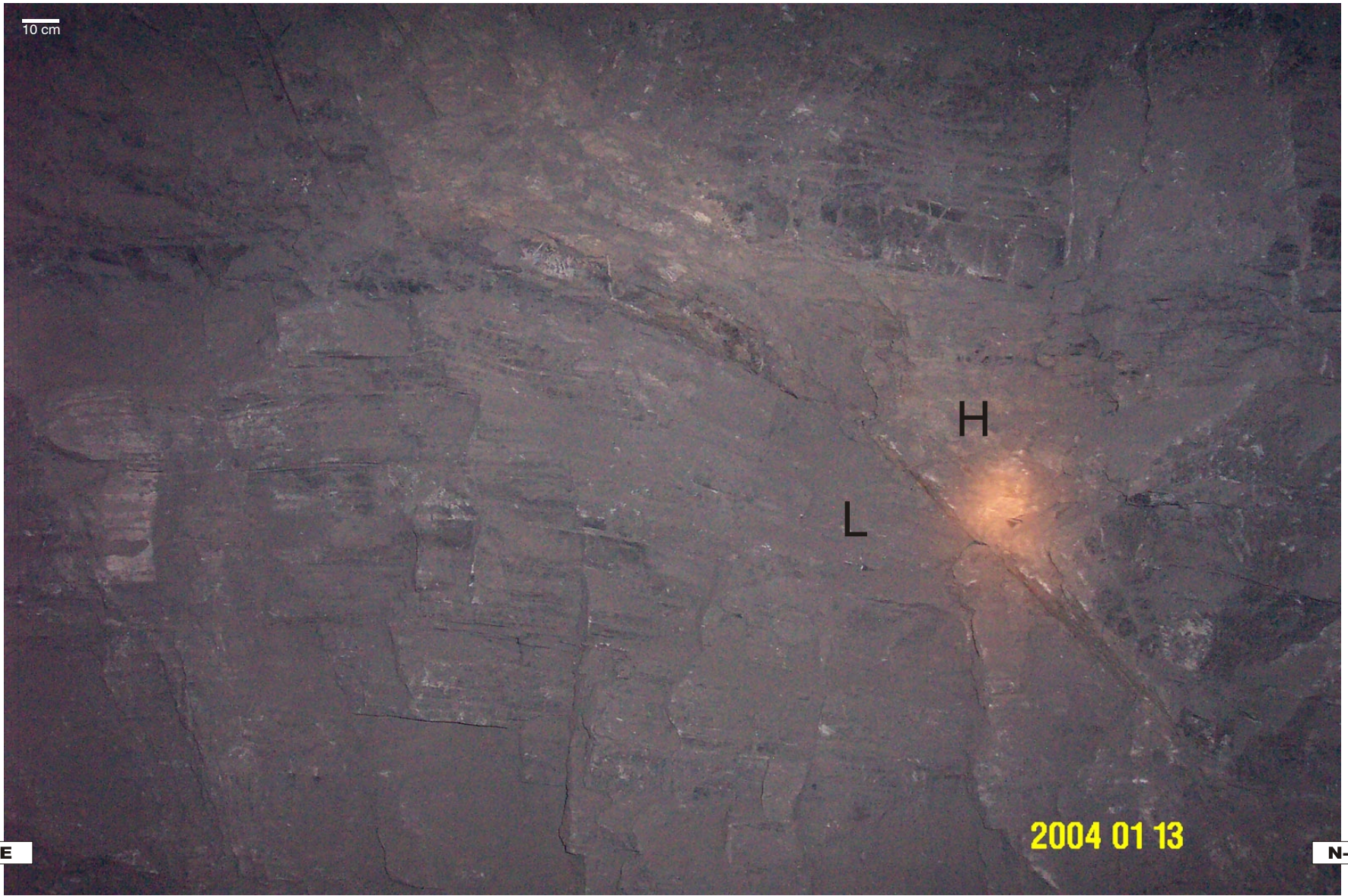


YACIMIENTOS NATURALES
Fracturados. YNF

Panorámica de la falla normal observada en el costado izquierdo del túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
En la parte inferior se observa material altamente triturado



Detalle de la falla normal observada en el costado derecho del túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos



YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

Panorámica de la falla normal observada en el costado derecho del túnel 6, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
Observandose algunas capas de la roca deformadas



YACIMIENTOS NATURALES
Fracturados. YNF

Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 10, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
Observación de la red de fracturas afectada por procesos de infiltración de agua superficial.



YACIMIENTOS NATURALES
Fracturados. YNF

Panorámica de la red de fracturas tomada en el túnel 10, Mina el Carrancho. Mesa de los Santos
Observación de la red de fracturas afectada por procesos de infiltración de agua superficial.



YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

Panorámica entrada mina El Carrancho, Mesa de los Santos



YACIMIENTOS NATURALMENTE
Fracturados. YNF

Panorámica alrededores mina El Carrancho, Mesa de los Santos observándose la riera del Rio Sogamoso.

ANEXO C

RESULTADOS BOX-COUNTING

El siguiente anexo muestra los resultados obtenidos por el método de Box-Counting, debe notarse que cada tabla tiene un encabezado que corresponde a los parámetros escogidos para realizar el cálculo de la dimensión para cada imagen.

Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:64x64 X=100/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,585	0
3	1,482	0,1033
4	1,3692	0,1125
5	1,322	0,0472
6	1,313	0,0090
Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:64x64 X=550/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,5178	0,1603
4	1,4280	0,0898
5	1,3906	0,0374
6	1,406	-0,0154

Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:64x64 X=500/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,2630	0
3	1,2165	0,0465
4	1,2271	-0,0106
5	1,2437	-0,0166
6	1,2793	-0,0356

Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:256x256 X=50/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7555	0,0100
4	1,6826	0,0729

5	1,5862	0,0964
6	1,5029	0,0833
7	1,4497	0,0532
8	1,4243	0,0254
Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:256x256 X=450/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8161	-0,0506
4	1,7279	0,0882
5	1,6177	0,1102
6	1,5431	0,0746
7	1,5033	0,0398
Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:64x64 X=100/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,5688	0,1093
4	1,4111	0,1577
5	1,311	0,1001
6	1,239	0,0720
Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:64x64 X=100/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,585	0,0931
4	1,4586	0,1264

8	1,4923	0,0110
Nombre Imagen: Red 36-37		
Tamaño:256x256 X=300/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7555	0,0100
4	1,6349	0,1206
5	1,5545	0,0804
6	1,4844	0,0701
7	1,4469	0,0375
8	1,4358	0,0111

5	1,3512	0,1074
6	1,2713	0,0799
Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:64x64 X=250/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,5688	0,1093
4	1,4468	0,1220
5	1,347	0,0998
6	1,277	0,0700
Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:64x64 X=250/Y=150		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia

2	1,585	0
3	1,5522	0,0328
4	1,4217	0,1305
5	1,3263	0,0954
6	1,2482	0,0781

Nombre Imagen: Red 39-40

Tamaño:64x64 X=500/Y=50

Método Aplicado: Box-Counting

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,585	0
3	1,5522	0,0328
4	1,4398	0,1124
5	1,3465	0,0933
6	1,2757	0,0708

Nombre Imagen: Red 39-40

Tamaño:64x64 X=550/Y=300

Método Aplicado: Box-Counting

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,4817	0,2838
4	1,2919	0,1898
5	1,1993	0,0926
6	1,1396	0,0597

Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:256x256 X=100/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8502	-0,0847
4	1,8352	0,0150

5	1,7413	0,0939
6	1,6284	0,1129
7	1,5279	0,1005
8	1,4433	0,0846

Nombre Imagen: Red 39-40

Tamaño:256x256 X=400/Y=100

Método Aplicado: Box-Counting

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8502	-0,0847
4	1,8562	-0,0060
5	1,7745	0,0817
6	1,6629	0,1116
7	1,5631	0,0998
8	1,4815	0,0816

Nombre Imagen: Red 39-40

Tamaño:256x256 X=200/Y=100

Método Aplicado: Box-Counting

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8502	-0,0847
4	1,8254	0,0248
5	1,7473	0,0781
6	1,6422	0,1051
7	1,5458	0,0964
8	1,4627	0,0831

Nombre Imagen: Red 39-40

Tamaño:256x256 X=300/Y=50

Método Aplicado: Box-Counting

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0

3	1,8502	-0,0847
4	1,8562	-0,0060
5	1,7804	0,0758
6	1,6738	0,1066
7	1,5737	0,1001
8	1,4874	0,0863
Nombre Imagen: Red 39-40		
Tamaño:256x256 X=500/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8502	-0,0847
4	1,8524	-0,0022
5	1,752	0,1004
6	1,6423	0,1097
7	1,5463	0,0960
8	1,4685	0,0778

Nombre Imagen: Red 43-44		
Tamaño:64x64 X=100/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,5688	0,1093
4	1,5068	0,0620
5	1,3992	0,1076
6	1,287	0,1122
Nombre Imagen: Red 43-44		
Tamaño:64x64 X=350/Y=150		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7804	-0,0149
4	1,6849	0,0955
5	1,5478	0,1371
6	1,4309	0,1169
Nombre Imagen: Red 43-44		
Tamaño:64x64 X=200/Y=180		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,678	0
3	1,661	0,0171
4	1,5678	0,0932
5	1,4615	0,1063
6	1,3759	0,0856
Nombre Imagen: Red 43-44		

Tamaño:64x64 X=250/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,661	0,0171
4	1,5712	0,0898
5	1,431	0,1402
6	1,3119	0,1191
Nombre Imagen: Red 43-44		
Tamaño:64x64 X=50/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,7427	-0,0646
4	1,6198	0,1229
5	1,4894	0,1304
6	1,364	0,1254
Nombre Imagen: Red 43-44		
Tamaño:64x64 X=450/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,6893	-0,0112
4	1,6334	0,0559
5	1,545	0,0884
6	1,4616	0,0834

Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=1/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7165	0,0490
4	1,5386	0,1779
5	1,3592	0,1794
6	1,2057	0,1535
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=100/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,768	-0,0025
4	1,6374	0,1306
5	1,4758	0,1616
6	1,3244	0,1514
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=200/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8161	-0,0506
4	1,7255	0,0906
5	1,5798	0,1457
6	1,4195	0,1603
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=300/Y=40		
Método Aplicado: Box-Counting		

N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7555	0,0100
4	1,6879	0,0676
5	1,5462	0,1417
6	1,3897	0,1565
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=400/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7925	-0,0270
4	1,6953	0,0972
5	1,5252	0,1701
6	1,3518	0,1734
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=500/Y=20		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,8044	-0,0389
4	1,7495	0,0549
5	1,5855	0,1640
6	1,417	0,1685
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=200/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,768	-0,0025

4	1,6633	0,1047
5	1,4964	0,1669
6	1,3409	0,1555
Nombre Imagen: Red 45-49		
Tamaño:64x64 X=400/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia

2	1,7655	0
3	1,7804	-0,0149
4	1,663	0,1174
5	1,5097	0,1533
6	1,3506	0,1591

Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=1/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,7165	-0,0384
4	1,602	0,1145
5	1,4629	0,1391
6	1,3178	0,1451
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=100/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7804	-0,0149
4	1,6849	0,0955
5	1,5427	0,1422
6	1,3831	0,1596
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=200/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0

