



Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas: Casos de estudio en Colombia

Camilo Ernesto Calderón Galindo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Maestría en ciencias – Geofísica

Bogotá D.C. 2021



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Geophysical mechanisms of columnar joint formation in volcanic rocks: Case studies in Colombia

Camilo Ernesto Calderón Galindo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento de Geociencias
Maestría en ciencias – Geofísica
Bogotá D.C. 2021

Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas: Casos de estudio en Colombia

Camilo Ernesto Calderón Galindo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Geofísica

Director :

Ph.D. John Jairo Sánchez Aguilar

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Maestría en ciencias – Geofísica

Bogotá D.C. 2021

Dedicada a:

Allison Mariana Calderón Parra, siempre en mi corazón...

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis el profesor John Jairo Sánchez Aguilar, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas.

Gracias a mi familia, en especial a mi madre quien con su apoyo incondicional me ha dado valor para cumplir mis metas, y gracias a su gran ejemplo sigo adelante.

Pero, sobre todo, gracias a mi esposa y mis hijos, por su paciencia, comprensión y solidaridad con este trabajo, por el tiempo que me han concedido, y que deje de dedicar a pasar momentos juntos. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo. A todos, muchas gracias.

Resumen

La formación de patrones es una propiedad natural de los sistemas dinámicos no lineales, estos sistemas tienden a la auto-organización en patrones espacio-temporales, cuyo estudio puede darnos una idea de la física subyacente. Las disyunciones columnares son uno de los ejemplos de patrones más fascinantes de la naturaleza. Alrededor del mundo se encuentran incontables ejemplos de macizos rocosos y depósitos con diaclasas organizadas en columnas y polígonos. En esta tesis se presentan observaciones, tanto cualitativas como cuantitativas, de trece afloramientos de lavas con disyunción columnar en Colombia. La configuración de las diaclasas en estos macizos rocosos permitió la identificación de facies columnata y entabladura, y mediante la descripción de los rasgos morfológicos que presentan las columnas se pudo inferir que el mecanismo de enfriamiento predominante en la formación de las columnas corresponde al enfriamiento asistido por grietas. A partir de medidas directas en campo y con procesamiento computacional de fotografías, se calcularon las variaciones relativas de los parámetros geométricos: longitud de lado, área promedio, y ángulo interno; para establecer las relaciones entre el grado de regularidad o desorden, e inhomogeneidad de los tamaños, y se relacionaron con el grado de madurez de evolución de los patrones.

Se estableció que la relación entre el promedio de tamaño de estrías y el promedio de la longitud de lados de columnas para los datos en los afloramientos en Colombia está, entre 5% y 20%, lo que concuerda con los resultados de estudios previos y de experimentos y modelos análogos controlados en mezclas de almidón. Se encontró que los números de

Péclet, para los datos están en el rango 0.28 -0.41. Para las facies columnata, la composición química de roca total (contenido de SiO₂) muestra correlación positiva con la longitud de lado de las columnas.

Palabras clave: disyunción columnar, número de Péclet, madurez de patrones, índice de hexagonalidad.

Abstract

The formation of patterns is a natural property of non-linear dynamic systems, these systems tend to self-organization in space-time patterns, the study of which can give us an idea of the underlying physics. Columnar joints are one of the most fascinating examples of patterns in nature. Around the world there are countless examples of rock masses and deposits with joints organized in columns and polygons. This thesis presents observations, both qualitative and quantitative, of thirteen outcrops of lavas with columnar disjunction in Colombia. The configuration of the joints in these rocky massifs allowed the identification of colonnade and entablature facies, and by describing the morphological features that the columns present, it was possible to infer that the predominant cooling mechanism in the formation of the columns corresponds to cooling assisted by cracks. From direct measurements in the field and with computational processing of photographs, the relative variations of the geometric parameters were calculated: side length, average area, and internal angle; to establish the relationships between the degree of regularity or disorder, and inhomogeneity of the sizes, and were related to the degree of maturity of evolution of the patterns.

It was established that the relationship between the mean streak size and the mean length of column sides for the data in the outcrops in Colombia is between 5% and 20%, which agrees with the results of previous studies and of Analogous controlled experiments and models in starch mixtures. It was found that the Péclet numbers for the data are in the range 0.28-0.41.

For the colonnade facies, the total rock chemical composition (SiO_2 content) shows a positive correlation with the side length of the columns.

Keywords: columnar disjunction, Péclet number, pattern maturity, hexagon index

Contenido

	Pág.
Resumen.....	6
1. Introducción.....	12
1.1 Investigaciones a través de la historia.....	13
1.2 Teorías acerca de la formación de las disyunciones columnares.....	16
1.3 Investigaciones recientes basadas en la teoría contraccional.....	18
1.4 Estudios sobre disyunciones columnares en Colombia.....	21
2. Método.....	23
2.1 Modelo contraccional.....	23
2.2 Clasificación de los afloramientos de las disyunciones columnares.....	26
2.3 Mecanismos de enfriamiento.....	31
2.3.1 Conducción de calor por difusividad térmica.....	32
2.3.2 Mecanismo de convección asistido por grietas.....	33
2.4 Geometría de los patrones poligonales.....	36
2.4.1 Espaciamiento entre grietas.....	39
2.4.2 Estrías.....	40
2.4.3 Relación entre el tamaño de estría y la longitud de lado.....	41
3. Datos.....	45
3.1 Datos en campo.....	45
3.2 Datos del procesamiento por medio de software.....	46
3.3 Incertidumbres de los datos tomados en campo.....	50
3.3.1 Incertidumbres de los datos obtenidos del procesamiento de fotografías por medio del software.....	51
3.4 Descripción de los afloramientos.....	51
3.4.1 Afloramientos: Cristales, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.....	51
3.4.2 Afloramiento Ataúdes.....	56
3.4.3 Afloramiento Carros de Piedra.....	58
3.4.4 Afloramientos Domo Victoria y Domo Sancancio.....	59

3.4.5	Afloramiento <i>Basalt Cay</i>	59
3.4.6	Afloramiento La Calera	59
4.	Resultados	60
4.1	Descripción cualitativa de las columnas de los afloramientos estudiados	60
4.1.1	Afloramiento Cristales.....	61
4.1.2	Afloramiento Cristales-Negritos.....	61
4.1.3	Afloramiento Cristales-Peñón	62
4.1.4	Afloramiento Ataúdes.....	63
4.1.5	Afloramiento Domo Victoria.....	64
4.1.6	Afloramiento La Calera	65
4.1.7	Afloramiento <i>Basalt Cay</i>	67
4.1.8	Afloramiento Carros de Piedra.....	68
4.2	Madurez de los patrones de disyunciones columnares en algunos afloramientos en Colombia	69
4.2.1	Homogeneidad de tamaños y regularidad de los patrones de disyunción columnar en algunos sitios de Colombia.....	72
4.2.2	Variaciones de tamaño de las áreas transversales de las columnas	75
4.2.3	Regularidad y orden de los patrones poligonales	75
4.2.4	Variación del área transversal en función de la longitud de lado	79
4.3	Tamaño de estría (<i>E</i>) versus longitud de lado (<i>L</i>)	80
4.4	Composición química.....	83
4.5	Estimación de los números de Pécelet para los afloramientos tipo columnata en algunos afloramientos en Colombia.....	85
5.	Discusión	87
5.1	Clasificación de las facies de disyunción en los afloramientos	87
5.1.1	Afloramientos con facies tipo columnata	87
5.1.2	Afloramientos con facies tipo Entabladura	90
5.2	Tendencia de los patrones poligonales a la hexagonalidad (Madurez)	94
5.3	Grado de inhomogeneidad de los tamaños de las columnas y madurez	95
5.4	Grado de (regularidad) desorden y madurez.....	97
5.5	Relación entre el tamaño de estría (<i>E</i>) vs. Longitud de lado (<i>L</i>).....	99
5.6	Variación de la composición química de los afloramientos estudiados.....	100
6.	Conclusiones	101
	A. Anexo: Porcentajes en peso de óxido y compuestos presente de los afloramientos estudiados	103
	B. Anexo: Análisis petrográfico de las muestras de los sitios Cristales, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.	104
	Referencias	119

- 1 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
 - 2 Casos de estudio en Colombia
-

1. Introducción

La morfología terrestre es el producto de procesos dinámicos complejos de sistemas no lineales y en no-equilibrio, que en algunos casos pueden presentar patrones o fenómenos de auto-organización. La importancia del estudio de patrones naturales radica en el hecho de que pueden proporcionar información cuantitativa sobre los sistemas en los que se forman, de y los mecanismos subyacentes a los mismos (Goehring, 2016). Uno de los ejemplos de formación de patrones más fascinantes de la naturaleza es el relacionado con las disyunciones columnares (Figura 1.1). Estas estructuras geológicas despiertan gran interés por las formas poligonales de las secciones transversales y el aparente orden que se puede percibir a simple vista en las redes que forman los polígonos.



Figura 1.1 Afloramientos de disyunciones columnares. Izquierda: Cerca de la cabecera municipal del Líbano, Tolima. Derecha: Cerca de la cabecera municipal de Vijes, Valle del Cauca. Fotos: Camilo E. Calderón.

1.1 Investigaciones a través de la historia

En el libro *Rerum Fossillium* (Gesner, 1565), se encuentra la representación pictórica más antigua de la cual se tenga registro sobre las disyunciones columnares (Figura 1.2), en esta podemos ver que algunas columnas tienen terminaciones típicas de los cristales; esta exageración de la terminación de las columnas se debía a que en aquella época se creía, por parte de algunos filósofos, que los basaltos columnares tenían su origen a partir de la formación y depositación de cristales en el mar. Gesner era uno de los convencidos de que la perfecta simetría y hexagonalidad de las columnas de muchos flujos de lava correspondía a la precipitación de cristales gigantes desde un océano primordial (Pyle y Sigurdsson, 1999).

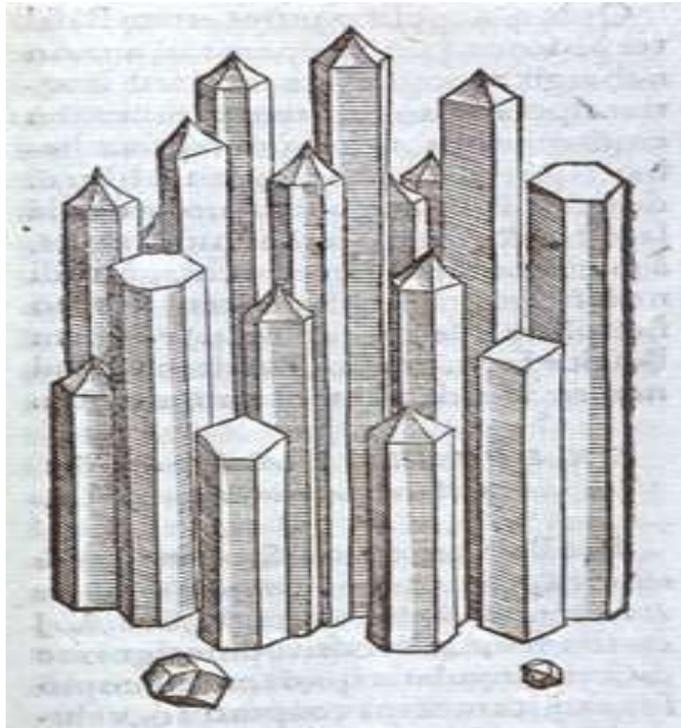


Figura 1.2. Primera representación pictórica de las columnas de basalto (disyunciones columnares) del libro *Rerum Fossillium* (Gesner, 1565). Tomada de <http://historyofgeology.fieldofscience.com/2010/09/columnar-jointing-meme-saxony-1565.html>.

En lo que respecta a los afloramientos más famosos, la llamada “Calzada del Gigante” (*Giant’s Causeway*) ubicada en el Norte de Irlanda, es uno de los afloramientos de disyunciones columnares más conocidos y declarado como una de las maravillas naturales del mundo moderno. Los relatos sobre las particulares formas de estas columnas datan de 1693, en una publicación de Sir Richard Bulkeley, considerado el primer científico que describió esta estructura, limitándose a considerar el sitio como una composición de cilindros verticales todos de una misma pieza sólida sin disyunción alguna. En respuesta al artículo de Bulkeley el reverendo Samuel Foley publicó en 1694 dos artículos en los cuales corrige la descripción hecha por Bulkeley y da una descripción más completa de las estructuras columnares de la Calzada; el primero de los artículos, además de contener un

mapa, va acompañado de un grabado de Christopher Cole de una vista en perspectiva del sitio, el cual se considera la primera ilustración conocida de la Calzada del Gigante (Figura 1.3).

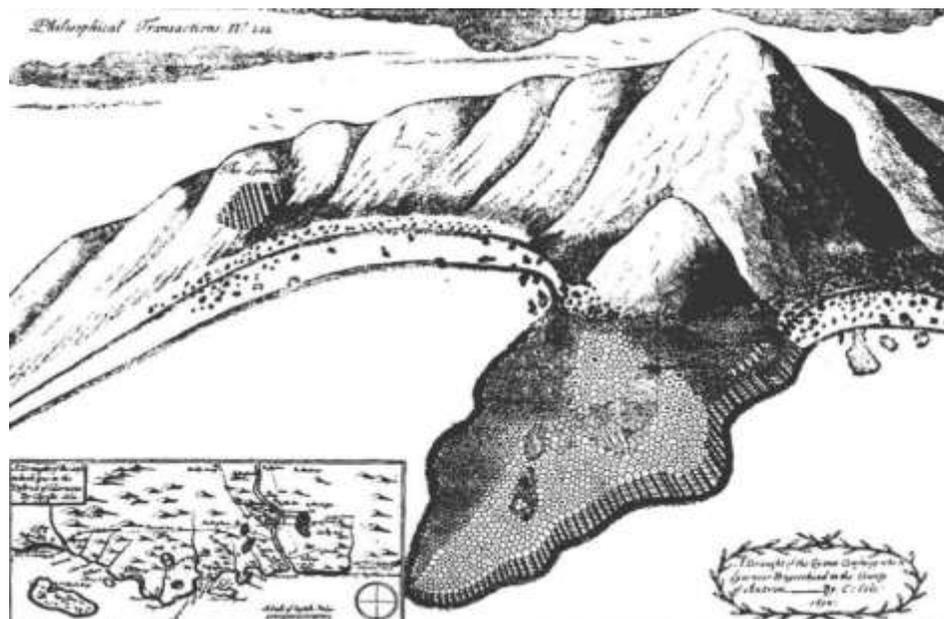


Figura 1.3 Grabado de Cristopher Cole sobre las disyunciones columnares en la calzada del Gigante, considerado la primera representación pictórica del afloramiento. Tomada de <https://pbs.twimg.com/media/DYficELXUAAIpYi.jpg>

Sin embargo, es el doctor Molyneux (1698) quien realmente se interesó de una manera más detallada por las características de los patrones presentados por las diaclasas columnares en la Calzada del Gigante, y aunque al igual que Bulkeley tampoco visitó el sitio, identificó por primera vez las rocas de la Calzada como *Lapis Basaltes* de la variedad *Basanos maximus Hibernicus*, conocida hoy en día como basalto.

Por otro lado, Desmarest (1777), encontró basaltos prismáticos formando columnas hexagonales en el suroeste de Clermont (Francia), sus observaciones de la relación de estas

columnas con los flujos de lava y las geoformas cercanas demostraron que los basaltos tenían su origen en rocas volcánicas.

1.2 Teorías acerca de la formación de las disyunciones columnares

Con respecto al origen de la formación de disyunciones columnares se han propuesto varias hipótesis. Una de ellas fue la llamada cristalización concrecional sugerida por Watt (1804) y defendida extensamente por Jukes (1862). La cual afirma que el magma fundido se solidificó alrededor de una serie de centros aislados para formar grandes esferas plásticas, que al presionarse unas contra otras adquirieron la típica simetría hexagonal.

Otra de las hipótesis contempladas fue la de convección, propuesta por Benard (1901) y estudiada extensamente por Sosman (1916) quien demostró que un sistema de celdas de convección hexagonal se desarrolla cuando una fina capa de cera o aceite se calienta en un recipiente plano, y encontró además que si se le agregan partículas sólidas, las más ligeras que el fundido tienden a moverse hacia los bordes exteriores, mientras las más pesadas se concentran en el centro; con esto afirmó que las disyunciones columnares son el resultado de la convección y que la diferencia de composición entre el centro y los bordes de algunas columnas se debe al movimiento convectivo. Sin embargo, las celdas de convección tienen una forma corta y ancha contraía a la forma alargada y estrecha de las disyunciones columnares. El autor Lefeber (1956) intentó superar la dificultad anteriormente planteada, sugiriendo que un arreglo de celdas pequeñas apiladas podría conformar la columna completa.

Una de las teorías que explica el fenómeno de las disyunciones columnares es la propuesta por Tiller (1963) quien presentó una revisión exhaustiva de la hipótesis del “superenfriamiento constitucional” y otros aspectos de la solidificación expuesta en un comienzo por este mismo (Tiller et al., 1953). Otro de los aportes a la hipótesis del

superenfriamiento es la de Guy y Le Coze (1990) quienes hacen una reflexión sobre los mecanismos de superenfriamiento constitucional haciendo énfasis en la predicción de gradientes de composición química durante la solidificación; según estos autores, los gradientes pueden o no aparecer en el sólido final, es decir entre el centro y el borde de la columna de basalto.

Otro de los hechos que apoya la hipótesis de súper enfriamiento es la existencia de estructuras circulares y radiales dentro de las columnas, que no pueden explicarse por meteorización ni por la influencia de las fracturas que delimitan los prismas, (Figura 1.4.)



Figura 1.4 Fotografía que muestra la sección transversal poligonal de una columna que presenta una estructura radiante limitada por un círculo inscrito. Parque Skaftafell, Islandia. Tomado de Guy (2010).

Por otro lado, la hipótesis “contraccional” afirma que la formación de las columnas se debe a las tensiones generadas en el proceso de contracción térmica, durante la etapa de enfriamiento de la lava. Esta idea, propuesta en principio por Raspe (1771), fue aceptada y desarrollada más detalladamente por otros autores, entre los cuales se podrían citar: Scrope (1825), Thompson (1863), Mallet (1875), Bonney (1876) e Iddings (1886), este último fue

el primero en reportar la existencia de bandas horizontales en las caras de las columnas, conocidas posteriormente como “estrías”. Sin embargo, el autor más representativo de esta hipótesis es Mallet quien fue el primero en aplicar la elasticidad lineal y la teoría de la conducción de calor, para demostrar cómo un flujo de lava caliente se enfría, posteriormente se agrieta y produce un patrón de fisuras poligonal de tipo columnar.

Sin embargo, más recientemente Gilman (2009) cuestionó la hipótesis contraccional argumentando que los patrones de fractura en materiales frágiles homogéneos (por ejemplo, los cristales) no toman formas poligonales cuando el material se somete a campos de tensión homogéneos. Otro de los argumentos dados por Gilman es la geometría de las articulaciones, pues en el fenómeno de contracción, se obtienen polígonos con ángulos de 90° con posibles contornos cóncavos (y las articulaciones pueden abrirse); mientras que en el fenómeno de súper enfriamiento constitucional se obtienen otros polígonos siempre convexos, en particular los hexágonos con ángulos de 120° .