3	1,8277	-0,0622
4	1,7679	0,0598
5	1,6377	0,1302
6	1,4814	0,1563
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=300/Y=40		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7165	0,0490
4	1,6151	0,1014
5	1,4857	0,1294
6	1,3448	0,1409
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=400/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,6163	0,1492
4	1,5075	0,1088
5	1,3792	0,1283
6	1,242	0,1372

Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=500/Y=20		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,6315	0,0466
4	1,5156	0,1159
5	1,393	0,1226
6	1,2609	0,1321
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=200/Y=1		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,816	-0,0506

4	1,7472	0,0689
5	1,6109	0,1363
6	1,4677	0,1432
Nombre Imagen: Red 54-57		
Tamaño:64x64 X=400/Y=50		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7804	-0,0149
4	1,6458	0,1346
5	1,4838	0,1620
6	1,3229	0,1609

Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:64x64 X=100/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,263	0
3	1,2427	0,0203
4	1,2455	-0,0028
5	1,2314	0,0141
6	1,2356	-0,0042
Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:64x64 X=350/Y=200		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,585	0

3	1,4438	0,1412
4	1,3514	0,0924
5	1,3242	0,0272
6	1,3394	-0,0152
Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:64x64 X=550/Y=150		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,4854	0
3	1,5522	-0,0668
4	1,5114	0,0408
5	1,5093	0,0021
6	1,5269	-0,0176

Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:64x64 X=650/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,4854	0
3	1,268	0,2174

4	1,1806	0,0874
5	1,1387	0,0419
6	1,1102	0,0285

Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:256x256 X=200/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7297	0,0358
4	1,6386	0,0911
5	1,522	0,1166
6	1,4287	0,0933
7	1,3651	0,0636
8	1,3281	0,0370
Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:256x256 X=450/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7925	-0,0270
4	1,7256	0,0669
5	1,6233	0,1023
6	1,5443	0,0790
7	1,4962	0,0481
8	1,474	0,0222
Nombre Imagen: Red 79		

Tamaño:256x256 X=100/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,703	-0,0249
4	1,5728	0,1302
5	1,452	0,1208
6	1,3639	0,0881
7	1,2949	0,0690
8	1,2457	0,0492
Nombre Imagen: Red 79		
Tamaño:256x256 X=450/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,6315	0,1340
4	1,5464	0,0851
5	1,4535	0,0929
6	1,3776	0,0759
7	1,3246	0,0530
8	1,2928	0,0318

Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:64x64 X=100/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	0,80735	0
3	1,00000	-0,1927
4	1,09360	-0,0936
5	1,161	-0,0674
6	1	-0,0696
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:64x64 X=350/Y=200		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,4854	0
3	1,5178	-0,0324
4	1,51960	-0,0018
5	1,53950	-0,0199
6	1,5777	-0,0382
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:64x64 X=550/Y=150		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	0,5850	0
3	0,500	0,0850
4	0,43808	0,0619
5	0,39069	0,0474

6	0,35311	0,0376
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:64x64 X=650/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,1699	0
3	1,161	0,0089
4	1,054	0,1070
5	1,0603	-0,0063
6	1,1036	-0,0433
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:256x256 X=200/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,7030	-0,0249
4	1,63900	0,0640
5	1,56440	0,0746
6	1,5078	0,0566
7	1,4804	0,0274
8	1,4837	-0,0033
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:256x256 X=450/Y=100		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,7655	0
3	1,7297	0,0358

4	1,6694	0,0603
5	1,5614	0,1080
6	1,4645	0,0969
7	1,409	0,0555
8	1,3908	0,0182
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:256x256 X=100/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	1,6781	0
3	1,6008	0,0773
4	1,4659	0,1349
5	1,3906	0,0753
6	1,3497	0,0409
7	1,3359	0,0138

8	1,35	-0,0141
Nombre Imagen: Red 80		
Tamaño:256x256 X=450/Y=250		
Método Aplicado: Box-Counting		
N° Iteración	Dimensión	Diferencia
2	0,80735	0
3	0,85022	-0,0429
4	0,84638	0,0038
5	0,81351	0,0329
6	0,78408	0,0294
7	0,7531	0,0310
8	0,71731	0,0358

ANEXO D

RESULTADOS ANÁLISIS DE VARIOGRAMA

El siguiente anexo muestra los resultados obtenidos por el método de Análisis de Variograma, cabe destacar que para este análisis se tuvieron en cuenta solo dos imágenes de las redes de fracturas, a las cuales se les aplicó diferentes direcciones de barrido para calcular la dimensión fractal. Debido precisamente a los resultados poco aceptables, para estas redes de fracturas, no se realizaron las pruebas para las demás imágenes; debe notarse que cada tabla tiene un encabezado el cual corresponde a los datos de la imagen para su correspondiente estudio.

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,3465	0
1	4	1,4048	-0,0583
1	5	1,4524	-0,0476
1	6	1,4924	-0,04
1	7	1,5265	-0,0341
1	8	1,5558	-0,0293
1	9	1,5811	-0,0253
1	10	1,6033	-0,0222
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

Inicial	Final		
2	4	1,5522	0
2	5	1,5944	-0,0422
2	6	1,6298	-0,0354
2	7	1,6594	-0,0296
2	8	1,684	-0,0246
2	9	1,705	-0,021
2	10	1,7231	-0,0181
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

3	9	1,772	-0,0179
3	10	1,7873	-0,0153
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,7592	0
4	7	1,7829	-0,0237
4	8	1,8013	-0,0184
4	9	1,8164	-0,0151
4	10	1,8293	-0,0129
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,7989	0
5	7	1,8192	-0,0203
5	8	1,8343	-0,0151
5	9	1,8470	-0,0127
5	10	1,8579	-0,0109
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8567	0
6	9	1,8676	-0,0109
6	10	1,8775	-0,0099
6	11	1,8858	-0,0083

6	12	1,8933	-0,0075
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8821	0
7	10	1,8916	-0,0095
7	11	1,9187	-0,0271
7	12	1,9064	0,0123
7	13	1,9134	-0,007
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9039	0
8	11	1,9108	-0,0069
8	12	1,9173	-0,0065
8	13	1,9242	-0,0069
8	14	1,9318	-0,0076
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9145	0
9	11	1,9201	-0,0056
9	12	1,9262	-0,0061
9	13	1,9334	-0,0072
9	14	1,9415	-0,0081

9	15	1,9493	-0,0078
9	16	1,9556	-0,0063

--	--	--	--

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,3493	0
1	4	1,4072	-0,0579
1	5	1,4539	-0,0467
1	6	1,4934	-0,0395
1	7	1,5274	-0,034
1	8	1,5569	-0,0295
1	9	1,5825	-0,0256
1	10	1,6052	-0,0227
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,555	0
2	5	1,5952	-0,0402
2	6	1,6298	-0,0346
2	7	1,6594	-0,0296
2	8	1,6846	-0,0252
2	9	1,7063	-0,0217
2	10	1,7251	-0,0188
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia

Inicial	Final		
3	5	1,6701	0
3	6	1,703	-0,0329
3	7	1,7307	-0,0277
3	8	1,7536	-0,0229
3	9	1,7728	-0,0192
3	10	1,7893	-0,0165
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,7556	0
4	7	1,7814	-0,0258
4	8	1,8020	-0,0206
4	9	1,8188	-0,0168
4	10	1,8331	-0,0143
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,7978	0
5	7	1,8206	-0,0228
5	8	1,8383	-0,0177
5	9	1,8525	-0,0142
5	10	1,8646	-0,0121
Nombre Imagen : Red36-37			

Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8641	0
6	9	1,8761	-0,012
6	10	1,8866	-0,0105
6	11	1,8957	-0,0091
6	12	1,9032	-0,0075
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8926	0
7	10	1,9023	-0,0097
7	11	1,9106	-0,0083
7	12	1,9172	-0,0066
7	13	1,9226	-0,0054
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			

Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9147	0
8	11	1,9224	-0,0077
8	12	1,9282	-0,0058
8	13	1,9328	-0,0046
8	14	1,9372	-0,0044
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9259	0
9	11	1,9326	-0,0067
9	12	1,9371	-0,0045
9	13	1,9407	-0,0036
9	14	1,9447	-0,004
9	15	1,9492	-0,0045
9	16	1,9542	-0,005

Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
1	3	1,3467	0,0398	0
1	4	1,4053	0,0462	-0,0586
1	5	1,4532	0,0498	-0,0479
1	6	1,4936	0,0517	-0,0404

1	7	1,528	0,0523	-0,0344
1	8	1,5575	0,0522	-0,0295
1	9	1,5832	0,0519	-0,0257
1	10	1,6057	0,0515	-0,0225
Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom.Htal				
Paso		Dimensión	Diferencia	
Inicial	Final			

Inicial	Final		Desviación		Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
2	4	1,5533	0,0668	0	Paso		Dimensión		Diferencia
2	5	1,596	0,0671	-0,0427	Inicial	Final		Desviación	
2	6	1,6317	0,0663	-0,0357	5	6	1,8025	0,0774	0
2	7	1,6616	0,0645	-0,0299	5	7	1,8234	0,0751	-0,0209
2	8	1,6867	0,0626	-0,0251	5	8	1,8392	0,0732	-0,0158
2	9	1,7081	0,0608	-0,0214	5	9	1,8524	0,0720	-0,0132
2	10	1,7266	0,0593	-0,0185	5	10	1,8638	0,0707	-0,0114
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal					Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión		Diferencia	Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final		Desviación		Inicial	Final		Desviación	
3	5	1,6757	0,0734	0	6	8	1,8624	0,0808	0
3	6	1,7087	0,0711	-0,033	6	9	1,874	0,0799	-0,0116
3	7	1,7357	0,0681	-0,027	6	10	1,8841	0,0781	-0,0101
3	8	1,7577	0,0654	-0,022	6	11	1,8925	0,0758	-0,0084
3	9	1,776	0,0633	-0,0183	6	12	1,8995	0,0732	-0,007
3	10	1,7917	0,0617	-0,0157	Nombre Imagen : Red36-37				
Nombre Imagen : Red36-37					Tamaño: Completa				
Tamaño: Completa					Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal					Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final	Dimensión		Diferencia	Inicial	Final		Desviación	
4	6		1,7624		0,0739	0	7	9	1,8893
4	7	1,7865	0,0705	-0,0241	7	10	1,899	0,0856	-0,0097
4	8	1,8054	0,0679	-0,0189	7	11	1,9065	0,0821	-0,0075
4	9	1,8211	0,0662	-0,0157	7	12	1,9127	0,0786	-0,0062
4	10	1,8344	0,0649	-0,0133	7	13	1,9188	0,076	-0,0061
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal					Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				