1.3 Investigaciones recientes basadas en la teoría contraccional

Algunas de las investigaciones recientes sobre la formación de las disyunciones columnares están basadas en la teoría contraccional de Mallet(1875), como es el caso de la hipótesis modificada de la contracción térmica propuesta por Spry (1962). Otros de los autores como Ryan y Samis (1978), estudiaron mecanismos de formación de estrías en basaltos en enfriamiento, realizando una comparación entre las fracturas producidas experimentalmente y las de los flujos de lava naturales, basando sus hipótesis en las observaciones del proceso de enfriamiento del lago de lava Makaopuhi en Hawaii. Por otro lado, Aydin y Degraff (1988) abordan el problema de la “maduración” de los patrones y proponen que estos evolucionan sistemáticamente a redes hexagonales a medida que las diaclasas crecen hacia adentro durante la solidificación de la lava. Esta evolución se produce por el cambio gradual de la mayoría de las intersecciones ortogonales a intersecciones no ortogonales de $\sim 120^\circ$,

formando así una red de patrones poligonales con predominancia hexagonal en los casos más maduros.

A su vez Budkewitsch y Robin (1994) proponen un modelo geométrico y un algoritmo basado en los diagramas de Voronoi en el cual cada nueva grieta debe propagarse paralela hacia el gradiente térmico, por delante de la punta de la grieta primaria. En cuanto a experimentos sobre disyunciones columnares Müller, (1998) realizó una investigación mediante la desecación de mezclas de almidón y agua, concluyendo que los patrones de grieta relacionados con las columnas en basalto y almidón son en gran parte similares, y que las diferencias en sus escalas espacio-temporales se deben a la diferencia en las constantes de difusión, que es aproximadamente dos órdenes de magnitud.

Por su parte Jagla y Rojo (2002), investigaron el problema de la maduración de los patrones del fenómeno de disyunción columnar, demostrando que el ordenamiento típico que se observa de las columnas puede ser descrito como una tendencia a minimizar una energía funcional, además realizaron simulaciones atómicas para confirmar esta interpretación. Por otra parte, Saliva y Jagla (2003) utilizan el método de elementos finitos para calcular el campo de deformación delante del frente de fisura, observando la tendencia de las grietas a adaptarse dinámicamente para alcanzar un patrón poligonal estable. También encontraron que la tendencia de las grietas a desplazarse lateralmente tras la penetración depende de la geometría de las grietas vecinas, pero es independiente de la escala global del patrón. Tomomaru y Matsumoto (2004), Mediante un experimento utilizando una mezcla de almidón-agua estudiaron el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre las características morfológicas de las disyunciones columnares de basalto.

Goehring (2008) examinó el problema de la selección de escala que determina el diámetro de las columnas llevando a cabo experimentos controlados en suspensiones de almidón de maíz y agua; encontrando que el tamaño de las columnas es inversamente dependiente de la velocidad del frente de contracción durante su formación; también realizó observaciones de campo en flujos de lava solidificados; analizando en detalle las anchuras de las columnas y

las alturas de las estrías mostrando una proporcionalidad inversa entre estas. Hetényi et al. (2012), realizaron mediciones cuantitativas sobre el tamaño de columnas en 50 sitios en tres países de Europa, estudio que se centró en la composición química de las rocas y el estilo de emplazamiento junto con la geometría de lava; con esto dedujeron condiciones de contorno para el proceso de enfriamiento y la tasa de pérdida de calor. Jungen (2012) presentó un modelo variacional suponiendo que el proceso de fractura busca minimizar la energía total del sistema. La expresión de la energía elástica se simplifica y la configuración de energía mínima es determinada analíticamente por medio de una derivación rigurosa. Además, se estudió el comportamiento de la energía bajo la simetrización de Steiner y Schwarz de la sección transversal de la columna. Phillips et al. (2013) estudiaron las disyunciones columnares en flujos de lava basáltica en la isla de Staffa en Escocia, utilizando una combinación de mapeo de campo y medición de las dimensiones de las columnas, petrografía de muestras y mediciones de las distribuciones de tamaños de cristales de plagioclasas, que interpretaron usando modelos teóricos, encontraron un índice de hexagonalidad similar al de la Calzada del Gigante y dedujeron mecanismos de enfriamiento.

Hoffman et al. (2015), mediante la aplicación de conceptos de la mecánica de fractura elástica lineal y el principio de máxima velocidad de liberación de energía, describieron la evolución del patrón de fisuras como una transición de la configuración rectangular inicial al patrón hexagonal. Mediante un estudio analítico y por medio de la simulación tridimensional de elementos finitos, Christensen et al. (2016), presentaron un estudio exhaustivo de disyunción columnar basado en experimentos de enfriamiento de ácido esteárico, y utilizaron simulaciones numéricas para demostrar que el diámetro de las disyunciones columnares es una función no trivial.

A pesar de que algunas cuestiones siguen sin entenderse totalmente y de no ser una teoría completa, la hipótesis contraccional hoy en día sigue siendo la más aceptada y sigue motivando numerosos trabajos sobre los mecanismos de disyunción columnar con diferentes

metodologías de investigación, como por ejemplo D'Antuono y Morandini (2017), Anderssohn y Hoffmann,(2018) y Piombo y Dragoni (2018).

1.4 Estudios sobre disyunciones columnares en Colombia

En Colombia se conoce de la existencia de disyunciones columnares por algunos estudios principalmente descriptivos, en los cuales se da cuenta de la presencia de formaciones con estas estructuras, como los reportados por Naranjo y Ríos (1989), en donde se menciona la existencia de disyunciones columnares en los domos Sancancio y Tesorito en Manizales. En otros estudios solo se señalan sitios (IDEAM, 2010) o se hace mención de la geología local y en algunos casos la petrografía y geoquímica de estas rocas (Téllez, 2011).

Se han realizado estudios geológicos en las islas de Providencia y Santa Catalina, en los que se habla de la formación de las rocas que conforman el islote llamado *Basalt Cay* que presenta facies regulares de disyunción columnar (Builes et al, 2014). Por su parte Botero et al. (2018) presentan un modelo geológico del campo volcánico monogenético Villamaria-Termal donde mencionan las formas hexagonales de las columnas de los afloramientos en el Domo Sancancio y Tesorito. Flórez (2017) realizó una compilación descriptiva de la geología de varios sitios con rocas volcánicas con disyunción columnar y recopiló datos de dimensiones de los emplazamientos y sus facies identificables, y Calderón et al. (2017) presentaron una primera aproximación a los mecanismos físicos de formación de las diaclasas de origen térmico en relación a rocas volcánicas en Colombia. Más recientemente, Rave y Sánchez (2019) y Rave (2019) presentaron los resultados del análisis de las estructuras de disyunción en cuatro sitios al nororiente del volcán Nevado del Ruiz con inferencias acerca de las condiciones energéticas y de esfuerzos durante el emplazamiento, y Forero (2020) analizó la morfología, facies y dimensiones de estructuras en un emplazamiento de lavas del volcán Paramillo de Santa Rosa, definiendo su grado de madurez de acuerdo a las relaciones dimensionales entre estructuras.

- 2 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
 - 2 Casos de estudio en Colombia
-

Hasta el momento, sin embargo, no se tiene conocimiento de un estudio detallado acerca de los mecanismos de formación ni de la historia térmica de algunos sitios en Colombia y es por eso que la presente investigación se enfoca en el estudio de las relaciones entre los distintos parámetros geométricos que presentan las columnas y sus estructuras, y como de estas relaciones se puede inferir el tipo de mecanismo de enfriamiento predominante en su formación.

2. Método

Para encarar el estudio sobre la formación de las estructuras que presentan disyunción columnar en rocas volcánicas, en primer lugar, se precisará sobre los detalles del modelo contraccional propuesto por Mallet (1875). Se mencionarán las características principales a las que se acude para denominar las facies de disyunción en un afloramiento (como tipo columnata o entabladura). De igual manera, se abordarán los mecanismos de enfriamiento dominantes en el proceso de formación. Se discutirán las características principales de las columnas que pueden ser observadas en campo. Por último, se describirá como encontrar el número de Péclet a partir de relación entre el tamaño de estría y la longitud de lado, el cual puede dar una idea del tipo de enfriamiento dominante en la formación de las disyunciones columnares.

2.1 Modelo contraccional

A pesar de algunos vacíos de la teoría contraccional, esta sigue siendo hoy en día la más aceptada para dar explicar la formación de las disyunciones columnares. Por lo cual, para estudiar la génesis de las disyunciones en los afloramientos es necesario describir los puntos relevantes de esta idea.

Para empezar la explicación del fenómeno de contracción, se tendrán en cuenta las siguientes suposiciones: (1) Se considera que un flujo de lava es una delgada lámina horizontal uniforme, es decir que su espesor es despreciable comparado con las dimensiones laterales, y se encuentra en estado estacionario, la cual está a una temperatura en el rango de estado líquido (roca fundida); (2) Las dimensiones laterales son mucho mayores que su

espesor; (3) La lava se enfría por conducción debido al contacto con la superficie inferior, la cual se encuentra a una menor temperatura que la lava; (4) En la superficie superior se presenta extracción de calor por radiación hacia el aire circundante.

Teniendo en cuenta las cuatro suposiciones anteriores, la lava empezará a enfriarse y por consiguiente, la energía interna de las partículas que componen el cuerpo magmático disminuye y las distancias intermoleculares se hacen cada vez menores, generando la consecuencia macroscópica de contracción del material.

Ahora, si se simplifica el proceso de contracción de lava a un problema de dos dimensiones, pueden existir dos modos de contracción como se muestra en la Figura 2.1. En el primer modo, todo el flujo tabular se contrae, y como consecuencia, se presenta una reducción generalizada del tamaño de la lámina; en el segundo modo, la contracción ocurre en varios puntos, es decir se trata de varias reducciones de tamaño localizadas. En promedio, los centros de contracción localizados estarán equidistantes lo cual se puede aproximar a un diagrama de Voronoi (Budkewitsch y Robin,1993).

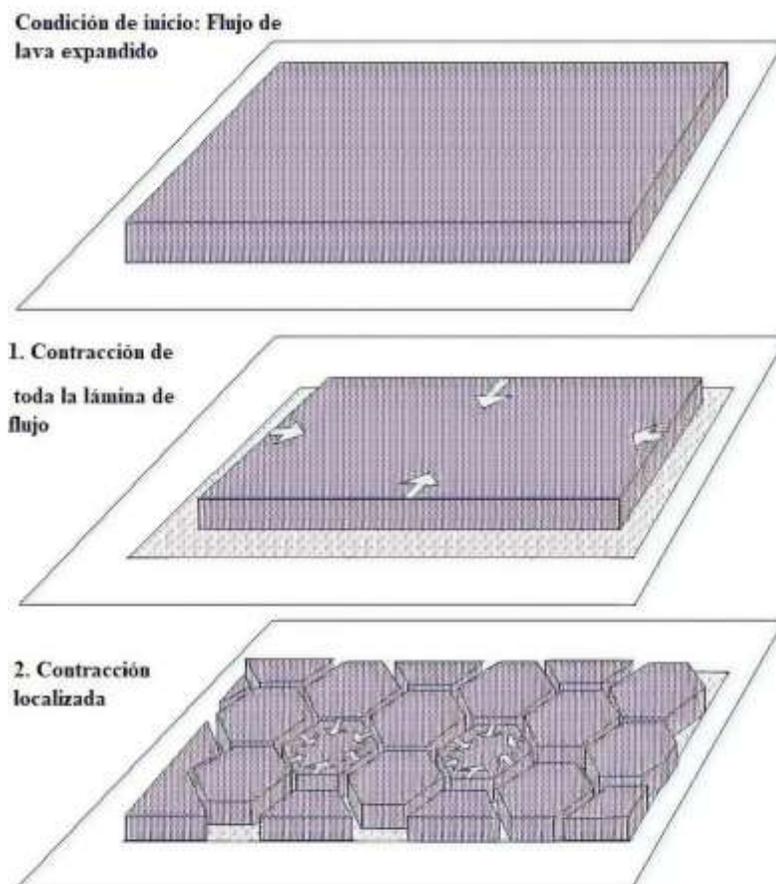


Figura 2.1 Condición de inicio para el proceso y los dos posibles modos de contracción. Tomada y modificada de: <https://s3.amazonaws.com/gs-geo-images/b78e1a30-965a-41db-b473-e3ee4dcf1b52.jpg>

Dado que es en el segundo modo de contracción donde se puede llegar a producir el patrón poligonal, cabe detallar más este proceso. Este puede aparecer cuando la extensión del cuerpo es grande y existe un gradiente de temperatura, en cuyo caso la contracción no es libre y se genera estrés térmico. Este empieza a aparecer cuando la lava en enfriamiento alcanza la temperatura de transición vítrea T_g , la cual se puede considerar como la temperatura en la que hay un cambio en las propiedades mecánicas de la lava, más precisamente la temperatura a la cual la fracción de fundido en la lava cambia entre

comportamiento viscoso, y frágil y que depende del llamado tiempo de relajación estructural del fundido (Webb, 1997; Cashman y Scheu, 2015). En relación a la temperatura de transición vítrea en el basalto, se ha detectado una transformación en el coeficiente de expansión térmica, así como un salto abrupto en la dependencia del módulo de Young con la temperatura. También se genera un cambio en el comportamiento de relajación del estrés. Esta temperatura T_g es de aproximadamente 725°C para el basalto (Ryan y Samis, 1978).

Una vez empieza el fenómeno de contracción, se excede la resistencia de la capa de lava en enfriamiento y comienza el fracturamiento de ésta en superficie, formándose grietas primarias, que en el proceso de enfriamiento empiezan a propagarse a profundidad en dirección perpendicular a las isothermas y a las superficies de contacto. La evolución de esta red de grietas primarias formará las redes poligonales observadas en secciones transversales a las columnas en muchos afloramientos alrededor del mundo (Degraff y Aydin, 1993).

El frente de enfriamiento avanzará progresivamente hacia el interior del cuerpo magmático, lo cual posibilitará que las direcciones de las tensiones térmicas acumuladas por la contracción, sean paralelas a las isothermas y por ende a las superficies de enfriamiento. Dado que los esfuerzos generados por las tensiones térmicas hacen que se produzcan fracturamientos, que crecen en dirección perpendicular a las superficies de enfriamiento, estos a su vez permitirá la aparición de divisiones en la roca en forma de columnas (Hofmann et al, 2015).

2.2 Clasificación de los afloramientos de las disyunciones columnares

En general, los afloramientos de rocas que presentan el fenómeno de disyunción columnar guardan ciertas características comunes, como la presencia de una sucesión de dos o más facies de columnas (Tomkeieff, 1940). Una facies la podemos considerar como una cierta extensión del afloramiento en la cual las columnas que la conforman presentan una configuración particular, distinta a la de otros niveles.

En este sentido, Bakewell (1813) fue el primero en describir las facies donde las columnas tienden a ser todas paralelas, ordenadas y regulares, conocidas como “columnatas”. Tomkeieff (1940), por su parte, se encargó de darle nombre a las facies que presentan cierto desorden en las direcciones de las columnas, llamándolas “entabladuras”. Estos dos niveles diferentes se muestran en la Figura 2.2, donde se observa una sección del afloramiento ubicado en la isla de Staffa en Escocia, en el cual se aprecian claramente las facies de columnata y de entabladura.

Las columnas de facies columnata tienen ejes perpendiculares a la superficie de enfriamiento, son generalmente lineales entre sí, están regularmente espaciadas y tienen una tendencia hexagonal en la geometría de sus secciones ortogonales (Woodell, 2012). Una de las características de una facies de columnata es que se pueden rastrear o distinguir columnas individuales. Por otra parte, la facies entabladura tiene columnas que se bifurcan, con ejes inclinados, desorganizadas, y que terminan unas contra otras, generalmente la entabladura puede separar dos niveles de columnatas (Spry, 1962).



Figura 2.2 Facies de columnata y entabladura presentes en el afloramiento llamado Fingal's lava ubicado en la Isla de Staffa (Escocia). Tomado y modificado de Gohering (2008).

Muchos de los afloramientos documentados presentan una característica común y es la presencia de dos niveles de facies columnata, inferior y superior, con columnas orientadas en ángulo recto con respecto a la superficie de enfriamiento (Budkewitsch y Robin, 1994). Estos dos niveles pueden estar separados por un nivel de entabladura, donde la organización y regularidad de las columnas desaparecen, Figura 2.3. A menudo se ve que la columnata inferior tiene columnas más anchas y más cortas que la columnata superior (DeGraff y Aydin, 1993). La presencia de estrías y los rasgos geoquímicos y petrográficos pueden dar indicios sobre la formación de las columnatas inferior y superior. Varios estudios han determinado que en general estas columnatas se formaron durante el mismo evento de emplazamiento, por lo cual la diferencia en tamaño y altura entre ellas debe estar relacionada

con el mecanismo de enfriamiento (Walker, 1986; DeGraff et al 1988; Guidi, 2013). También pueden aparecer cuerpos de basalto que presentan entabladura en la parte superior como se muestra en las Figuras 2.2 y 2.4.

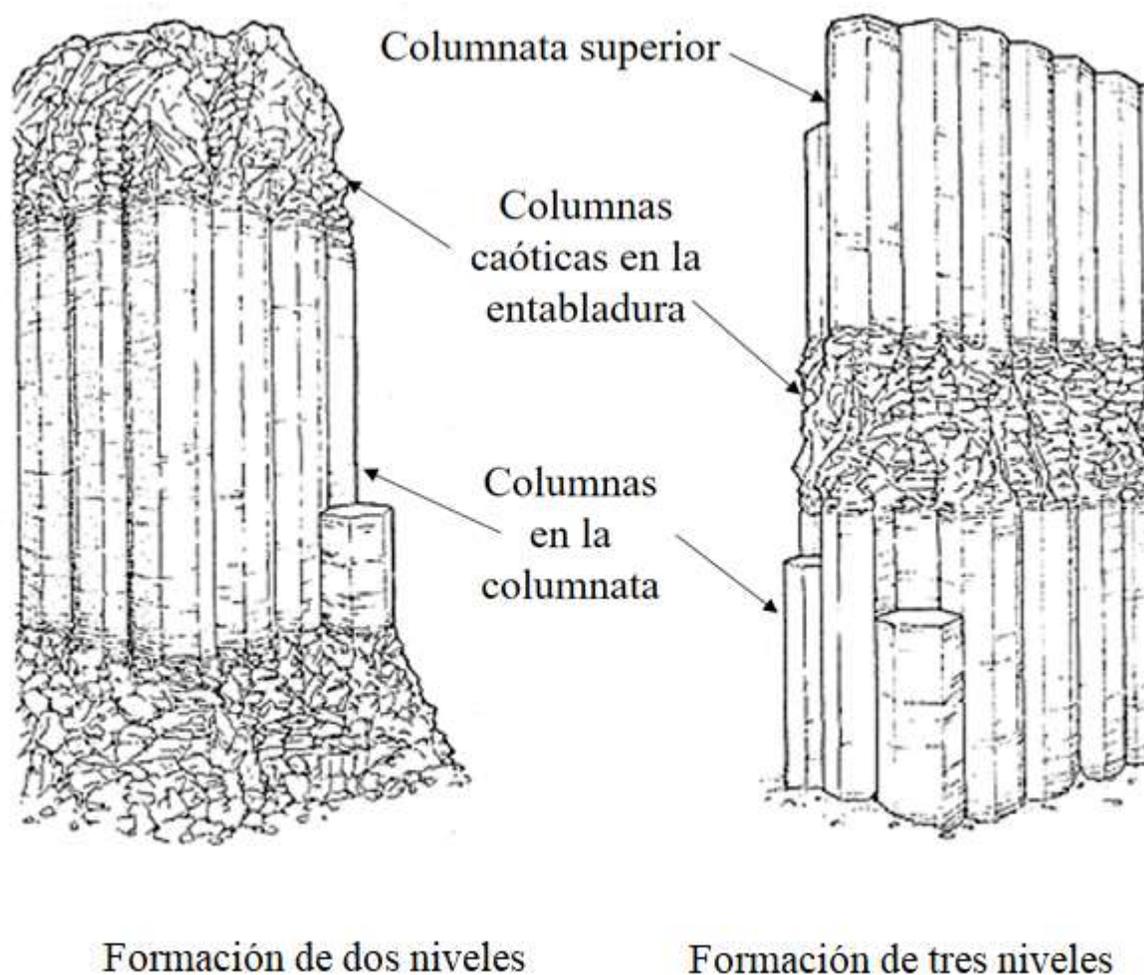


Figura 2.3. Representación gráfica de un afloramiento con dos niveles de columnatas y un nivel de entabladura. Tomada y modificada de Walker (1986).

En lo que respecta a la formación de las facies entabladura, DeGraff y Aydin (1987, 1989) proponen que ésta surge favorecida por una cantidad de agua adicional en el proceso de formación, cuya fuente puede ser lluvias, inundaciones, glaciares o nieve, que aceleran el enfriamiento y causan columnas más estrechas. Esto conllevaría al patrón caótico propio de esta facies (Long y Wood, 1986).



Figura 2.4 Afloramiento *aleo-relief*, *Saint-Arcons*, Francia, que presenta dos niveles: una columnata y entabladura en la parte superior. Tomada de Hétengy y Milazzo (2014).

También es pertinente mencionar que las disyunciones columnares no siempre son lineales a lo largo de un afloramiento, puesto que se han detectado casos en los cuales las columnas se curvan como lo demuestra la Figura 2.5. Esto podría ser consecuencia de que las isotermas también se curvan (Woodell, 2012).



Figura 2.5. Afloramiento con columnata curvada. “*Columnar joints are ordered fracture patterns found in a variety of media from basalt to cornstarch, Stephen Morris*”. Tomada de <https://www.flickr.com/photos/nonlin/sets/72157619229222588/>

2.3 Mecanismos de enfriamiento

Actualmente en el estudio de las disyunciones columnares se consideran principalmente dos mecanismos de enfriamiento: por una parte, la conducción de calor por difusividad térmica y por otro lado la hipótesis que hace relación al enfriamiento por convección asistido por grietas, propuesta por Goehring y Morris (2008). En esta última se afirma que, debido a la presencia de agua en las grietas, se produce una transferencia de calor convectivo la cual hace que la eficiencia de enfriamiento sea mayor (Budkewitsch y Robin, 1994). Sin embargo, pueden existir casos en los cuales no hay suficiente agua, u otros en los que las columnas se forman cerca de las márgenes del flujo, en estos se presume que el transporte de calor es convectivo pero dominado por la difusividad térmica.

2.3.1 Conducción de calor por difusividad térmica

Para modelar el problema de enfriamiento por difusividad térmica, es conveniente partir de un cuerpo magmático, en el cual el flujo de calor es hacia la superficie superior y presenta una capa sólida que crece en tamaño a medida que se enfría el cuerpo. Este efecto se muestra mediante el esquema de la Figura 2.6. Además, se supone que el flujo se ha solidificado hasta una distancia $Z=Z_m(t)$; la temperatura T_m del magma líquido es uniforme; y que éste está siempre debajo de la capa sólida en crecimiento (Turcotte y Schubert, 2002).

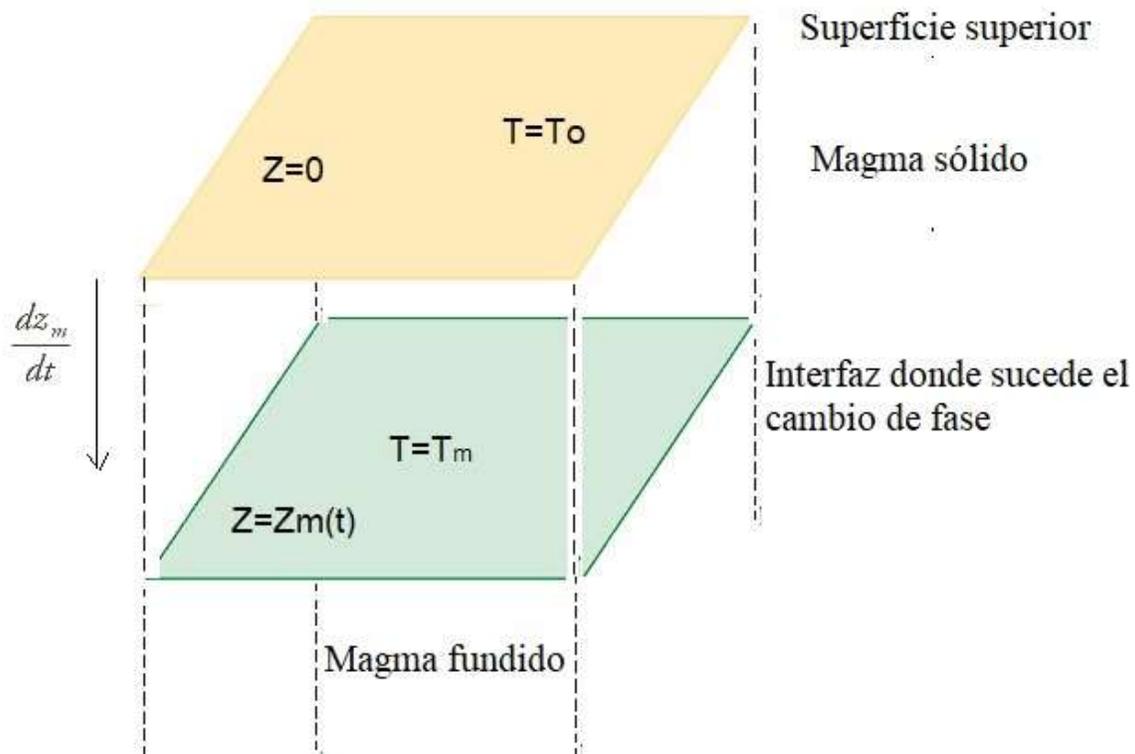


Figura 2.6 Esquema del mecanismo de enfriamiento por difusividad térmica.

Con el fin de modelar la difusividad térmica matemáticamente, es importante considerar la ecuación de difusión térmica en una dimensión, dada por

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

Donde κ es la difusividad térmica y T es el campo de temperatura. La ecuación 2.1 gobierna la variación espacial y temporal de la temperatura, cuando hay una transferencia de calor en una dimensión por conducción.

La solución a la ecuación 2.1 en el semi-espacio es decir para la condición $0 \leq Z \leq Z_m(t)$ y considerado la Figura 2.6 es

$$\frac{T-T_0}{T_m-T_0} = \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}} \quad (2.2)$$

donde erfc es la función de error complementaria dada por

$$\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf} \eta \quad (2.3)$$

A su vez $\operatorname{erf}(\eta)$ es conocida como la función de error, que se puede escribir como

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta'^2} d\eta' \quad (2.4)$$

La ecuación (2.2) es resuelta sujeta a las condiciones de frontera $T = T_0$ en $Z = 0$, $T = T_m$ en $Z = Z_m(t)$, y $Z_m = 0$ en $t = 0$. Donde se ha introducido la coordenada adimensional $\eta = \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}}$, esta es la escala de longitud a lo largo de la cual los cambios de temperatura; y por lo tanto, la contracción; ocurren y aumenta con el tiempo (Christensen, 2017).

2.3.2 Mecanismo de convección asistido por grietas

Por otro lado, tenemos que en un comienzo cuando la lava se encuentra en enfriamiento, el mecanismo predominante en el proceso de formación de las disyunciones columnares es puramente difusivo. Sin embargo, cuando la temperatura de la lava ha caído por debajo de la temperatura de ebullición del agua, otro mecanismo de enfriamiento surge extrayendo de

forma más eficiente el calor, por medio del flujo del vapor de agua a través de las grietas. Este mecanismo surge en profundidad, cuando la lava aún se encuentra a una temperatura a la cual esta fundida. El agua que llega por las grietas empezará un proceso de ebullición, generando vapor que se transporta de nuevo por las grietas y se condensa cerca de la superficie de enfriamiento. Como resultado, la evolución térmica se desacopla en una zona convectiva, donde $T = 100^{\circ}\text{C}$, y una zona conductora, donde $T > 100^{\circ}\text{C}$ (Goehring et al., 2016). Esta zona convectiva se moverá en profundidad a una velocidad v aproximadamente constante, así como también se estabilizara la velocidad de enfriamiento de la lava hasta volverse constante. El perfil de temperatura en profundidad para este mecanismo se representa en la Figura 2.7 (Goehring et al. 2016).

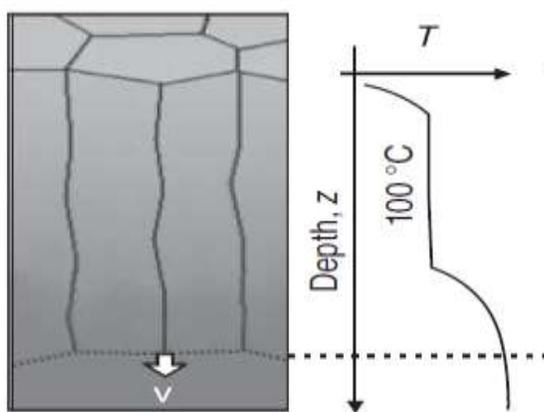


Figura 2.7 El perfil de temperatura en profundidad para el mecanismo de convección asistido por grietas. Tomado y modificado de Goehring et al. (2016).

Además, se ha comprobado la validez del mecanismo de enfriamiento asistido por grietas, mediante el monitoreo del lago de lava Kilauea Iki (Hardee, 1980) en donde el perfil de temperatura del lago de lava en enfriamiento se midió durante un año. En este monitoreo se observó una zona fría uniforme a 100°C , sobre los 40 m, cercana a la superficie de enfriamiento del aire. Esta zona se propagó a una velocidad constante hacia el interior del

lago de lava. La forma espacial del perfil de temperatura medido estuvo de acuerdo con el enfriamiento convectivo (Cristensen et al., 2016).

En lo relacionado con el modelo matemático para la descripción del enfriamiento asistido por grietas se parte de la ecuación de difusión del calor (ecuación 2.1) (Turcotte, y Schubert, 2002), teniendo en cuenta un marco de referencia que se mueve a una velocidad v igual a la velocidad del frente de solidificación. Realizando un cambio de variable $z' = z - vt$ tendremos

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2} + v \frac{\partial T}{\partial z'} \quad (2.5)$$

El mecanismo de enfriamiento asistido por grietas implica una condición de estado estacionario, en este caso la ecuación (2.1) sería independiente del tiempo y si introducimos el número de Péclet

$$Pe = \frac{vR}{\kappa} \quad (2.6)$$

Donde R es la representación de la longitud de escala del problema, el número de Péclet es un parámetro adimensional, que estima los efectos advectivos sobre los efectos difusivos involucrados en el proceso de enfriamiento, es decir que el número de Péclet se puede escribir como

$$Pe = \frac{\text{Advección}}{\text{Difusión}}$$

Cuando Pe es grande, indica que el sistema es dominado por el fenómeno de transporte convectivo y un número pequeño indicaría un flujo difuso. Ahora, tomando $z'' = z'/R$ tendríamos que la ecuación 2.6 se transforma en

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z''^2} + P_e \frac{\partial T}{\partial z''} = 0 \quad (2.7)$$

La solución a la ecuación 2.7, estaría dada por:

$$T(z'') = T_1 + \Delta T \left(\frac{1 - e^{-P_e z''}}{1 - e^{-P_e z_0''}} \right) \quad (2.8)$$

Donde $\Delta T = T_0 - T_1$, T_0 =Punto de solidificación, $T_1 = 100$ °C Temperatura de la zona de convección.

El parámetro z_0'' se obtiene del flujo de calor debido al calor latente liberado, q , en el frente de solidificación. En el caso en que el calor latente sea despreciable, la ecuación (2.8) sería de la forma

$$T(z'') = T_1 + \Delta T (1 - e^{-P_e z''}) \quad (2.9)$$

2.4 Geometría de los patrones poligonales

Las formas poligonales generadas por el fenómeno de disyunción columnar son uno de los rasgos que más llaman la atención de la comunidad científica. En lo relacionado con estas geometrías se han observado afloramientos en diferentes partes del mundo, donde la mayoría de polígonos tienen seis lados como forma predominante (Phillips et al., 2013). También se han encontrado otros sitios donde se presentan polígonos de hasta ocho lados como lo reporta Héteny et al. (2012). Un ejemplo de la predominancia de hexágonos, se ha documentado en el afloramiento llamado la Calzada del Gigante en Irlanda. Una representación famosa de un área poligonal de este afloramiento se muestra en la Figura 2.8, una versión modificada de la realizada por O'Reilly (1879), donde los polígonos de color verde son las secciones transversales de columnas de seis lados, los azules de cinco lados, los naranjas de cuatro y los de color púrpura son los polígonos con más de seis lados.

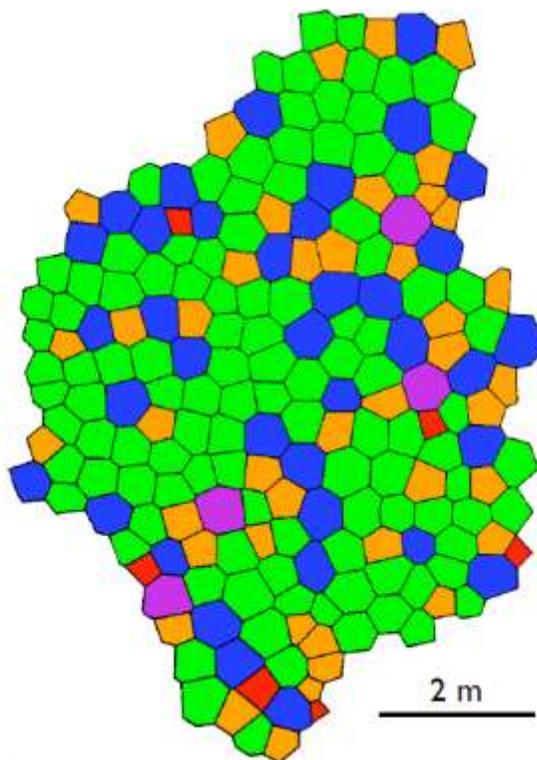


Figura 2.8. Representación realizada por O'Reilly (1879) de una sección de la Calzada del Gigante. Tomada de Goehring (2008).

La importancia del estudio de la geometría y de la evolución de estos patrones poligonales, radica en las relaciones entre los diferentes parámetros que caracterizan los afloramientos con disyunción columnar, puesto que estas pueden darnos idea de los fundamentos físicos subyacentes al fenómeno (Goehring, 2008). Si bien la disyunción columnar es más investigada en el enfriamiento de lavas basálticas, en la naturaleza se presenta este tipo de fenómeno en otros materiales, como por ejemplo en sedimentos finos (Bohn, Pauchard y Couder, 2005), en zonas donde predominan suelos con permafrost, y en los procesos de desecación de almidón de maíz, como los estudiados por Goehring y Morris (2006). También se han observado disyunciones columnares en el planeta Marte que abarcan alrededor de unos 200 km², columnas que exhiben gran semejanza con el fenómeno que se presenta en la Tierra (Milazzo et al., 2009).

Otros estudios demuestran que los patrones poligonales evolucionan sistemáticamente desde un estado primario de redes, de cuatro lados o tetragonales a redes hexagonales (Ryan y Sammis, 1981; Aydin y DeGraff, 1988; Budkewitsch y Robin, 1993). De acuerdo a las observaciones de estos estudios se infiere que existen tres tipos de intersecciones entre diaclasas, los cuales son llamadas tipo T, Y, y X. La de tipo T es una intersección donde los polígonos formados son tetragonales; en las de tipo Y, las diaclasas forman ángulos aproximadamente de 120°; y por último en la intersección tipo X, los patrones son formados por dos uniones tipo Y.

De acuerdo a lo anterior, Gray et al. (1976), demuestran mediante métodos estadísticos, que, para un plano seccionado por una red de polígonos convexos, el número promedio de lados por polígono está dado por la relación

$$\bar{n} = \frac{2(2J_T + 3J_Y + 4J_X)}{J_T + J_Y + 2J_X} \quad (2.10)$$

Donde J_T , J_Y y J_X son las fracciones de las intersecciones tipo T, Y y X, respectivamente, presentes en la red poligonal. De acuerdo con la definición dada previamente y la ecuación 2.11 se puede observar que, si existe una mayor frecuencia de intersecciones tipo Y, \bar{n} tiende hacia el valor de seis. Por otro lado, para calcular la desviación o la dispersión de una red poligonal alrededor de un valor, por ejemplo $\bar{n} = 6$, se puede utilizar el “índice de hexagonalidad” propuesto por Budkewitsch y Robin (1994), el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\chi_N = \sqrt{(f_5 + f_7) + 4(f_4 + f_8) + 9(f_3 + f_9) + 16f_{10} + 25f_{11} + \dots} \quad (2.11)$$

Donde f_n es la frecuencia relativa de polígonos de n lados en y χ_N es el índice de hexagonalidad, el cual es una medida de la madurez del patrón poligonal, un índice de hexagonalidad cero representaría un patrón perfectamente ordenado con todos los polígonos de seis lados, mientras un $\chi_N = 1$ indicaría que todos los polígonos son de cinco lados o siete lados. El afloramiento la Calzada del Gigante, se considera que tiene la red de patrones poligonales más maduros que se hallan registrado (Phillips et al ,2013), tiene un índice de hexagonalidad $\chi_N = 0,80$ (Budkewitsch y Robin, 1994).

2.4.1 Espaciamiento entre grietas

El espaciamiento entre grietas es uno de los parámetros más estudiados de las disyunciones columnares, sobre todo en lo relacionado con los mecanismos de selección que subyacen las diferentes longitudes de espaciamiento que se han encontrado en la naturaleza, puesto que el rango de longitudes abarca al menos un orden de magnitud (Ryan y Samis, 1978). Este parámetro puede ser estudiado en campo midiendo el diámetro máximo de las columnas o por la longitud promedio de los lados de las caras de los polígonos formados.

La gran mayoría de investigaciones sobre la separación entre grietas coinciden en que hay una dependencia de este parámetro con la velocidad de enfriamiento, tal como lo estudiaron Tomkeieff (1940); DeGraff et al. (1989); Budkewitsch y Robin (1994); Lore et al. (2001) y Cristensen et al. (2016). Estas investigaciones determinaron que un proceso de enfriamiento lento dará como resultado diámetros de columna más grandes, mientras que un enfriamiento rápido producirá diámetros más pequeños. Otras investigaciones como la de Hétengy et al. (2012), atribuyen una influencia en el tamaño de las columnas al entorno geológico, en el cual sucede el proceso de enfriamiento, o al estilo de emplazamiento (canal de lava, lago de lava, domo de lava, silo y dique). Lo anterior se debe a que las superficies de enfriamiento, o los contactos geológicos magma-roca y sus geometrías, controlan en gran medida la transferencia de calor desde la lava o el magma en enfriamiento hacia el ambiente, lo cual genera una repercusión directa sobre la velocidad de enfriamiento (Hétengy et al ,2012). Este autor también sugirió que otros rasgos como la composición química, y en especial la

fracción de vidrio de la lava, tienen una gran influencia en la velocidad de enfriamiento, estableciendo que un enfriamiento más lento produce mayor cristalinidad.

2.4.2 Estrías

Otra de las características observables, y en ocasiones medibles, de las disyunciones columnares tiene que ver con las bandas paralelas que se presentan en las caras de las columnas, llamadas estrías, que generalmente son discontinuas y además perpendiculares al eje de las columnas, como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9. A. Columna del afloramiento “Carros de Piedra” (Municipio de Casabianca, Tolima) donde se observa el fenómeno de bandas discontinuas perpendiculares al eje largo de la columna (fotografía de D. Florez, 2017). B. Fenómeno de estriación en basaltos en afloramiento “La Calera” en cercanías al volcán Azufra, Departamento de Nariño (fotografía tomada por J. Sánchez, 2017).