Paso		Dimensión		Diferencia	Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final		Desviación		Inicial	Final		Desviación	
8	10	1,9117	0,0915	0	9	10	1,9222	0,0953	0
8	11	1,918	0,0868	-0,0063	9	11	1,9268	0,0911	-0,0046
8	12	1,9233	0,0829	-0,0053	9	12	1,9312	0,0883	-0,0044
8	13	1,929	0,0806	-0,0057	9	13	1,9369	0,0873	-0,0057
8	14	1,9354	0,0792	-0,0064	9	14	1,9438	0,0864	-0,0069
					9	15	1,9506	0,0852	-0,0068
Nombre Imagen : Red36-37					9	16	1,9563	0,0839	-0,0057
Tamaño: Completa									
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal									

Nombre Imagen : Red36-37					2	6	1,6363	0,1015	-0,0349
Tamaño: Completa					2	7	1,6661	0,0992	-0,0298
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					2	8	1,6918	0,0965	-0,0257
Paso		Dimensión		Diferencia	2	9	1,7138	0,0941	-0,022
Inicial	Final		Desviación		2	10	1,733	0,0918	-0,0192
1	3	1,3551	0,0899	0	Nombre Imagen : Red36-37				
1	4	1,413	0,0899	-0,0579	Tamaño: Completa				
1	5	1,4600	0,0899	-0,047	Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
1	6	1,4997	0,0895	-0,0397	Paso		Dimensión		Diferencia
1	7	1,5339	0,0885	-0,0342	Inicial	Final		Desviación	
1	8	1,5635	0,0871	-0,0296	3	5	1,6775	0,1126	0
1	9	1,5895	0,0857	-0,026	3	6	1,7106	0,1102	-0,0331
1	10	1,6124	0,0842	-0,0229	3	7	1,7383	0,1062	-0,0277
Nombre Imagen : Red36-37					3	8	1,7616	0,1023	-0,0233
Tamaño: Completa					3	9	1,7814	0,0992	-0,0198
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					3	10	1,7982	0,0965	-0,0168
Paso		Dimensión		Diferencia	Nombre Imagen : Red36-37				
Inicial	Final		Desviación		Tamaño: Completa				
2	4	1,5606	0,103	0	Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
2	5	1,6014	0,1027	-0,0408					

Paso		Dimensión		Diferencia	Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final		Desviación		Inicial	Final		Desviación	
4	6	1,7635	0,1166	0	7	9	1,9052	0,128	0
4	7	1,7893	0,1109	-0,0258	7	10	1,9149	0,1227	-0,0097
4	8	1,8104	0,1063	-0,0211	7	11	1,9231	0,1165	-0,0082
4	9	1,8279	0,1034	-0,0175	7	12	1,9296	0,1106	-0,0065
4	10	1,8427	0,1008	-0,0148	7	13	1,9348	0,1048	-0,0052
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso		Dimensión		Diferencia	Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final		Desviación		Inicial	Final		Desviación	
5	6	1,8056	0,1212	0	8	10	1,9278	0,128	0
5	7	1,8285	0,1143	-0,0229	8	11	1,9351	0,1212	-0,0073
5	8	1,847	0,1109	-0,0185	8	12	1,9406	0,1149	-0,0055
5	9	1,8622	0,1091	-0,0152	8	13	1,9448	0,1083	-0,0042
5	10	1,8749	0,1067	-0,0127	8	14	1,949	0,1019	-0,0042
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso		Dimensión		Diferencia	Paso		Dimensión		Diferencia
Inicial	Final		Desviación		Inicial	Final		Desviación	
6	8	1,8735	0,1184	0	9	10	1,9379	0,1327	0
6	9	1,8869	0,1179	-0,0134	9	11	1,9444	0,1265	-0,0065
6	10	1,8979	0,1148	-0,011	9	12	1,9489	0,1205	-0,0045
6	11	1,9072	0,1103	-0,0093	9	13	1,9523	0,1131	-0,0034
6	12	1,9148	0,1056	-0,0076	9	14	1,956	0,1061	-0,0037
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Nombre Imagen : Red36-37					Nombre Imagen : Red36-37				
Tamaño: Completa					Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical					Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,3887	0
1	4	1,4644	-0,0757
1	5	1,5213	-0,0569
1	6	1,5652	-0,0439
1	7	1,5997	-0,0345
1	8	1,6276	-0,0279
1	9	1,6513	-0,0237
1	10	1,672	-0,0207
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,6536	0
2	5	1,6989	-0,0453
2	6	1,7308	-0,0319
2	7	1,754	-0,0232
2	8	1,772	-0,018
2	9	1,7872	-0,0152
2	10	1,8009	-0,0137
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,7925	0
3	6	1,8122	-0,0197

3	7	1,8261	-0,0139
3	8	1,8367	-0,0106
3	9	1,8467	-0,01
3	10	1,8567	-0,01
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,8466	0
4	7	1,8559	-0,0093
4	8	1,8634	-0,0075
4	9	1,8717	-0,0083
4	10	1,881	-0,0093
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,8657	0
5	7	1,8714	-0,0057
5	8	1,8772	-0,0058
5	9	1,8856	-0,0084
5	10	1,8959	-0,0103
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8849	0
6	9	1,8955	-0,0106

6	10	1,9080	-0,0125
6	11	1,9205	-0,0125
6	12	1,9321	-0,0116
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,9071	0
7	10	1,9223	-0,0152
7	11	1,9365	-0,0142
7	12	1,9488	-0,0123
7	13	1,9595	-0,0107
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

8	10	1,9409	0
8	11	1,9553	-0,0144
8	12	1,9672	-0,0119
8	13	1,9772	-0,01
8	14	1,9875	-0,0103
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9602	0
9	11	1,9736	-0,0134
9	12	1,9842	-0,0106
9	13	1,9931	-0,0089
9	14	2,0031	-0,01
9	15	2,014	-0,0109
9	16	2,0215	-0,0075