Estas estrías se forman al darse un avance gradual de las fracturas. La distancia entre dos marcas adyacentes corresponde al avance episódico de la grieta hacia el interior del flujo, esto debido a la liberación de tensiones durante el enfriamiento (ver sección 2.3). El crecimiento de las grietas inicia cuando la tensión en el extremo de una grieta primaria, excede la resistencia de la roca a la tracción, generando así el crecimiento de una nueva porción de grieta, que se propaga hasta alcanzar la isoterma correspondiente (Goehring, 2008).

2.4.3 Relación entre el tamaño de estría y la longitud de lado

Algunos estudios sobre el tamaño de estría y la relación entre la separación entre grietas, sugieren que existe una correlación lineal entre estos dos parámetros, y una relación inversa con la velocidad de enfriamiento (DeGraff, y Aydin, 1993). Como se discutió anteriormente, las columnas con mayor diámetro provienen de lavas que se enfriaron lentamente, mientras que las de menor diámetro se forman en lavas que enfrían más rápido, por lo que el tamaño de las estrías varía proporcionalmente al ancho lateral promedio de las columnas (Ryan y Samis, 1978). Para hallar la relación entre tamaños de estría y longitud de lado de polígono, es importante tener en cuenta el tipo de mecanismo de enfriamiento que predomina.

Para un mecanismo puramente difusivo, se debe partir de la solución de la ecuación (2.2), y asumir que las marcas de estrías en las columnas, son las indicaciones del paso o propagación de la grieta, desde una zona de acumulación de tensión térmica inicial a otra de tensión térmica terminal. Además, se asume que estas tensiones están relacionadas con una diferencia de temperatura por medio de la ecuación (Turcotte y Schubert, 2002)

$$\sigma = \frac{\alpha E \Delta T}{(1-\nu)} \quad (2.12)$$

Donde, α es el coeficiente volumétrico de contracción térmica, E el módulo de Young y ν la relación de *Poisson* de la corteza. De acuerdo a lo anterior se puede asumir que el tamaño de estría representa la distancia entre dos isothermas fijas $T = T_{ini}$ y $T = T_{ter}$, asociadas a su vez a σ_{ini} y σ_{ter} . En este sentido Goehring (2008) propuso que esta relación entre las temperaturas inicial, final y el tamaño promedio de estría \bar{S} está dada por:

$$\bar{S} = \left[\frac{\text{erf}^{-1}(U_{term})}{\text{erf}^{-1}(U_{init})} \right] z \quad (2.13)$$

Donde $U = (T - T_0)/(T_1 - T_0)$ y z es la altura de estría.

Por otro lado, para encontrar la relación entre el tamaño de estría y la longitud de lado para un mecanismo de convección asistido por grietas, se parte de la solución invertida de la ecuación (2.9)

$$z'' = \frac{-1}{P_e} \ln \left[\frac{T_0 - T(z'')}{\Delta T} \right] \quad (2.14)$$

Al igual que en el mecanismo puramente difusivo asumimos que las marcas de estría son las indicaciones del paso de la grieta, esto implica que

$$\bar{S} = \frac{z'}{L} = z''(T_{ini}) - z''(T_{ter}) \quad (2.15)$$

Ahora combinando la ecuación 2.14 junto con la 2.15, se obtiene:

$$\frac{\bar{S}}{L} = \frac{1}{P_e} \ln \left(\frac{T_0 - T(z'_{ini})}{T_0 - T(z'_{ter})} \right) \quad (2.16)$$

Donde \bar{L} es la longitud promedio de lado del polígono formado en la columna.

Despejando, la ecuación (2.16) puede describirse en términos del número de Péclet,

$$P_e = \frac{\bar{L}}{\bar{S}} \ln \left(\frac{T_0 - T(z'_{ini})}{T_0 - T(z'_{fin})} \right) \quad (2.17)$$

Bajo la definición de número de Péclet dada en la ecuación (2.6), se puede inferir que la velocidad de la zona convectiva o velocidad de solidificación es inversamente proporcional al tamaño de estría. Para esto se sustituye la ecuación (2.6) en la ecuación (2.17)

$$\frac{vR}{\kappa} = \frac{\bar{L}}{\bar{S}} \ln \left(\frac{T_0 - T(z'_{ini})}{T_0 - T(z'_{fin})} \right) \quad (2.18)$$

Para simplificar la geometría, se puede elegir R como el radio de un cilindro con la misma área de sección transversal que una columna hexagonal con lados iguales de longitud L , con lo cual $R=0,91\bar{L}$, y lo sustituimos en la ecuación (2.18) y despejamos v

$$v = \frac{\kappa}{0,91\bar{S}} \ln \left(\frac{T_0 - T(z'_{ini})}{T_0 - T(z'_{fin})} \right) \quad (2.19)$$

De esta manera se encuentra que la velocidad de la zona convectiva es inversamente proporcional al tamaño de estría

3. Datos

3.1 Datos en campo

Para el análisis de los mecanismos de enfriamiento, orden, y regularidad de las formaciones que presentan el fenómeno de disyunción columnar en los sitios que se visitados en Colombia, se tomaron medidas de longitud de lado, L , diámetro máximo, D_{\max} y mínimo, D_{\min} , de las columnas, también se realizó el conteo de números de lados, N , y de tipos de intersección en las juntas, y se midieron los ángulos internos θ de los polígonos. Cuando se evidenciaron estrías se midió el espaciamiento entre éstas S , además para tres de los sitios (Cristales, Cistale-Negritos y Cristales-Peñon) se tomó una sola muestra de roca para cada uno de los afloramientos, para su posterior análisis químico. Los parámetros geométricos medidos se ilustran en la Figura 3.1. También se realizaron muchas mediciones de cada parámetro geométrico, para determinar estadísticas sólidas de las mediciones.

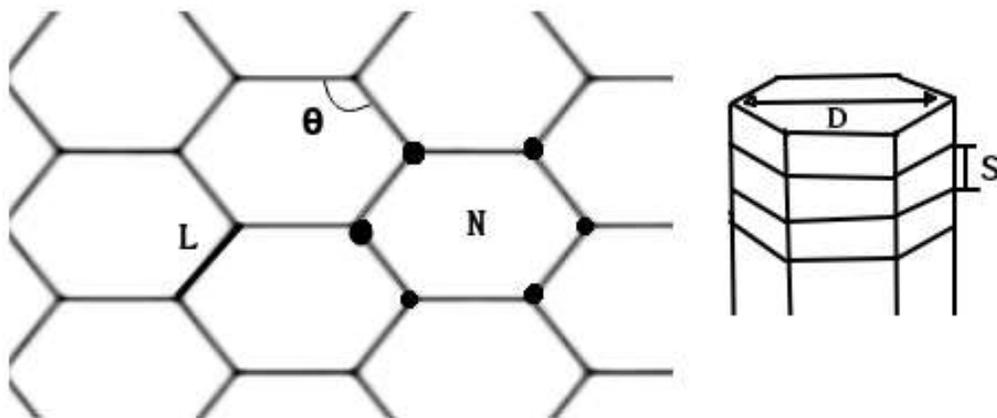


Figura 3.1. Ilustración de las medidas tomadas a las columnas en campo o procesadas por medio de software.

La cantidad de datos estuvo condicionada a factores como la accesibilidad, la erosión, y estado de preservación que presentaban las columnas. En lo relacionado a los datos de espaciamiento entre estrías, estos fueron limitados, ya que el número de caras de columnas que presentaban o evidenciaban el rasgo eran muy pocas, debido al pobre estado de conservación de las columnas, las condiciones ambientales del sitio, y en otros casos, a la acción antrópica. En lo que respecta a los ángulos, en su mayoría se midieron directamente sobre la columna en los casos en que la meteorización no había afectado los vértices. Los demás datos de ángulo se obtuvieron del análisis fotográfico.

3.2 Datos del procesamiento por medio de software

Cuando no se pudo visitar los sitios directamente o cuando no fue posible realizar mediciones directas de los parámetros, se recurrió al procesamiento de las fotografías tomadas en campo, mediante rutinas interactivas (Hetényi et al., 2012) implementadas en MatLab®. Los programas calculan las medidas de las longitudes de los lados de las columnas y estiman el área encerrada por cada polígono trazado. Para esto, se toma como referencia de escala real, un elemento que esté presente en la foto y del cual se conozca la longitud, como se aprecia en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Fotografía de un afloramiento en la cual, un objeto de dimensión conocida (tubo con divisiones decimétricas), es usado para determinar la escala de elementos de la imagen (línea verde creada automáticamente por el programa). Los círculos amarillos son marcas definidas por el usuario para señalar los vértices en los polígonos de las columnas.

Luego de definir la escala, se determinan los vértices de los polígonos directamente sobre la imagen (Figura 3.2). Posteriormente el software realiza la calibración mediante la escala. Después, por medio del teclado, se ingresa el número de vértices establecido, y con esto, el software une estos vértices con líneas rectas, calculando así la longitud de cada lado y el área encerrada por el polígono, como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Polígono trazado (líneas azules) por el software para el cálculo de las longitudes de los lados y del área incluida.

También es posible utilizar el software de Hetényi et al. (2012), para estimar el tamaño de las estrías que se puedan notar en las columnas, como se muestra en la Figura 3.4. Para ello se utiliza la escala y se determina una franja rectangular con cuatro nodos, con esto el software puede calcular la longitud de lado y por lo tanto el tamaño de estría.

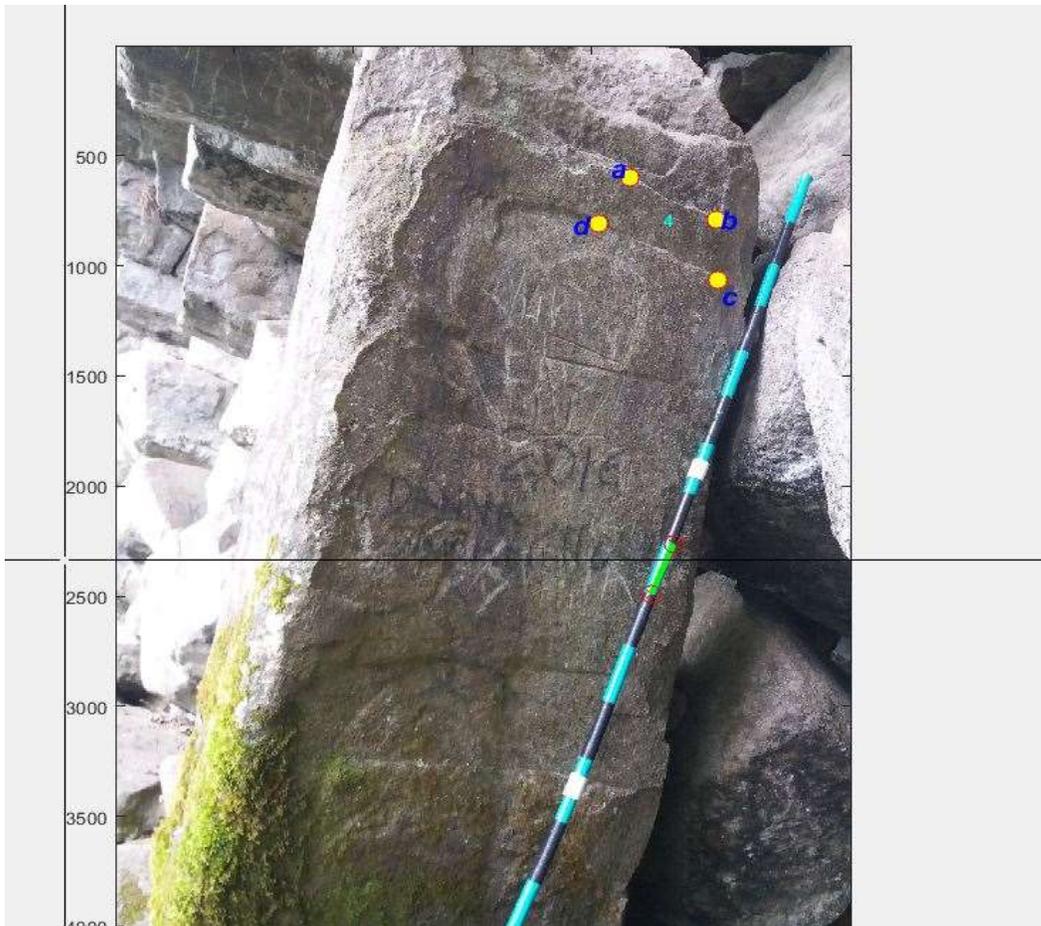


Figura 3.4. Fragmento de columna donde se puede estimar el tamaño de estrías mediante el procesamiento con el *software de Hetényi*.

Por su parte, para la medición de ángulos se utilizó la herramienta de código libre llamada MB-Ruler®. Este programa permitió medir ángulos sobre las imágenes como se muestra la Figura 3.5.



Figura 3.5. Cálculo del Angulo interno sobre una columna mediante la herramienta MB-Ruler®.

3.3 Incertidumbres de los datos tomados en campo

La principal fuente de incertidumbre en las mediciones en campo fue la resolución de los instrumentos de medida, como por ejemplo la regla y el transportador, la cual se estimó alrededor del 1%. También se consideró la incertidumbre proveniente de la repetición de las mediciones, y como resultado se obtuvo que el aporte es menor del 0,1%, y por consiguiente, se despreció para los cálculos finales.

3.3.1 Incertidumbres de los datos obtenidos del procesamiento de fotografías por medio del software

Para este caso, se tuvieron en cuenta los datos sobre incertidumbre reportados por Hetényi et al (2012), relacionados con la utilización del software. Los autores reportaron que cuando las fotografías fueron tomadas perpendiculares al patrón poligonal, la incertidumbre asociada sería del 0,4%. De otra manera, cuando se evidenciaba una desviación desde la perpendicular, la incertidumbre podría ser de 1,5 %. De igual forma, en lo que respecta a la longitud media del ancho de las columnas, se asumió la incertidumbre de 3,8%, y para las medidas de área, de 3,4%.

3.4 Descripción de los afloramientos

En los afloramientos Ataúdes, Cristales, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón, la mayoría de mediciones se obtuvieron directamente en campo. Mientras que para los afloramientos Carros de Piedra, Domo Victoria, Domo Sancancio, y *Basalt Cay*, los datos se obtuvieron del procesamiento de fotografías mediante el software descrito en la sección 3.2.

En el anexo A en la tabla A1, se muestran los datos geoquímicos de las muestras de los afloramientos Cristales, Cristales-Negritos, Cristales-Peñón, Ataúdes, La Calera, Carros de Piedra, además se incorporaron datos de muestras de sitios cercanos a Casabiaca (Tolima) de (Martínez et al,2014)), esto con el fin de complementar los datos de composición química.

3.4.1 Afloramientos: Cristales, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.

En estos sitios se realizaron mediciones directas y también se obtuvieron datos por medio del procesamiento de las fotos en el software. Los tres afloramientos de corte de carretera que presentan disyunción columnar, se encuentran en la zona conocida como vereda la Honda, que se ubica aproximadamente a 6 km al SW de la cabecera municipal del Líbano (Tolima), en la vía que conduce hacia la vereda Santa Teresita, la ubicación del sitio se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Mapa regional de la zona donde se localizaron tres afloramientos de interés. Tomado y modificado de *Google Earth Pro*, 2021.

Los afloramientos están formados por el conjunto de lavas pertenecientes al período Pre-Ruiz que comprende el rango de edad $0,97 \pm 0,05$ Ma hasta $1,8 \pm 0,1$ Ma (Martínez et al., 2014), Figura 3.7

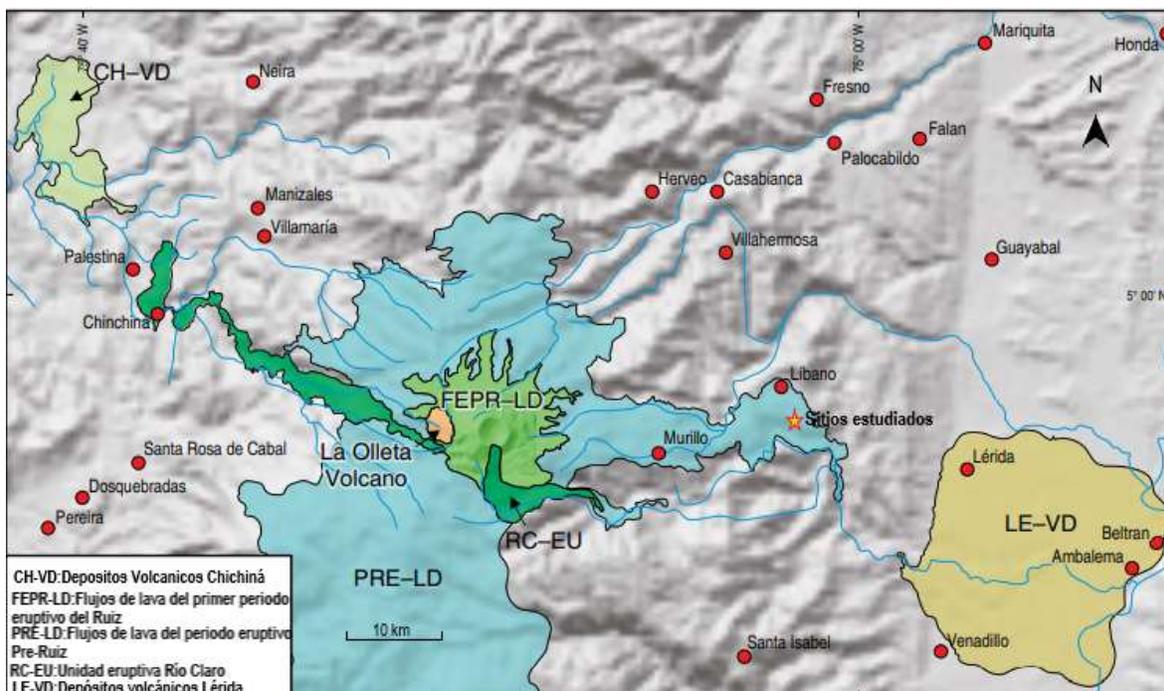


Figura 3.7. Mapa geológico de la zona donde se encontraron los afloramientos estudiados (Martínez et al., 2014).

El primero de ellos se denominó informalmente en este trabajo “Cristales-Negritos”, cuyas coordenadas son: 4.8°N , -75.1°W , y altitud 1,203 m.s.n.m. Este afloramiento tiene una extensión de 10 metros de ancho y aproximadamente 20 metros de alto; está conformado por aproximadamente 40 columnas, las cuales están orientadas verticalmente.

Dadas las condiciones de difícil acceso al afloramiento, se usaron cantos rodados para las mediciones. En los fragmentos de columnas, se pudo observar que la gran mayoría de las secciones transversales eran de forma poligonal tipo hexágono. También se pudo evidenciar que presentan efectos de la meteorización. Además, se midieron los ángulos internos de las columnas y se recuperó una muestra del afloramiento, la cual a simple vista presenta variedad mineralógica y de tamaños de cristales y un color gris claro en su superficie, en el anexo B se describe la petrografía de la muestra. En la Figura 3.8 se muestran algunas fotografías tomadas del sitio.



Figura 3.8. Mosaico con fragmentos de algunas columnas en el primer afloramiento denominado “Cristales- Negritos”.

Un segundo afloramiento, denominado “Cristales”, se encuentra dentro de la Reserva Agroecológica Santa Librada, sus coordenadas son: $4,8^{\circ}\text{N}$, $-75,0^{\circ}\text{W}$ y altura 1.024 m.s.n.m. La exposición de roca allí tiene un ancho de 13 m y altura aproximada de 6 m, incluye aproximadamente 170 columnas, las cuales están inclinadas 80° respecto a la horizontal. En este afloramiento fue posible la medición de lados de columnas con mejor precisión, ya que presentaba menos meteorización en comparación con el afloramiento Cristales-Negritos. En lo concerniente a los ángulos internos, se midieron en forma directa sobre las columnas *in situ*. También se observaron vestigios de estrías en las columnas, los cuales facilitaron la medición de tamaños. Se recuperó también una muestra que presentaba características texturales similares a la del afloramiento Cristales-Negritos, anexo B. Las fotografías del afloramiento Cristales se muestran la Figura 3.9.



Figura 3.9. Fotografía del afloramiento llamado “Cristales”.

Un tercer afloramiento se denominó “Cristales-Peñón”, y también se encuentra dentro de la reserva Santa Librada, presentando una extensión aproximada de 50 m de ancho y 75 m de alto, con un posible margen de flujo que delimitaba parte del afloramiento. El sitio se encuentra en las coordenadas: 4,8°N, -75,01°W y altura 1.142 m.s.n.m. Allí se observaron columnas verticales cuyos lados miden entre 0,53 y 1,01 m, siendo poco regulares en diámetro. De la misma forma, se observaron rasgos de estrías, que se midieron en la base del afloramiento. Las características texturales macroscópicas de la roca fueron similares a las de los otros dos afloramientos, anexo B. Las fotografías del afloramiento Cristales-Peñón se muestran en la Figura 3.10

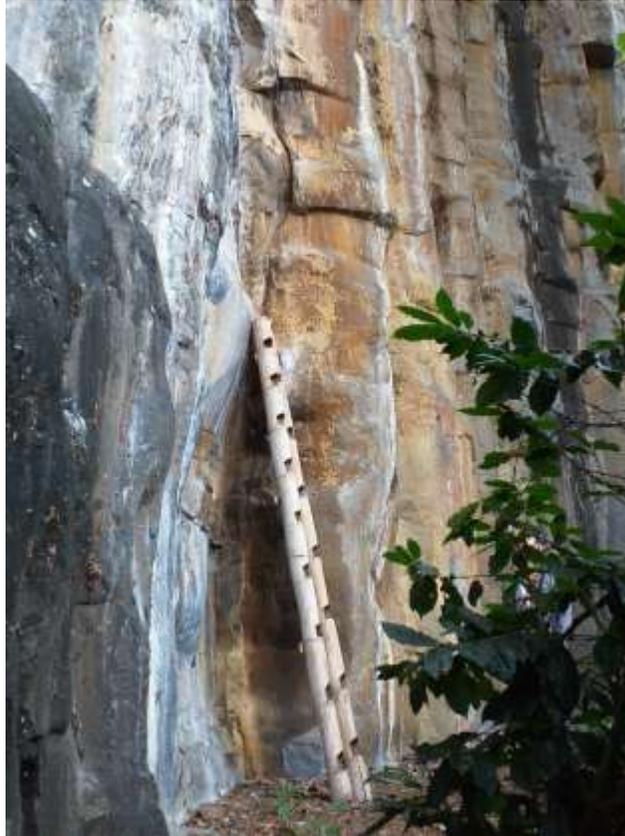


Figura 3.10. Fotografía del Afloramiento número 3, llamado Cristales-Peñón, dentro de la reserva Agroecológica Santa Librada. Tamaño de la escalera de tres metros.

3.4.2 Afloramiento Ataúdes

Este afloramiento se ubica en la zona rural del municipio de Vijes (Valle del Cauca) a 2.5 km de la cabecera municipal, sobre la vía que conduce a la vereda La Carbonera. Según la Figura 3.11, el afloramiento está compuesto por lavas basálticas almohadilladas y diabasas.

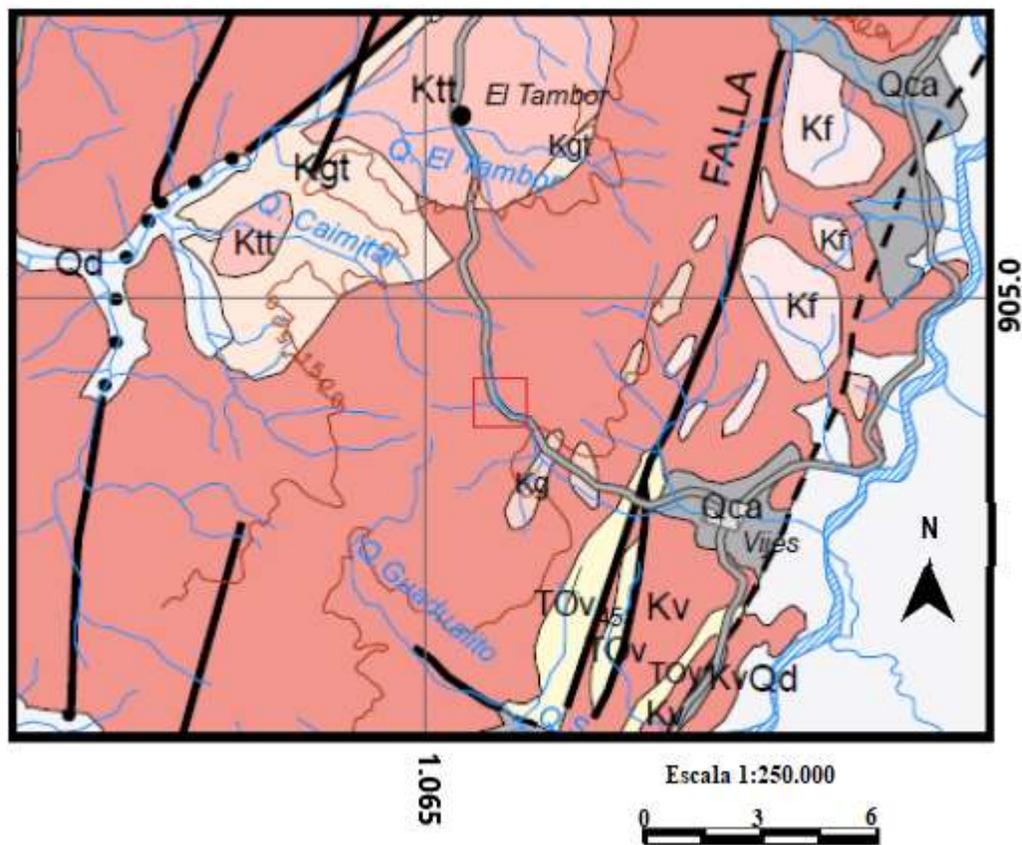


Figura 3.11. Mapa geológico de la zona donde se localiza el afloramiento los Ataúdes. Nota. Tomado y modificado de la plancha geológica 280-Palmira INGEOMINAS (Sepúlveda, 2009).

En este afloramiento, que tiene 25 m de ancho y 18 m de alto, se observa meteorización notoria, lo que limitó el número de medidas de espaciamiento entre estrías (DeGraff y Aydin, 1987). Se observaron aproximadamente 150 columnas. Las muestras tomadas presentan un color gris oscuro. En la Figura 3.12 se muestra una fotografía del sitio.



Figura 3.12. Fotografía del afloramiento “Ataúdes”, cerca de la cabecera municipal de Vijes.

Los datos de los afloramientos Carros de Piedra, Domo Victoria, Domo Sancancio, y *Basalt Cay*, se obtuvieron del procesamiento de fotografías mediante el software descrito en la sección 3.2.

3.4.3 Afloramiento Carros de Piedra

Este sitio, localizado cerca de la vía que conecta los municipios de Herveo y Casabianca (Tolima), pertenece a la unidad denominada Tqa, clasificada como lavas predominantemente andesíticas con hipersteno y augita, con edades entre el Neógeno e inicios de Cuaternario (Barrero y Vesga, 2010). La composición química se relaciona en la tabla A1 del anexo A.

3.4.4 Afloramientos Domo Victoria y Domo Sancancio

El Domo Victoria está ubicado cerca de la vía alterna al Volcán Nevado del Ruiz, y el sitio el Domo Sancancio está ubicado dentro del área urbana del municipio de Manizales. La geología de los dos domos se ubica dentro de la unidad NgQa, clasificada como flujo andesítico–dacítico del Mioceno - Plioceno (Gonzales,2001) .

3.4.5 Afloramiento *Basalt Cay*

El sitio está ubicado a 1.5 km de la isla de Santa Catalina (San Andrés, Providencia y santa Catalina), el sitio está compuesto por Dacitas, conformadas por cristales de cuarzo (15 %), plagioclasa (15 %), anfíbol (55 %) y otros minerales (15 %), cuyo tamaño varía entre 1 y 5 mm. A escala de afloramiento esta unidad litológica se aprecia estratificada, con capas paralelas entre sí (Builes et al,2014).

3.4.6 Afloramiento La Calera

Este sitio está ubicado cerca al cráter del volcán Azufral. Según (Gonzales et al., 2002) la geología del sitio se ubica dentro de la unidad Q2dp, clasificada como depósitos piroclásticos.

4. Resultados

En este capítulo se realiza una descripción cualitativa y cuantitativa de las columnas de los afloramientos en los cuales fue posible obtener datos de los parámetros geométricos como longitud de lado, área encerrada por los polígonos, ángulos internos y tamaño de estría, por medio de mediciones directas en campo o a través del procesamiento computacional, con estos datos se realiza un análisis estadístico que permite estimar el grado de madurez de los patrones poligonales, así como su regularidad y homogeneidad. Además, se presenta la relación entre tamaño de estría y longitud de lado, de las disyunciones columnares estudiadas y se compara con otros lugares alrededor del mundo que han sido publicados por otros autores. En el capítulo 5 de acuerdo con los resultados de este capítulo se clasifican los sitios en facies tipo columnata y facies entabladura.

4.1 Descripción cualitativa de las columnas de los afloramientos estudiados

De las observaciones hechas en campo o mediante el análisis de fotografías de las columnas presentes en los afloramientos y siguiendo la clasificación descrita en la sección 2.2, se mencionan las características cualitativas de las columnas de las disyunciones columnares en Colombia.

4.1.1 Afloramiento Cristales

Las columnas de este afloramiento, paralelas entre sí, se encuentran inclinadas $\sim 80^\circ$ con respecto a la base del terreno, conservando esta orientación a lo largo de toda la exposición visible. En lo que respecta a los tamaños de estrías que se midieron, se observó que son aproximadamente constantes en toda la columna. Por otra parte, se corroboró que la mayoría de los polígonos que se formaron presentan seis lados.



Figura 4.1. Afloramiento Cristales, donde se evidencia que las columnas son paralelas entre sí, tienen la misma orientación, y tendencia hexagonal.

4.1.2 Afloramiento Cristales-Negritos

En este sitio, las columnas estaban orientadas verticalmente. Se pudo observar que las columnas del afloramiento se organizan de forma paralela entre sí y mantienen esta disposición a lo largo de todo el afloramiento, como se muestra en la Figura 4.2. En lo que tiene que ver con las estrías, se observó que el tamaño de estas, era aproximadamente constante en todas las columnas donde fue hallado el rasgo.



Figura 4.2. Afloramiento Cristales-Negritos, donde se evidencia que las columnas son paralelas entre si y tienen la misma disposición.

4.1.3 Afloramiento Cristales-Peñón

En este sitio se encontró que las columnas son paralelas entre sí, y que están orientadas en el mismo sentido. Además, se evidenció la presencia de estrías, cuyo tamaño en principio, aumentaba respecto a la base, sin embargo, a tres metros de la base aproximadamente, estos tamaños se regularizaban, como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Afloramiento Cristales-Peñón, donde se evidencia que las columnas son paralelas entre si y tienen la misma orientación. Las estrías exhiben variación localizada en tamaño desde la base.

4.1.4 Afloramiento Ataúdes

En este afloramiento las columnas presentan homogeneidad en sus tamaños, además están inclinadas aproximadamente en un ángulo de 40° respecto a la horizontal, también se observó que son paralelas entre si y preservan la orientación en toda su exposición. Así mismo se pueden rastrear columnas individuales como se evidencia en la Figura 4.4.



Figura 4.4. Afloramiento Ataúdes, donde se evidencia que las columnas son paralelas entre sí y se pueden rastrear columnas individualmente.

4.1.5 Afloramiento Domo Victoria

En este afloramiento se realizó el análisis cualitativo mediante las fotografías de campo como la mostrada en la Figura 4.5, donde se puede observar que las columnas tienden a preservar su tamaño alrededor de toda la columna, y sus orientaciones parecen ser uniformes. Además, los vestigios de estría que se estimaron mediante el procesamiento en el software son constantes en la cara de la columna en la que se encontraron.



Figura 4.5. Afloramiento Domo Victoria, este presenta columnas paralelas entre sí que se orientan en una misma dirección.

4.1.6 Afloramiento La Calera

En el afloramiento La Calera, reportado por Flórez (2017), se presentan dos facies que pueden ser claramente distinguidas como se muestra en la Figura 4.6, en el nivel inferior hay presencia de columnas de mayor anchura que las del nivel superior, en este último, se presenta una zona donde las columnas se doblan y pierden el ordenamiento. Los patrones poligonales no están bien desarrollados, ya que prevalecen las columnas de cuatro lados como lo reporta Flórez (2017).



Figura 4.6. Afloramiento La Calera con división de dos facies. (Foto: J. Sánchez, 2017)

También se registran estrías bien preservadas, al parecer en las dos facies. En la Figura 4.7 se muestran estrías de la facies inferior del afloramiento, donde se aprecia variación en los tamaños e irregularidad.



Figura 4.7. A. Evidencia de estriamiento en facies inferior del afloramiento La Calera B. Resaltado del estriamiento (Foto: J. Sánchez, 2017).

El patrón poligonal predominante, que se puede deducir del análisis fotográfico, corresponde a cuadriláteros como se ve en la Figura 4.8.



Figura 4.8 Fotografía de las columnas del nivel inferior. Fotos: J. Sánchez, 2017.

4.1.7 Afloramiento *Basalt Cay*

En este afloramiento, se encuentran una serie de columnas cuyos ejes están inclinados $\sim 60^\circ$, como se observa en la figura 4.9, sus columnas son paralelas entre sí, y orientadas en un mismo sentido. De la foto se aprecian bien definidos vestigios de estriación.



Figura 4.9. Afloramiento *Basalt Cay*, donde se muestran columnas paralelas entre sí, con evidencia de estriamiento, de tamaño aproximadamente constante en cada columna (foto de Builes et. al., 2014).

4.1.8 Afloramiento Carros de Piedra

En este afloramiento, según reporta Flórez (2017), las columnas presentan una inclinación de casi 90° . En el análisis fotográfico se puede evidenciar que sus columnas preservan una misma orientación, no se bifurcan y muestran una tendencia hexagonal, como se muestra en la Figura 4.10. Las columnas conservan evidencias de estrías cuyo tamaño se aprecia aproximadamente constante en toda la cara expuesta de la columna.



Figura 4.10. Afloramiento Carros de Piedra, donde se muestran columnas paralelas entre sí, con tendencia hexagonal en los polígonos formados. Tomado de Flórez (2017).

4.2 Madurez de los patrones de disyunciones columnares en algunos afloramientos en Colombia

Con los datos tomados directamente en campo o derivados del análisis de imágenes, se calcularon los parámetros: el lado promedio \bar{n} , con la ecuación (2.11), e índice de hexagonalidad χ_N , mediante la ecuación (2.12). Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Afloramiento	\bar{n}	χ_N
Ataúdes	5,4	0,92
Carros de Piedra	5,3	1,04
Domo Victoria	5,4	1,33
Basalt Cay	5,6	0,80
Cristales	5,6	0,71
Cristales-Negritos	5,5	0,93
Cristales-Peñón	4,2	1,6

Tabla 4.1. Promedios calculados para los parámetros número de lado e índice de hexagonalidad de los afloramientos registrados en Colombia.

Para mejor lectura de los datos de los sitios mencionados en la tabla 4.1, se construyeron gráficos de barras del número de lados que presentaban los polígonos formados por las columnas, como se muestra en la Figura 4.11.

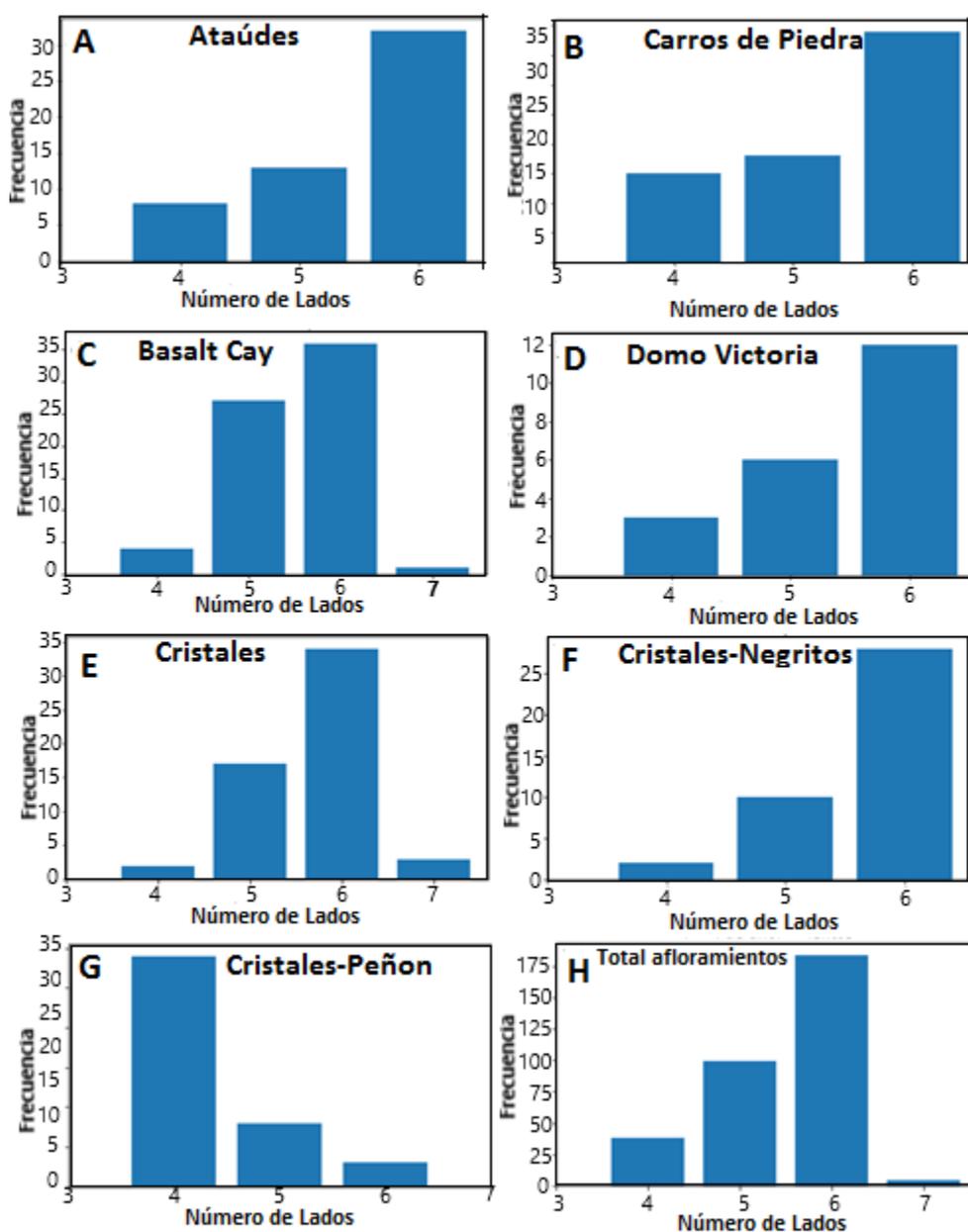


Figura 4.11. Diagrama de frecuencia de numero de lados para cada unidad donde se obtuvieron mediciones. **A:** Ataúdes; **B:** Carros de piedra; **C:** *Basalt Cay*; **D:** Domo Victoria; **E:** Cristales; **F:** Cristales-Negritos; **G:** Cristales-Peñón; **H:** Diagrama de barras compuesto por los datos de los siete afloramientos.