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,351	0
1	4	1,4167	-0,0655
1	5	1,4691	-0,0524
1	6	1,512	-0,0432
1	7	1,5485	-0,0362
1	8	1,5792	-0,0307
1	9	1,606	-0,0265
1	10	1,6288	-0,0231

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,5813	0
2	5	1,6267	-0,0454
2	6	1,6635	-0,0368
2	7	1,6935	-0,03
2	8	1,7184	-0,0249
2	9	1,7395	-0,0211
2	10	1,7575	-0,018

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,7143	0
3	6	1,7460	-0,0317
3	7	1,7713	-0,0253
3	8	1,7919	-0,0206
3	9	1,8093	-0,0174
3	10	1,8239	-0,0146
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,7974	0
4	7	1,8196	-0,0222
4	8	1,8372	-0,0176
4	9	1,8519	-0,0147
4	10	1,8642	-0,0123
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,8361	0
5	7	1,8542	-0,0181
5	8	1,8687	-0,0145
5	9	1,8813	-0,0126
5	10	1,8915	-0,0102

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8896	0
6	9	1,901	-0,0114
6	10	1,910	-0,0091
6	11	1,9172	-0,0071
6	12	1,9235	-0,0063
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,9162	0
7	10	1,9241	-0,0079
7	11	1,9301	-0,006
7	12	1,9355	-0,0054
7	13	1,9404	-0,0049
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9353	0
8	11	1,9398	-0,0045
8	12	1,9445	-0,0047
8	13	1,9489	-0,0044
8	14	1,9532	-0,0043

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=50-Y=120			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9421	0
9	11	1,9457	-0,0036

9	12	1,9506	-0,0049
9	13	1,9550	-0,0044
9	14	1,9593	-0,0043
9	15	1,9643	-0,005
9	16	1,969	-0,0047

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,3119	0
1	4	1,3546	-0,0427
1	5	1,3937	-0,0391
1	6	1,4306	-0,0369
1	7	1,465	-0,0344
1	8	1,4965	-0,0315
1	9	1,5249	-0,0284
1	10	1,5505	-0,0256

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,5709	0
3	6	1,6158	-0,0449
3	7	1,6558	-0,04
3	8	1,6894	-0,0336
3	9	1,7176	-0,0282
3	10	1,7416	-0,024

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,4626	0
2	5	1,5027	-0,0401
2	6	1,5421	-0,0394
2	7	1,5788	-0,0367
2	8	1,6114	-0,0326
2	9	1,64	-0,0286
2	10	1,6651	-0,0251

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,6857	0
4	7	1,7257	-0,04
4	8	1,7574	-0,0317
4	9	1,7830	-0,0256
4	10	1,804	-0,021
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			

Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,7472	0
5	7	1,785	-0,0378
5	8	1,8126	-0,0276
5	9	1,8342	-0,0216
5	10	1,8517	-0,0175
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*2000/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8537	0
6	9	1,8712	-0,0175
6	10	1,8854	-0,0142
6	11	1,897	-0,0115
6	12	1,9060	-0,0091
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8951	0
7	10	1,9076	-0,0125
7	11	1,9172	-0,0096

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

7	12	1,9246	-0,0074
7	13	1,9308	-0,0062
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9243	0
8	11	1,9322	-0,0079
8	12	1,9379	-0,0057
8	13	1,9431	-0,0052
8	14	1,9482	-0,0051
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9369	0
9	11	1,9429	-0,006
9	12	1,9472	-0,0043
9	13	1,9515	-0,0043
9	14	1,9564	-0,0049
9	15	1,9623	-0,0059
9	16	1,9694	-0,0071

1	3	1,3257	0
1	4	1,37	-0,0443
1	5	1,4046	-0,0346
1	6	1,436	-0,0314
1	7	1,4659	-0,0299

1	8	1,4939	-0,028
1	9	1,5198	-0,0259
1	10	1,5435	-0,0237
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,4869	0
2	5	1,5137	-0,0268
2	6	1,5421	-0,0284
2	7	1,5716	-0,0295
2	8	1,5997	-0,0281
2	9	1,6255	-0,0258
2	10	1,6489	-0,0234
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,5631	0
3	6	1,5954	-0,0323
3	7	1,6294	-0,034
3	8	1,6606	-0,0312
3	9	1,6881	-0,0275
3	10	1,7123	-0,0242
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

4	6	1,6410	0
4	7	1,6812	-0,0402
4	8	1,7151	-0,0339
4	9	1,7432	-0,0281
4	10	1,767	-0,0238
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,6954	0
5	7	1,7381	-0,0427
5	8	1,7705	-0,0324
5	9	1,7961	-0,0256
5	10	1,8173	-0,0212
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8181	0
6	9	1,8392	-0,0211
6	10	1,857	-0,0178
6	11	1,8718	-0,0148
6	12	1,8838	-0,012
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8685	0

7	10	1,8844	-0,0159
7	11	1,8973	-0,0129
7	12	1,9074	-0,0101
7	13	1,9155	-0,0081
Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9049	0
8	11	1,9164	-0,0115
8	12	1,9248	-0,0084
8	13	1,9314	-0,0066
8	14	1,9371	-0,0057

Nombre Imagen : Red36-37			
Tamaño: 200*200/X=450-Y=100			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9222	0
9	11	1,9317	-0,0095
9	12	1,938	-0,0063
9	13	1,9432	-0,0052
9	14	1,9479	-0,0047
9	15	1,9534	-0,0055
9	16	1,9601	-0,0067

Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,4448	0
1	4	1,5091	-0,0643
1	5	1,5535	-0,0444
1	6	1,5863	-0,0328
1	7	1,6121	-0,0258
1	8	1,6335	-0,0214
1	9	1,6522	-0,0187
1	10	1,6687	-0,0165
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,7613	0
3	6	1,7708	-0,0095
3	7	1,7797	-0,0089
3	8	1,789	-0,0093

Inicial	Final		
2	4	1,6801	0
2	5	1,7057	-0,0256
2	6	1,7234	-0,0177
2	7	1,7374	-0,014
2	8	1,7498	-0,0124
2	9	1,7614	-0,0116
2	10	1,7723	-0,0109
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
3	5	1,7613	0
3	6	1,7708	-0,0095
3	7	1,7797	-0,0089
3	8	1,789	-0,0093

3	9	1,7989	-0,0099
3	10	1,8086	-0,0097
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,786	0
4	7	1,7951	-0,0091
4	8	1,8053	-0,0102
4	9	1,8162	-0,0109
4	10	1,8268	-0,0106
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,7976	0
5	7	1,8076	-0,01
5	8	1,8194	-0,0118
5	9	1,8319	-0,0125
5	10	1,8436	-0,0117
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8342	0
6	9	1,8484	-0,0142
6	10	1,8608	-0,0124
6	11	1,8709	-0,0101

6	12	1,8792	-0,0083
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8664	0
7	10	1,8785	-0,0121
7	11	1,8878	-0,0093
7	12	1,8949	-0,0071
7	13	1,9005	-0,0056
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,8947	0
8	11	1,9022	-0,0075
8	12	1,9079	-0,0057
8	13	1,9122	-0,0043
8	14	1,9158	-0,0036
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9068	0
9	11	1,9125	-0,0057
9	12	1,9169	-0,0044
9	13	1,92	-0,0031
9	14	1,9229	-0,0029

9	15	1,9266	-0,0037
9	16	1,931	-0,0044

--	--	--	--

Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,4208	0
1	4	1,4853	-0,0645
1	5	1,5335	-0,0482
1	6	1,5703	-0,0368
1	7	1,5996	-0,0293
1	8	1,6238	-0,0242
1	9	1,6443	-0,0205
1	10	1,6621	-0,0178
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,6509	0
2	5	1,6867	-0,0358
2	6	1,7121	-0,0254
2	7	1,7316	-0,0195
2	8	1,7475	-0,0159
2	9	1,761	-0,0135
2	10	1,7729	-0,0119
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

Inicial	Final		
3	5	1,7597	0
3	6	1,7761	-0,0164
3	7	1,7891	-0,013
3	8	1,8002	-0,0111
3	9	1,8101	-0,0099
3	10	1,8192	-0,0091
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,805	0
4	7	1,8152	-0,0102
4	8	1,8247	-0,0095
4	9	1,8334	-0,0087
4	10	1,8418	-0,0084
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,8199	0
5	7	1,8301	-0,0102
5	8	1,8396	-0,0095
5	9	1,8484	-0,0088
5	10	1,8569	-0,0085
Nombre Imagen : Red79			

Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,8525	0
6	9	1,8613	-0,0088
6	10	1,8701	-0,0088
6	11	1,8786	-0,0085
6	12	1,887	-0,0084
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,8729	0
7	10	1,882	-0,0091
7	11	1,8909	-0,0089
7	12	1,8995	-0,0086
7	13	1,9081	-0,0086
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			

Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,8931	0
8	11	1,9024	-0,0093
8	12	1,9113	-0,0089
8	13	1,9202	-0,0089
8	14	1,9289	-0,0087
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: Completa			
Método Aplicado: Variograma Vertical			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9045	0
9	11	1,914	-0,0095
9	12	1,9229	-0,0089
9	13	1,9321	-0,0092
9	14	1,9409	-0,0088
9	15	1,9487	-0,0078
9	16	1,9546	-0,0059

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
1	3	1,5158	0,1864	0
1	4	1,575	0,1651	-0,0592
1	5	1,6168	0,1511	-0,0418
1	6	1,6479	0,1416	-0,0311
1	7	1,6723	0,1345	-0,0244

1	8	1,6924	0,1287	-0,0201
1	9	1,7097	0,1238	-0,0173
1	10	1,7248	0,1194	-0,0151
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
2	4	1,7305	0,1182	0
2	5	1,7568	0,1147	-0,0263
2	6	1,775	0,1131	-0,0182
2	7	1,789	0,1115	-0,014
2	8	1,8007	0,1094	-0,0117
2	9	1,8114	0,1068	-0,0107
2	10	1,8211	0,1038	-0,0097
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
3	5	1,8126	0,1179	0
3	6	1,8229	0,118	-0,0103
3	7	1,8315	0,1162	-0,0086
3	8	1,8398	0,1131	-0,0083
3	9	1,8482	0,1093	-0,0084
3	10	1,8561	0,105	-0,0079
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			

4	6	1,8404	0,1237	0
4	7	1,8479	0,1196	-0,0075
4	8	1,856	0,1146	-0,0081
4	9	1,8646	0,1092	-0,0086
4	10	1,8729	0,1035	-0,0083
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
5	6	1,8513	0,1232	0
5	7	1,8588	0,1178	-0,0075
5	8	1,8678	0,1119	-0,009
5	9	1,8774	0,1056	-0,0096
5	10	1,8863	0,0993	-0,0089
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
6	8	1,879	0,1087	0
6	9	1,89	0,1021	-0,011
6	10	1,8994	0,0955	-0,0094
6	11	1,9069	0,0894	-0,0075
6	12	1,9129	0,0843	-0,006
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
7	9	1,904	0,0997	0

7	10	1,913	0,0931	-0,009
7	11	1,9196	0,0870	-0,0066
7	12	1,9247	0,0819	-0,0051
7	13	1,9287	0,0784	-0,004