4.2.1 Homogeneidad de tamaños y regularidad de los patrones de disyunción columnar en algunos sitios de Colombia

Para estimar el grado de homogeneidad entre los tamaños y la regularidad de los polígonos que forman las columnas, se calcularon tres parámetros, los cuales son: las variaciones relativas de las mediciones del área promedio, σ_A/\bar{A} , longitud promedio de los lados, σ_L/\bar{L} , y ángulos internos de los polígonos, $\sigma_\theta/\bar{\theta}$. Estos se calculan mediante la relación entre la desviación estándar y el promedio de las mediciones. Los resultados del cálculo de estos parámetros; usando tanto datos obtenidos en esta tesis, como aportados por estudios previos; para los afloramientos estudiados en Colombia se muestran en la tabla 4.2.

Afloramiento	Área promedio $\bar{A} \pm 5\%$ (cm ²)	Desviación estándar σ_A $\pm 1\%$	Variación relativa σ_A/\bar{A} $\pm 2\%$	\bar{L} Longitud promedio $\bar{L} \pm 5\%$ (cm)	Desviación estándar $\sigma_L \pm 1\%$	Variación Relativa $\sigma_L/\bar{L} \pm 3\%$	Angulo promedio $\bar{\theta} \pm 1^\circ$	Desviación estándar σ_θ $\pm 1\%$	Variación Relativa $\sigma_\theta/\bar{\theta} \pm 3\%$
Ataúdes	1309,3	170,8	0,13	20,3	6,3	0,31	110,4	12,1	0,11
Cristales	1263,2	859	0,73	21,6	10,6	0,49	124,8	14,9	0,12
Domo Victoria	794,5	82,8	0,10	16,7	6,7	0,40	109,5	17,9	0,16
Carros de Piedra	3270,5	1758,1	0,54	31,6	14,0	0,44	122,5	15,9	0,13
Basalt Cay	2164,0	251,5	0,11	49,5	23,8	0,48	118,4	14,9	0,12
Alto Topacio*	-	-	-	35,0	7,0	0,20	-	-	-
Alto la Llorona*	-	-	-	110	29,7	0,27	-	-	-
El Sifón*	-	-	-	220	68,2	0,31	-	-	-
Alto Ventanas*	-	-	-	150	30,0	0,2	-	-	-
Cristales-Negritos	2130	1030	0,48	43,5	15,2	0,35	117,5	17,6	0,15
Cristales-Peñon	5321,1	3671,1	0,69	76,8	35,3	0,46	97,9	31,3	0,32

Tabla 4.2. Variaciones relativas de área, longitud y ángulos internos para los polígonos que forman las columnas en múltiples sitios en Colombia. *Datos de Rave (2019).

4.2.2 Variaciones de tamaño de las áreas transversales de las columnas

Para determinar si existe alguna relación entre la variación relativa del área y la madurez para los afloramientos estudiados en Colombia, en primer lugar, se graficó la variación relativa del área versus el índice de hexagonalidad, como se muestra en la Figura 4.12.

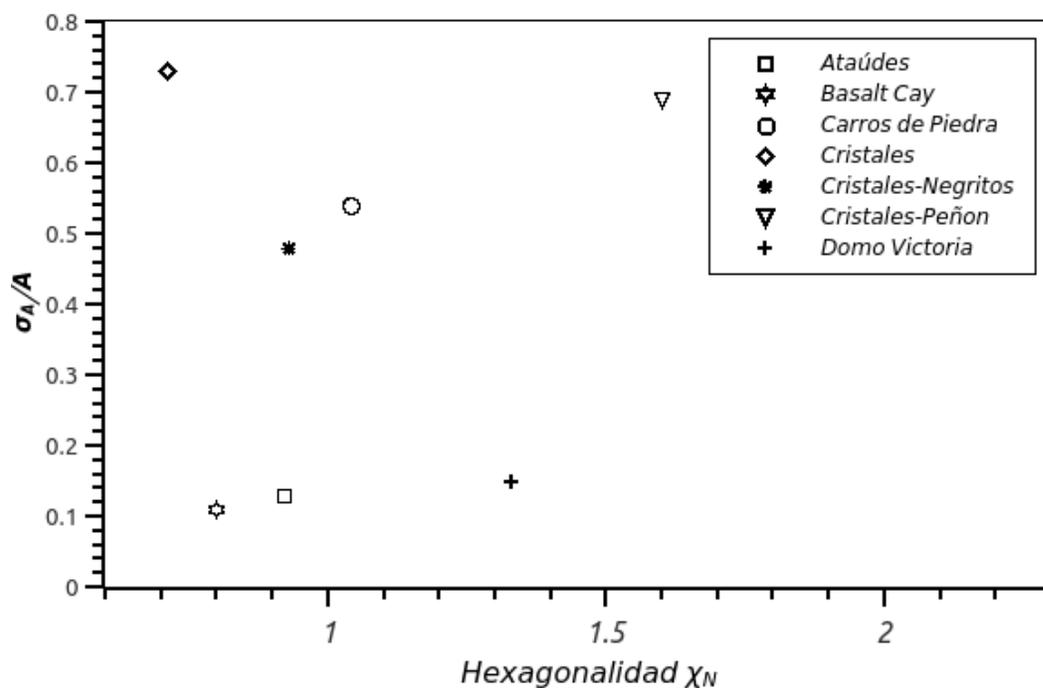


Figura 4.12. Variación relativa del área versus hexagonalidad de las columnas de los afloramientos Ataúdes, Cristales, Domo victoria, Carros de Piedra, *Basalt Cay*, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.

4.2.3 Regularidad y orden de los patrones poligonales

Con el fin de visualizar la relación entre regularidad y madurez para las columnas estudiadas en Colombia, en primera instancia se graficó la variación relativa de los promedios de las

longitudes de lado versus el índice de hexagonalidad, de los afloramientos tipo columnata identificados en la sección 4.1, como lo muestra la figura 4.13.

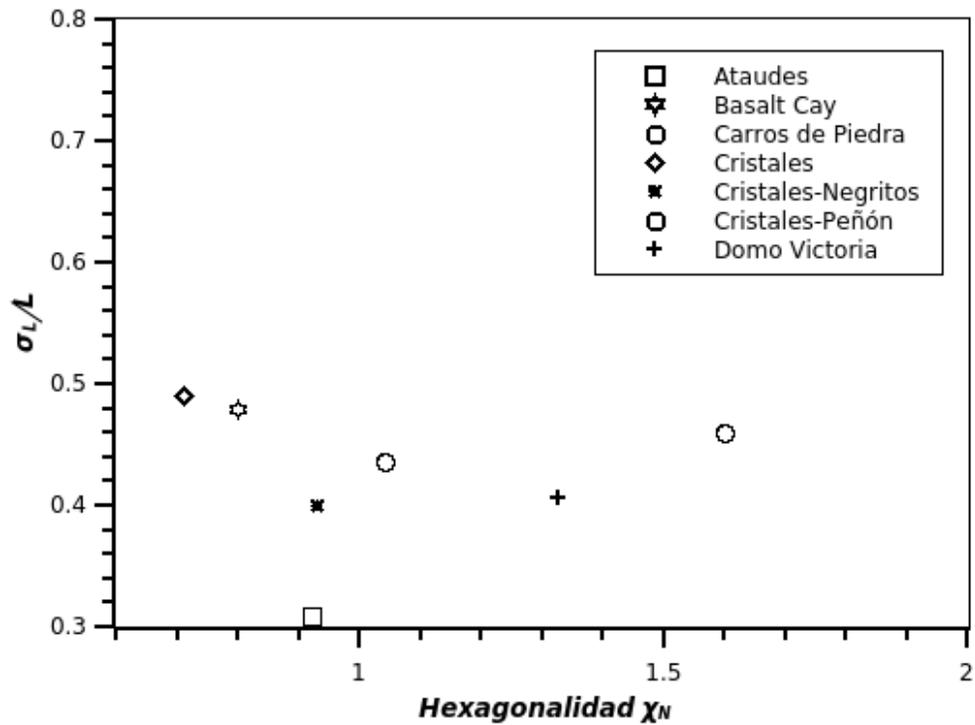


Figura 4.13 Variación relativa del promedio de longitudes de lado de las columnas versus índice de hexagonalidad de los afloramientos Ataudes, Cristales, Domo victoria, Carros de Piedra y *Basalt Cay*, Cristales-Negritos, Cristales-Peñón.

Para complementar el análisis sobre la regularidad asociada a la longitud de lado de las columnas, también se realizó una gráfica de las variaciones relativas de los promedios de longitudes versus el número promedio de lados, para los afloramientos en Colombia junto con datos registrados en otras partes del mundo como se muestra en la Figura 4.14.

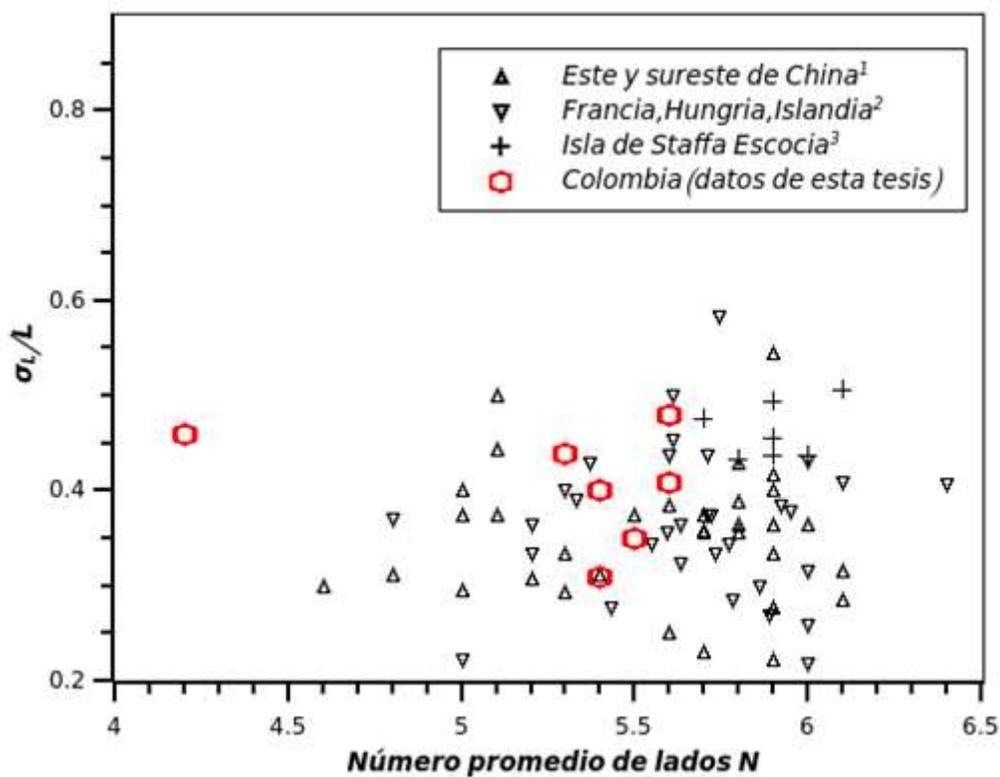


Figura 4.14. Variación relativa longitud de lado de las columnas versus número promedio de lados de los afloramientos estudiados en Colombia. [1].(Li y Liu, 2020); [2]. (Hétengy et al.,2012);[3]. (Phillips et al., 2013).

En la Figura 4.15 se visualiza la relación entre los ángulos internos de las columnas y los índices de hexagonalidad, para los afloramientos estudiados en Colombia.

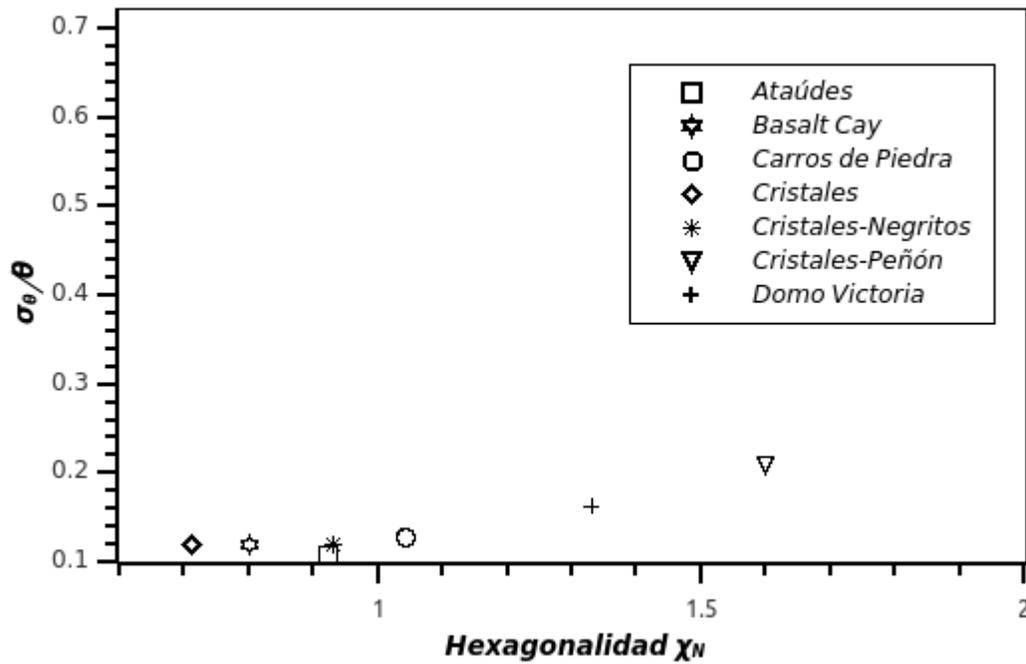


Figura 4.15 Variación relativa del ángulo interno de las columnas versus índice de hexagonalidad para los afloramientos: Ataúdes, Cristales, Domo victoria, Carros de Piedra, *Basalt Cay*, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.

También se realizó la comparación de los datos de variaciones relativas de los promedios de los ángulos versus hexagonalidad para Colombia y otras partes del mundo, como se muestra en la figura 4.16.

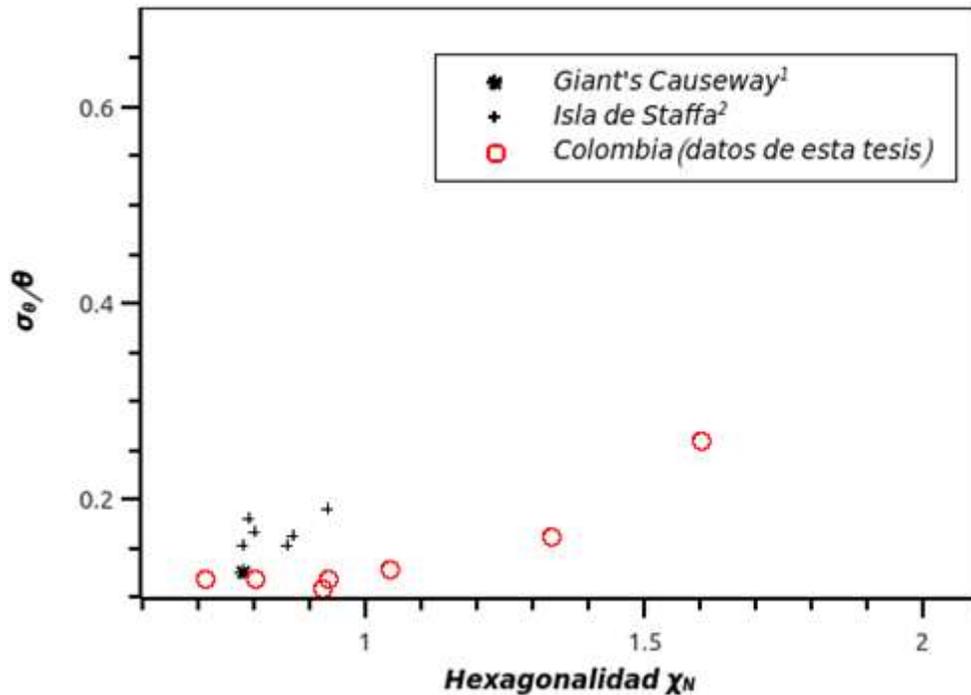


Figura 4.16. Variación relativa del ángulo interno de las columnas versus índice de hexagonalidad de los afloramientos estudiados en Colombia, [1]. Calzada del Gigante; [2]. Isla de Staffa (Phillips et al., 2013).

4.2.4 Variación del área transversal en función de la longitud de lado

Para ver el comportamiento de la variación del promedio del área transversal en función de la longitud de lado se graficaron los datos de los afloramientos estudiados en Colombia, junto con los datos de las disyunciones columnares, encontrados en Francia, Hungría, Islandia (Hetényi et al., 2012), Isla de Staffa en Escocia (Phillips et al., 2013), y del Este y Suroeste de China (Li y Liu, 2020), estos a su vez se compararon frente a las parábolas teóricas dadas por:

$$A = \frac{N}{4} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{N}\right) L^2$$

Donde N es el número de lados. Para la gráfica se tomaron $N=5$, $N=5.5$ y $N=6$. La gráfica se presenta en la figura 4.14.

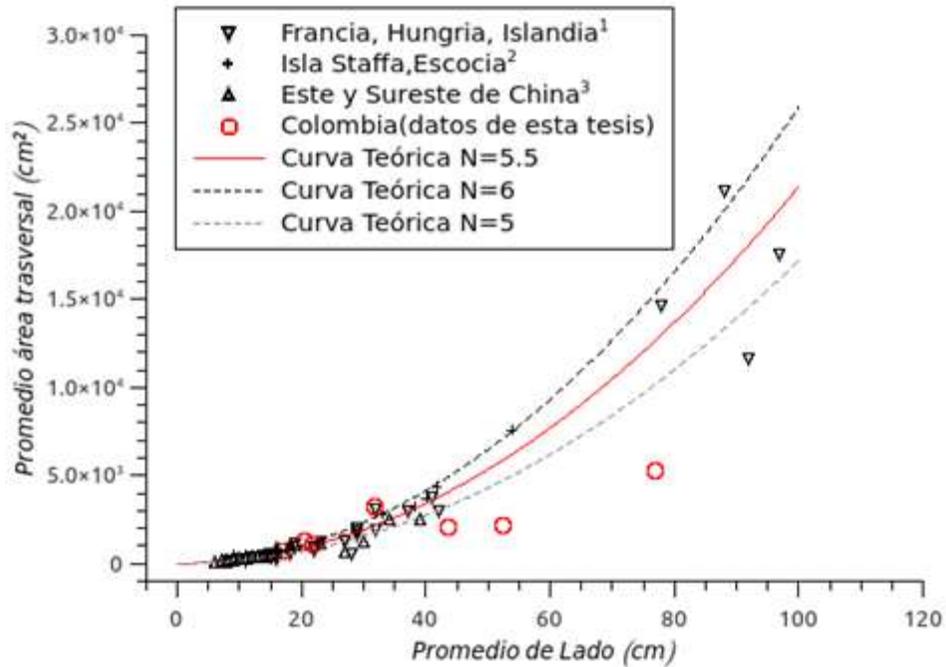


Figura 4.17. Promedio de área de sección transversal versus promedio de longitud de lado para datos publicados por [1]. Héteny et al. (2012); [2]. Phillips et al. (2013); [3]. (Li y Liu, 2020) y datos Colombia.

4.3 Tamaño de estría (E) versus longitud de lado (L)

Para estudiar la relación existente entre los tamaños de estría (alturas de estría) y la longitud de lado de la cara de la columna, donde aparece la estría, se determinó en primer lugar la relación de los promedios entre estos dos parámetros, para cada uno los afloramientos que se muestra en la tabla 4.4. Esto se realizó para los sitios en los cuales es razonable asociar el mecanismo de enfriamiento asistido por grietas. Esto debido a que los rasgos descritos en la

sección 4.1 hacen presumir que dichos afloramientos se pueden clasificar como facies tipo columnata, y que adicionalmente las mediciones realizadas de tamaño de estría resultaron ser constantes a lo largo de las columnas. De esta manera, el valor promedio calculado de los sitios es de aproximadamente de $\eta = 0,15$ con una desviación estándar $\sigma = 0,02$.

Afloramiento con facies columnata	$\eta = \frac{\bar{S}}{\bar{L}}$
Ataúdes	0,15
Domo Victoria	0,18
Carros de Piedra	0,14
Cristales	0,13
<i>Basalt Cay</i>	0,13
Cristales-Negritos	0,11
Cristales-Peñón	0,19

Tabla 4.4. Relación entre los promedios de alturas de estría (\bar{S}) y longitud de lado (\bar{L}), para cada sitio donde se observó la facies tipo columnata.

En segundo lugar, se graficaron las alturas de estría (S) versus las longitudes de los lados (L) de los afloramientos de los cuales se obtuvieron varias mediciones como se muestra en la Figura 4.18.

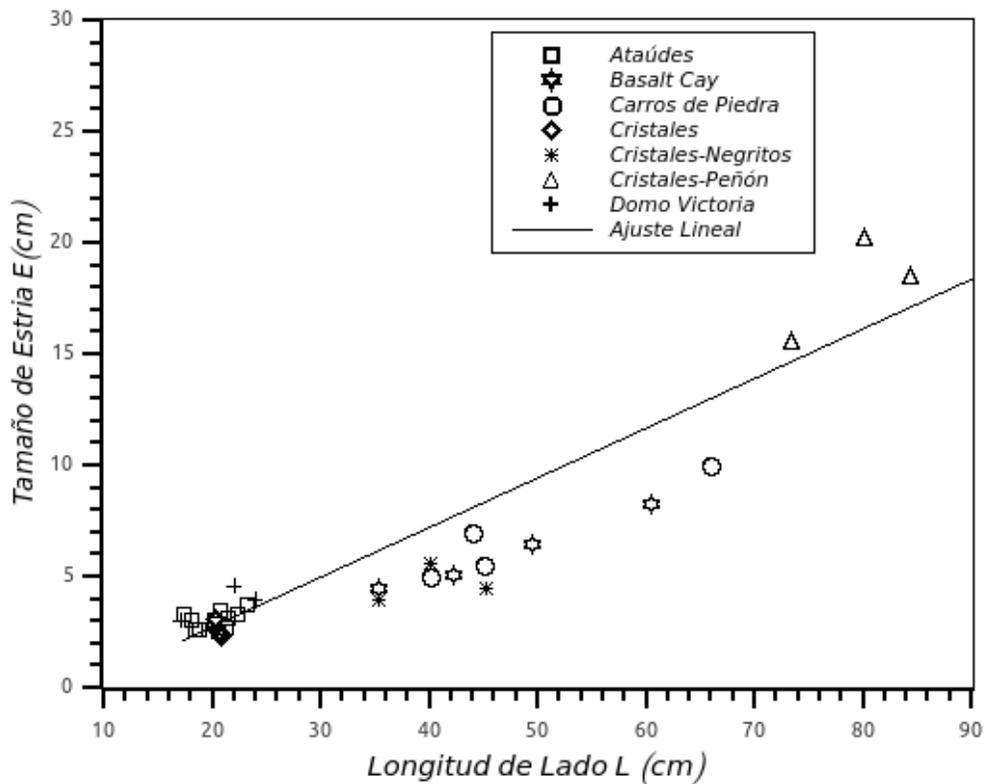


Figura 4.18. Grafica de altura de estría, E , vs. Longitud de lado, L , para los afloramientos con disyunción columnar en Colombia en los cuales fue posible identificar la facies tipo columnata.

A modo de comparación, se graficaron los datos de altura estría y ancho de cara de columna de las unidades en Colombia, junto con los datos de otros afloramientos a nivel mundial: los flujos de lava basáltica del Rio Columbia en Estados Unidos, registrados por Grossenbach y McDuffie (1995) y Goehring (2008); los datos de la Isla de Staffa, reportados por Phillips et al. (2013); y por último los datos de los flujos de lava del Kilauea reportados por Ryan y Samis (1981); como se muestra en la Figura 4.19.

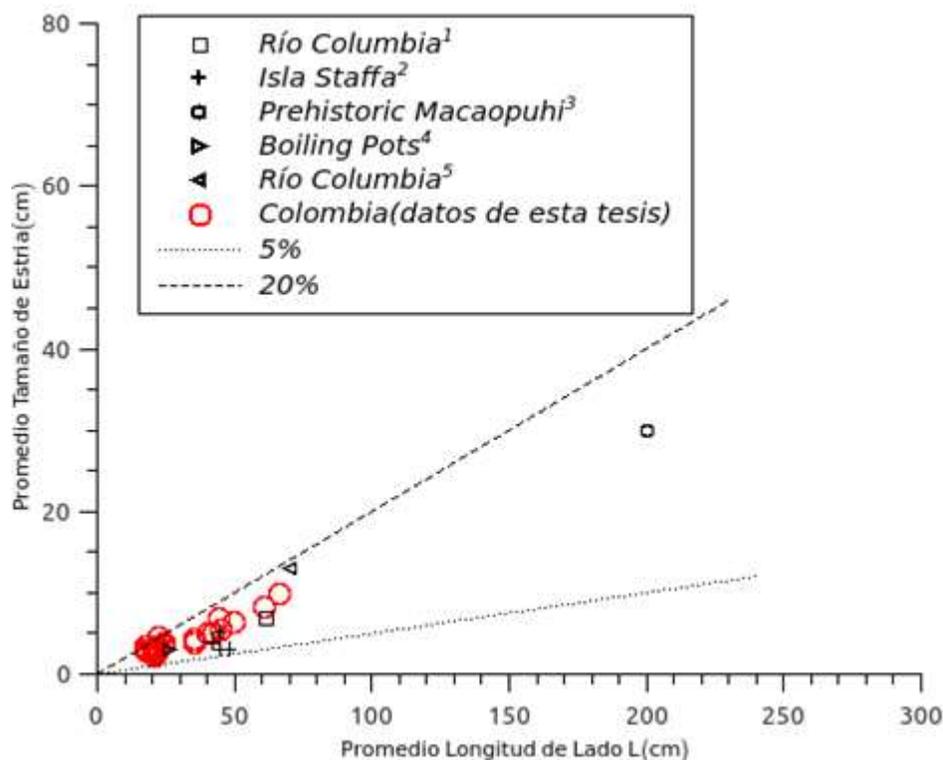


Figura 4.19. Gráfica de altura promedio de estrías versus longitud promedio de lado de columna: [1].(Goehring, 2008); [2][3][4][5].Phillips et al. (2013). La línea correspondiente a 5% representa la relación $\bar{S} = 0,05L$ y 20% la relación $\bar{S} = 0,2\bar{L}$.

4.4 Composición química

Los análisis químicos de roca total fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá para los afloramientos Cristales, Cristales-peñon y Cristales-Negritos de los cuales se tomó una muestra en cada afloramiento. El reporte con los porcentajes de óxidos mayores fue utilizado para obtener una clasificación, usando el diagrama de variación tipo TAS (Total Alkalis vs. Silica, Le Bas et al., 1986), también se adicionaron datos geoquímicos de muestras cercas al municipio de Casabianca (Tolima) tomadas por Martínez et al(2014), como se muestra en la Figura 4.20.

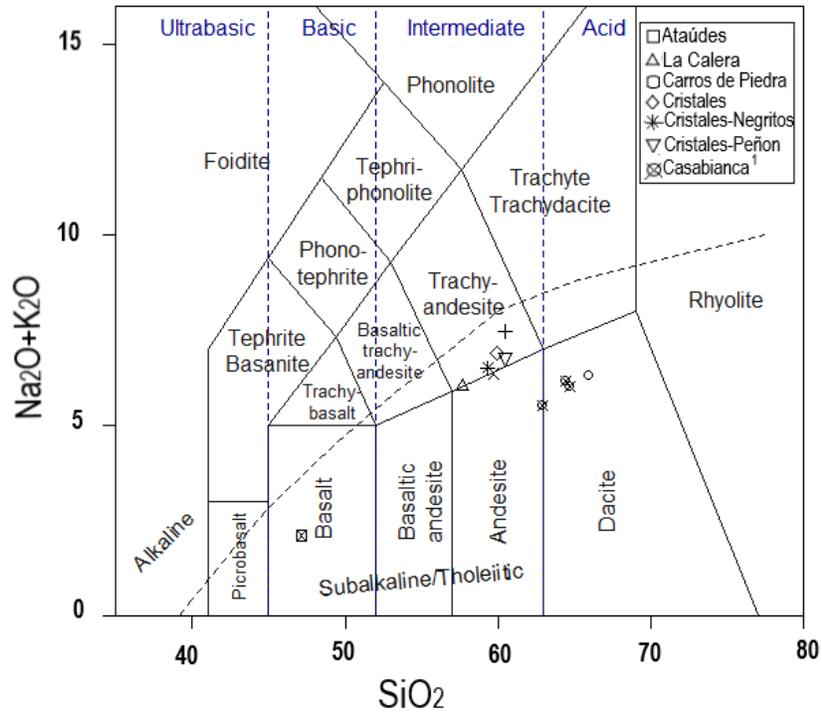


Figura 4.20. Diagrama de variación tipo TAS para las rocas de los afloramientos estudiados que presentan disyunción columnar.

Por último, se produjo un gráfico de promedio de longitud de lado vs. el contenido de SiO_2 (Figura 4.22) utilizando los datos de esta tesis en conjunto con aquellos de Francia, Hungría, Islandia (Hetény et al., 2012), el Monte Mudeung (Lim et al., 2015).

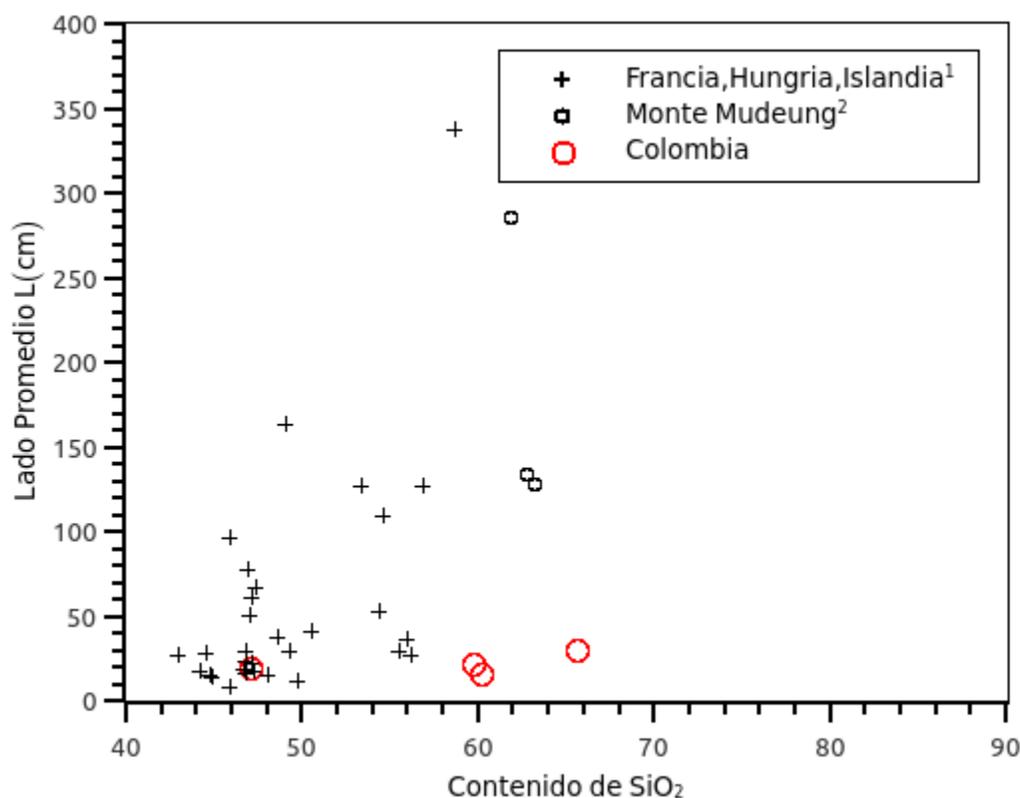


Figura 4.21. Grafica de lado promedio versus contenido de SiO₂ de los afloramientos estudiados en Colombia. [1]. Héteny et al, (2012). [2]. Lim et al. (2015).

4.5 Estimación de los números de Péclet para los afloramientos tipo columnata en algunos afloramientos en Colombia

A partir del estudio de las alturas de estría del grupo de basaltos del Río Columbia-CRBG (por su nombre en inglés) en Estados Unidos, Goehring (2008), dedujo las temperaturas de iniciación y de terminación de grieta. Este resultado del análisis térmico puede ser aplicable a una amplia gama de lavas como lo afirma el mismo Goehring. Teniendo en cuenta lo anterior, es razonable utilizar estos valores de temperatura de iniciación y terminación de grieta, para encontrar los valores del número de Péclet de las disyunciones columnares estudiadas en Colombia. Para ello usó la ecuación 2.17, junto con los resultados de la tabla 4.4, resultando en los valores reportados en la tabla 4.5

Afloramiento, facies tipo columnata	Pe
Ataúdes	0,32
Domo Victoria	0,39
Carros de Piedra	0,30
Cristales	0,28
<i>Basalt Cay</i>	0,28
Cristales-Negritos	0,24
Cristales-Peñón	0,41

Tabla 4.5. Valores del número de Pécelet encontrados para las disyunciones columnares de los afloramientos estudiados en Colombia.

El valor promedio calculado de los valores del número de Pécelet de todos los sitios es $P_e = 0,32$, con una desviación estándar $\sigma = 0,06$.

5. Discusión

5.1 Clasificación de las facies de disyunción en los afloramientos

Según las descripciones realizadas en la sección 4.1, y de los resultados de homogeneidad entre tamaños analizados en la sección 4.2.1.1, de las columnas de los afloramientos estudiados se realizó una clasificación de las facies en tipo columnata o entabladura, como sigue a continuación.

5.1.1 Afloramientos con facies tipo columnata

En los afloramientos Ataúdes, Cristales, Cristales-negritos, Cristales-Peñón, Domo Victoria, Carros de Piedra, *Basalt Cay* y La Calera, se pudieron identificar facies tipo columnata, ya que en todos los casos se observa que las columnas presentan más uniformidad; orientación en una sola dirección, sin bifurcaciones o curvaturas evidentes; y son bastante paralelas entre sí.

Además de las observaciones cualitativas mencionadas, otra evidencia de esta clasificación son los datos de variación relativa de área promedio de la tabla 4.2, valores que sugieren que estos afloramientos presentan una tendencia hacia la homogeneidad de los tamaños de las columnas. Otro de los afloramientos catalogado por Rave (2019) como facies tipo columnata es el Alto Topacio (Rio azufrado) en el flanco NE del nevado del Ruiz. Las fotografías de estos afloramientos donde se evidencian estos rasgos se presentan en la Figura 5.1.

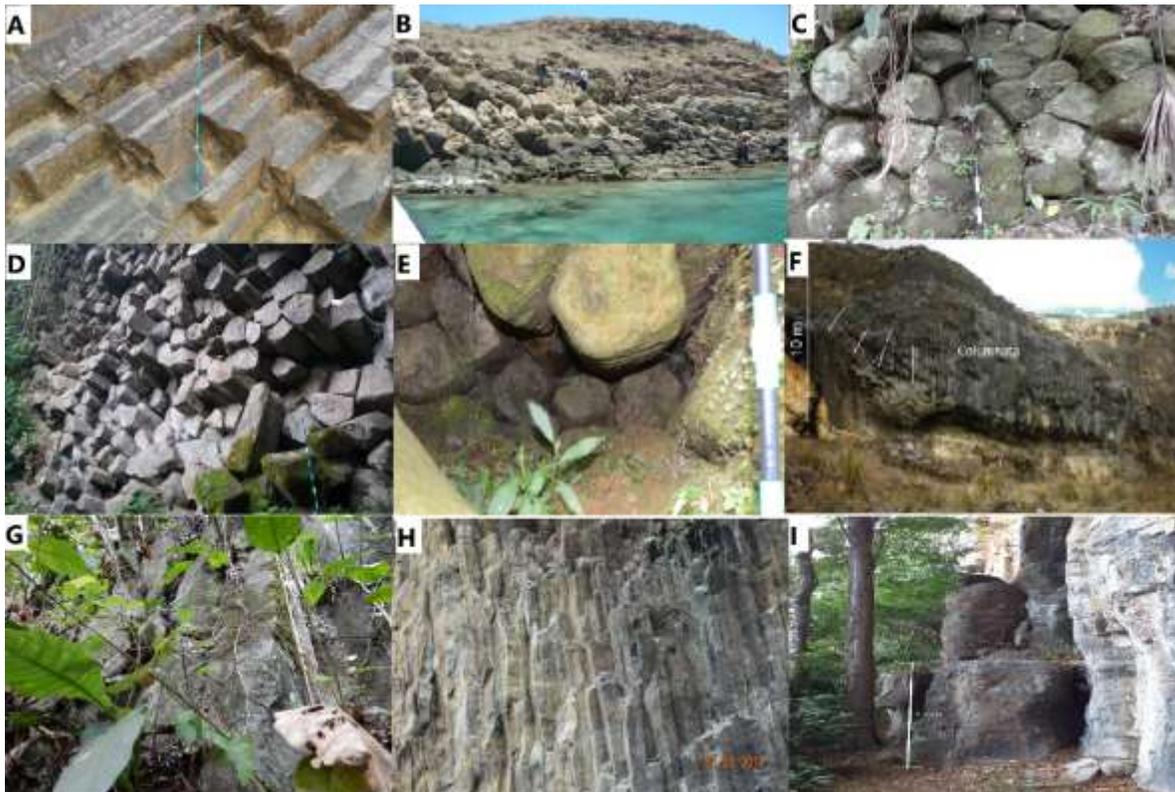


Figura 5.1. Afloramientos con facies tipo columnata encontrados en Colombia. **A:** Ataúdes, **B:** Basalt Cay, **C:** Cristales, **D:** Carros de Piedra, **E:** Domo Victoria, **F:** Alto Topacio* (*Tomado de Rave (2019), **G:** Cristales-Negritos, **H:** La Calera, **I:** Cristales-Peñón.

Por otro lado, se evidenció que, en estos afloramientos, las columnas presentan vestigios de estriamiento como lo muestra la Figura 5.2 y que los tamaños de estrías a lo largo de las caras de las columnas donde son encontradas, tienden a ser constantes en promedio, rasgo que puede evidenciar que el mecanismo de enfriamiento subyacente es el asistido por grietas (Goehring, 2008; Christensen, 2016).



Figura 5.2. Estriamiento encontrado en los afloramientos. **A:** Parte superior Carros de Piedra, Parte inferior Cristales. **B:** Resaltado del estriamiento.