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
8	10	1,9254	0,093	0
8	11	1,9304	0,0867	-0,005
8	12	1,9342	0,0819	-0,0038
8	13	1,9372	0,079	-0,003
8	14	1,9399	0,0776	-0,0027

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variog. Prom. Htal				
Paso		Dimensión	Desviación	Diferencia
Inicial	Final			
9	10	1,934	0,094	0
9	11	1,9374	0,0880	-0,0034
9	12	1,9402	0,0842	-0,0028
9	13	1,9425	0,0823	-0,0023
9	14	1,9448	0,0818	-0,0023
9	15	1,9478	0,0820	-0,003
9	16	1,9512	0,0822	-0,0034

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia

Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
1	3	1,4497	0,1322	0
1	4	1,5167	0,1295	-0,067
1	5	1,5663	0,1264	-0,0496
1	6	1,6041	0,1232	-0,0378
1	7	1,6339	0,1199	-0,0298
1	8	1,6581	0,1168	-0,0242
1	9	1,6785	0,1138	-0,0204
1	10	1,696	0,111	-0,0175
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
2	4	1,6874	0,1409	0
2	5	1,7245	0,1349	-0,0371
2	6	1,7502	0,129	-0,0257
2	7	1,7695	0,1235	-0,0193
2	8	1,7848	0,1187	-0,0153
2	9	1,7975	0,1145	-0,0127
2	10	1,8086	0,1108	-0,0111
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
3	5	1,801	0,1332	0
3	6	1,8165	0,1257	-0,0155
3	7	1,8283	0,1195	-0,0118
3	8	1,8381	0,1145	-0,0098
3	9	1,8466	0,1103	-0,0085
3	10	1,8545	0,1067	-0,0079

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
4	6	1,8442	0,1221	0
4	7	1,8529	0,1169	-0,0087
4	8	1,8607	0,1125	-0,0078
4	9	1,8678	0,1089	-0,0071
4	10	1,8748	0,1058	-0,007
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
5	6	1,8581	0,1255	0
5	7	1,866	0,1195	-0,0079
5	8	1,8734	0,1151	-0,0074
5	9	1,8804	0,1119	-0,007
5	10	1,8874	0,1091	-0,007
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
6	8	1,8835	0,1200	0
6	9	1,8906	0,1179	-0,0071
6	10	1,8979	0,1152	-0,0073
6	11	1,9053	0,1119	-0,0074
6	12	1,9126	0,1081	-0,0073

Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
7	9	1,8999	0,1273	0
7	10	1,9076	0,1238	-0,0077
7	11	1,9155	0,1195	-0,0079
7	12	1,9232	0,1145	-0,0077
7	13	1,931	0,1090	-0,0078
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
8	10	1,9169	0,1321	0
8	11	1,9254	0,1272	-0,0085
8	12	1,9335	0,1212	-0,0081
8	13	1,9417	0,1143	-0,0082
8	14	1,95	0,1082	-0,0083
Nombre Imagen : Red79				
Tamaño: Completa				
Método Aplicado: Variograma Prom. Vertical				
Paso				Diferencia
Inicial	Final	Dimensión	Desviación	
9	10	1,927	0,1397	0
9	11	1,9357	0,1357	-0,0087
9	12	1,9439	0,1286	-0,0082
9	13	1,9525	0,1202	-0,0086
9	14	1,9611	0,1137	-0,0086
9	15	1,9686	0,1086	-0,0075
9	16	1,9742	0,103	-0,0056

--	--	--	--	--

Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
1	3	1,4778	0
1	4	1,5609	-0,0831
1	5	1,6187	-0,0578
1	6	1,6606	-0,0419
1	7	1,6921	-0,0315
1	8	1,7167	-0,0246
1	9	1,7366	-0,0199
1	10	1,7531	-0,0165
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
2	4	1,7764	0
2	5	1,8125	-0,0361
2	6	1,8352	-0,0227
2	7	1,8506	-0,0154
2	8	1,8618	-0,0112
2	9	1,8705	-0,0087
2	10	1,8777	-0,0072
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		

3	5	1,8931	0
3	6	1,9012	-0,0081
3	7	1,9064	-0,0052
3	8	1,9102	-0,0038
3	9	1,9134	-0,0032
3	10	1,9164	-0,003
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
4	6	1,9161	0
4	7	1,9188	-0,0027
4	8	1,9208	-0,002
4	9	1,9229	-0,0021
4	10	1,9253	-0,0024
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
5	6	1,922	0
5	7	1,9234	-0,0014
5	8	1,9247	-0,0013
5	9	1,9267	-0,002
5	10	1,9293	-0,0026
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			

Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
6	8	1,9266	0
6	9	1,9291	-0,0025
6	10	1,9323	-0,0032
6	11	1,9359	-0,0036
6	12	1,9408	-0,0049
7	10	1,9358	-0,0039
7	11	1,9402	-0,0044
7	12	1,946	-0,0058
7	13	1,9529	-0,0069
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
8	10	1,9405	0
8	11	1,9454	-0,0049
8	12	1,9524	-0,007
8	13	1,9604	-0,008
8	14	1,968	-0,0076
Nombre Imagen : Red79			
Tamaño: 256*256/X=100-Y=200			
Método Aplicado: Variog. Horizontal			
Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
9	10	1,9458	0
9	11	1,9512	-0,0054
9	12	1,9597	-0,0085
9	13	1,9692	-0,0095
9	14	1,9774	-0,0082
9	15	1,9831	-0,0057

Paso		Dimensión	Diferencia
Inicial	Final		
7	9	1,9319	0
9	16	1,9851	-0,002