En el caso del afloramiento Cristales-Peñón, los tamaños de estrías que se midieron no son constantes a lo largo de las caras de las columnas: en los primeros 3 m con respecto a la base del terreno, como se muestra en la Figura 5.3, se observó que estos tamaños aumentan de base a techo. Sin embargo, por encima de 3 m, se observa que estos tamaños tienden a ser constantes. Esta característica indica que el mecanismo de enfriamiento que predominó en un principio pudo ser puramente difusivo, pero tiempo después prevaleció el mecanismo asistido por grietas, que habría hecho más eficiente la extracción de calor, conduciendo a un régimen en el cual la velocidad de enfriamiento fue constante.

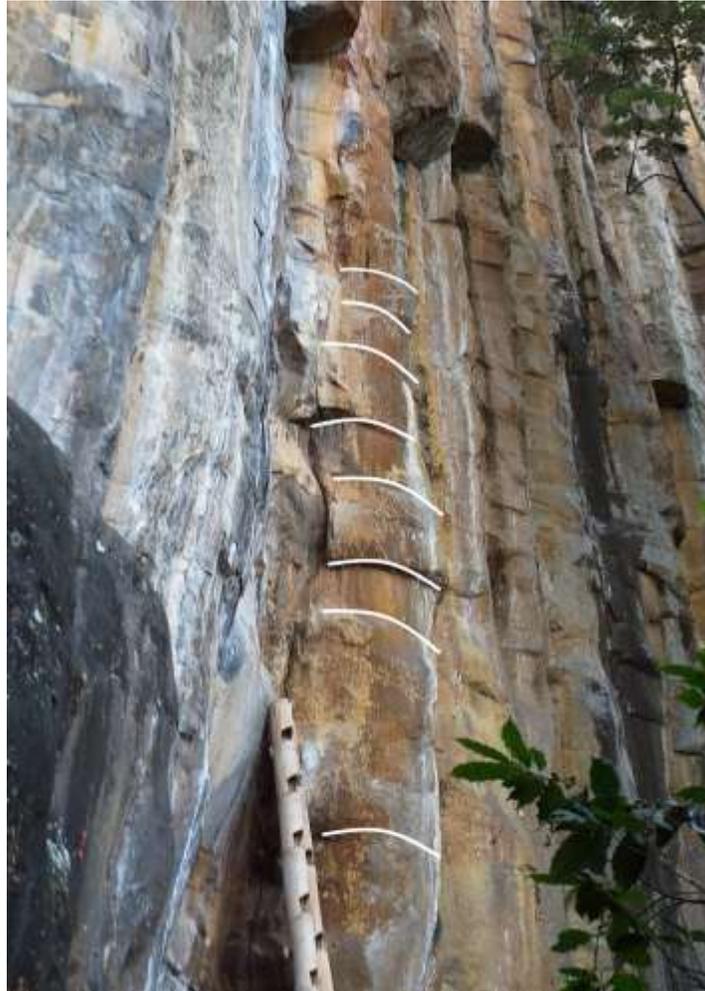


Figura 5.3. Estriamiento encontrado en el afloramiento Cristales-Negritos, donde la separación entre bordes de estrías aumenta de base a techo, adquiriendo características más constantes por encima de los 3 m de altura desde la base. La escalera en la foto mide tres metros.

5.1.2 Afloramientos con facies tipo Entabladura

Según lo descrito en la sección 2.2 las denominadas facies tipo entabladura discutidas por Spry (1962) y Degraff y Aydin (1989) no presenta una homogeneidad en los diámetros, y las columnas generalmente no son paralelas entre sí, además la madurez en sus patrones poligonales no es muy evidente.

En este sentido, el afloramiento Domo Sancancio en Manizales, reportado en Flórez (2017), no presenta uniformidad, como se ve en la figura 5.4 A. En las columnas poco desarrolladas, no se evidencia un patrón poligonal. Además, se puede observar que las orientaciones de las columnas son caóticas como se muestra en la Figura 5.4 B.

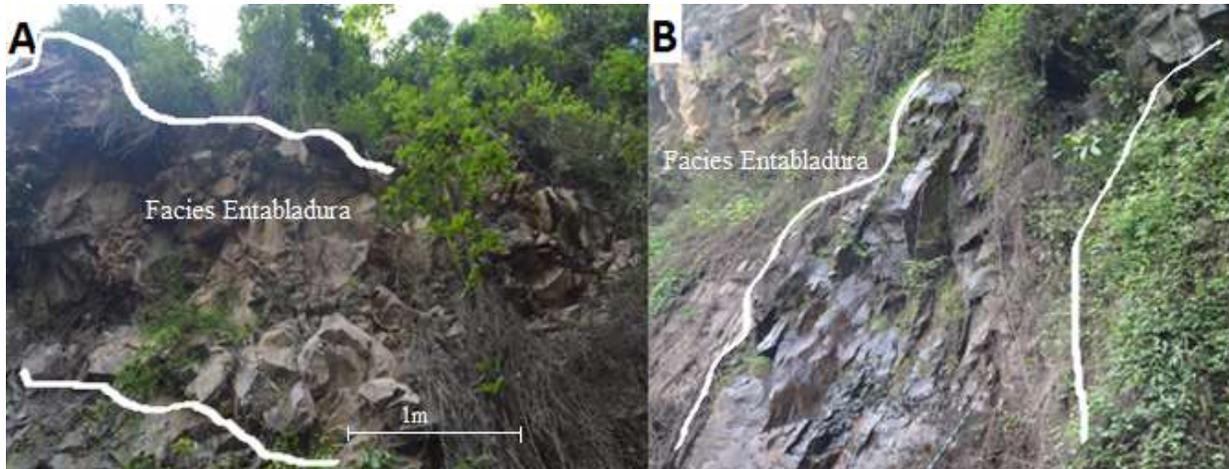


Figura 5.4. A. Fotografía del afloramiento Domo Sancancio donde se observa que las columnas no desarrollaron un patrón poligonal evidente. B. Direcciones caóticas de las columnas del Domo Sancancio. (Foto: Flórez, 2017).

Otro de los afloramientos registrados que presenta facies de entablatura es el reportado por Rave (2019), en el sitio llamado Alto de Ventanas. Este presenta columnas poco desarrolladas, que no se pueden rastrear individualmente como se muestra en la Figura 5.5



Figura 5.5. Afloramiento Alto de Ventanas, presenta facies de entabladura. Tomado de Rave (2019).

Por su parte el afloramiento denominado Alto la Llorona, reportado también por Rave (2019), presenta columnas con orientaciones caóticas y tamaños no uniformes, lo cual hace presumir que es un nivel de facies tipo entabladura, como se muestra en la Figura 5.6.

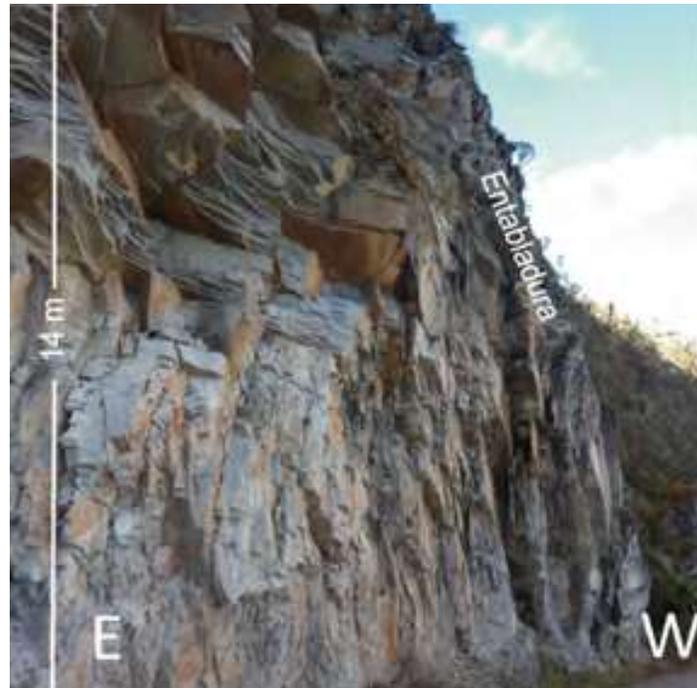


Figura 5.6. Afloramiento con facies tipo entablatura llamado la Llorona. Tomado de Rave (2019).

Por último, otro de los afloramientos registrados que presenta un nivel de entablatura es La Calera, reportado por Flórez (2017) Como se describió en la sección 4.1.6, éste posee dos niveles en los cuales la facies columnata entablatura son distinguibles. Esta última presenta columnas visiblemente más angostas que el nivel inferior y se aprecian variaciones en las direcciones e inclinaciones de las columnas, como se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7. Nivel superior del afloramiento La Calera, donde se presentan columnas más angostas que en el nivel inferior y se evidencia la falta de uniformidad en orientaciones e inclinaciones de los ejes de columnas. Tomado de Flórez (2017).

5.2 Tendencia de los patrones poligonales a la hexagonalidad (Madurez)

A partir del cálculo de los índices de hexagonalidad, del número de lados promedio reportado en la tabla 4.1, y de los histogramas de la Figura 4.11, para los polígonos de las columnas, se comprueba que hay una tendencia clara de la mayoría de los niveles con facies columnata hacia la hexagonalidad, ya que del total de columnas estudiadas, el 57% tienen seis lados. Sin embargo, ninguno de estos sitios analizados presenta una hexagonalidad perfecta ya que no se obtuvieron índices de hexagonalidad iguales a cero.

Ahora, teniendo en cuenta que el índice de hexagonalidad es una medida de la madurez del patrón poligonal, el sitio con mayor madurez es el afloramiento Cristales, que presenta un

índice de hexagonalidad $\chi_N = 0,7$ y un promedio de lados de 5,6. En contraste, el sitio Crsitaes-Peñón, es el menos maduro, ya que presenta el mayor índice de hexagonalidad $\chi_N = 1,6$ y un promedio de lados de 4,3. Hay que resaltar que estos dos afloramientos se encuentran en la misma zona y relativamente cercanos, ya que distan ~ 1 km. Dado que las muestras tomadas de estos dos sitios tienen básicamente la misma composición química (Figura 4.20), es razonable sugerir que la diferencia en el grado de madurez de estos dos sitios no es consecuencia de la composición química de la lava; dejando como opción atribuir esta diferencia en el grado de madurez, a condiciones de emplazamiento distintas en los dos afloramientos en el proceso de enfriamiento. Según Hetényi et al. (2011) las condiciones de emplazamiento juegan un papel muy importante en el mecanismo de selección del tamaño de las columnas, ya que la tasa de enfriamiento se ve afectada por las condiciones iniciales, es decir por los parámetros de enfriamiento al momento del emplazamiento del flujo y por las condiciones de frontera de este, en otras palabras, dependerá de la geometría inicial de la lava al empezar el proceso de enfriamiento. Por consiguiente, si las condiciones de contorno y las iniciales son favorables para la aparición del mecanismo convectivo asistido por grietas, más óptimo en la extracción de calor; que para el afloramiento Cristales-Peñón, lo cual tiene como consecuencia directa que la evolución de las fracturas a la tendencia hexagonal sea mayor en el sitio Cristales.

5.3 Grado de inhomogeneidad de los tamaños de las columnas y madurez

De los datos de la tabla 4.2, se observa que el afloramiento Cristales presenta una variación relativa de área de sus columnas $\frac{\sigma_A}{A} = 0,73$, lo cual, asociado al grado de inhomogeneidad de los tamaños de las columnas; indica que este afloramiento es el más inhomogéneo de los sitios estudiados; pero, presenta a su vez el mayor grado de madurez representado en el menor índice de hexagonalidad $\chi_N = 0,71$. En contraste, el afloramiento Domo Victoria tiene el menor grado de inhomogeneidad, ya que la variación relativa del área de sus columnas es $\frac{\sigma_A}{A} = 0,10$; por su parte, el grado de madurez para este afloramiento es bajo, $\chi_N = 1,33$. Según Phillips et al (2013) existe una relación inversa entre el grado de inhomogeneidad y el índice

de hexagonalidad. Por consiguiente, se realizó un análisis de tendencia de los datos de la figura 4.12, y el índice de correlación encontrado resulto ser no significativo $R^2=0.02$. Con el fin de comparar el comportamiento de los parámetros mencionados anteriormente de las columnatas encontradas en Colombia tipo columnata, se realizó la gráfica de estos junto con los datos publicados de la Isla de Staffa en Escocia, por Phillips et al (2013), versus el índice de hexagonalidad como se muestra en Figura 5.8.

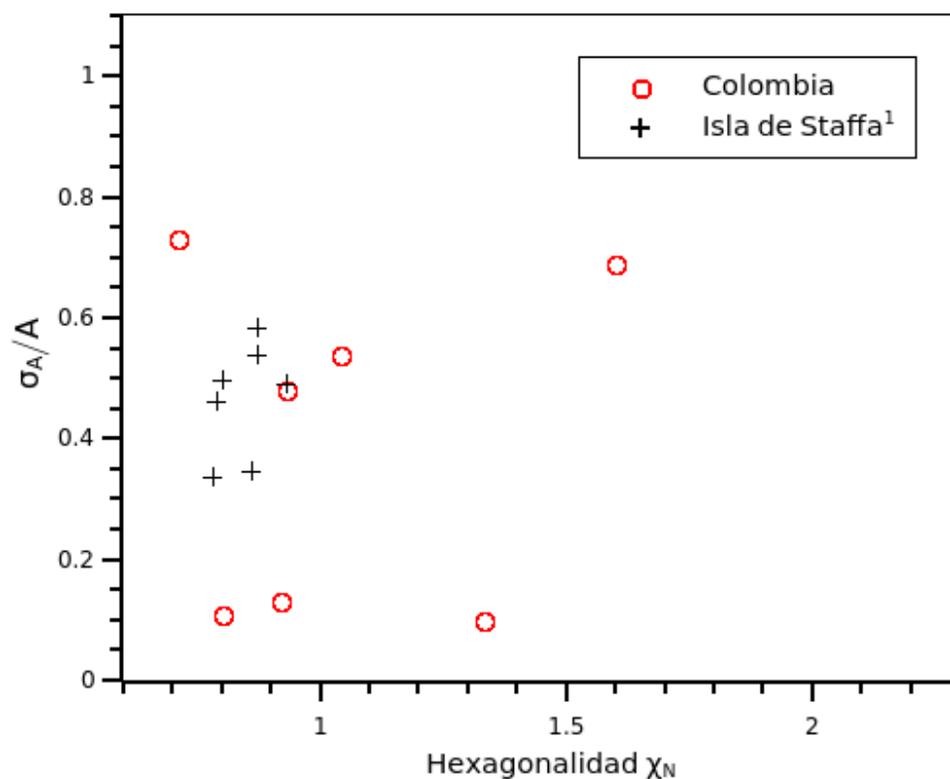


Figura 5.8. Variación relativa del área versus hexagonalidad de las columnas de los afloramientos estudiados en Colombia, y de los de la Isla de Staffa (Phillips et al., 2013).

Así mismo se realizó análisis de tendencia a los datos de la figura 5.8 y tampoco se encontró una correlación evidente entre el grado de inhomogeneidad y el índice de madurez.

5.4 Grado de (regularidad) desorden y madurez

El grado de desorden se estimó mediante el análisis de los parámetros variación relativa de longitud de lado, $\frac{\sigma_L}{L}$ y variación relativa de ángulo interno $\frac{\sigma_\theta}{\theta}$. De los datos de la tabla 4.2 se infiere que el más regular es el afloramiento Ataúdes, ya que presenta la menor variación relativa de longitud de lado, $\frac{\sigma_L}{L}=0,31$, y también el menor valor de variación relativa de ángulo $\frac{\sigma_\theta}{\theta}=0,11$. Por su parte, el más irregular es el afloramiento Cristales-Peñón.

Al promediar las variaciones relativas de $\frac{\sigma_L}{L}$ de los sitios listados en la tabla 4.2, obtenemos un valor de 0,35, con una desviación estándar de 0,09. Para comparar este valor con los reportados en otras publicaciones, se promediaron los valores $\frac{\sigma_L}{L}$ para los sitios: Isla de Staffa, publicados por Phillips et al. (2013); algunos sitios de Francia, Hungría, e Islandia, registrados por Hétengy et al. (2012); el grupo de basaltos del Río Columbia en Estados Unidos, tomados por Goehring (2008); Monte Mudeung en Corea del sur, registrados por Liem et al. (2015); y el este y sureste de China, publicados por Li y Liu (2020); obteniéndose un valor de 0,34 con una desviación estándar de 0,08. Estos dos promedios están de acuerdo con los datos experimentales de desecación de almidón (Goehring, 2005). Lo anterior reafirma la hipótesis del desorden residual inherente del fenómeno de disyunción columnar, que se presenta a diferentes escalas de longitud y en distintos materiales. Es decir, el grado de desorden de un patrón formado por las disyunciones columnares no depende significativamente del proceso físico que lleva a la contracción del material, sino de la naturaleza misma del sistema no lineal.

Otro de los aspectos que se analizó fue la posible correlación entre la $\frac{\sigma_L}{L}$ y el índice de hexagonalidad, χ_N . Para esto se realizó una comparación de los datos de esta tesis con aquellos publicados para la Isla de Staffa y La Calzada del Gigante (Phillips et al., 2013) y del Este y Sureste de China (Li y Liu, 2020), como lo muestra la Figura 5.9

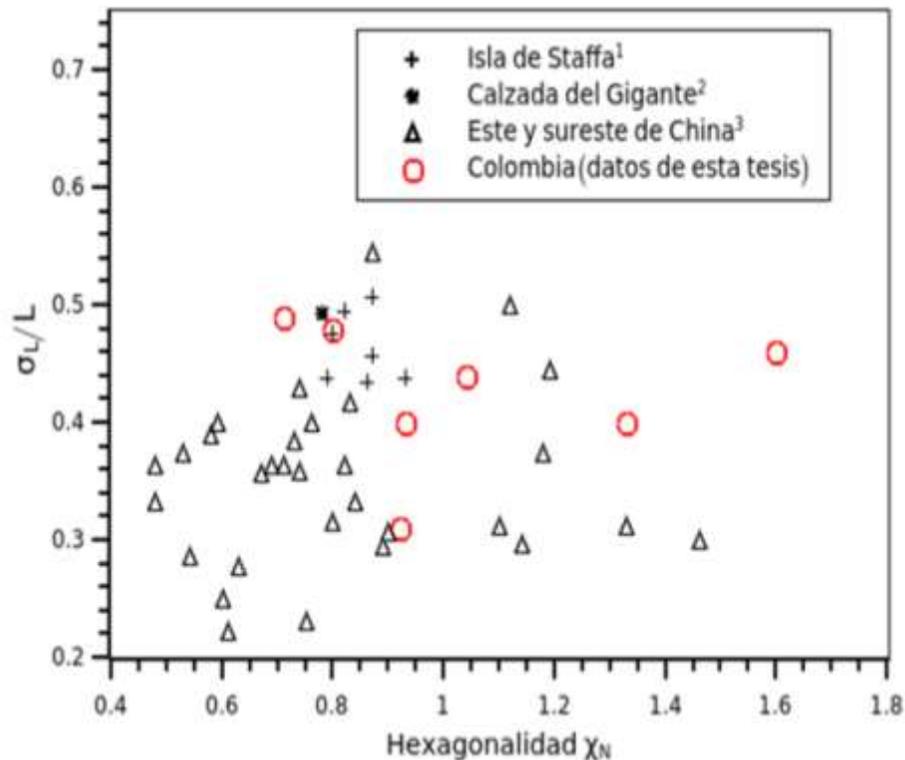


Figura 5.9. Comparación entre los datos de variación relativa de la longitud de lado de columnas versus hexagonalidad para múltiples sitios alrededor del mundo. Datos de Calzada del Gigante [1.][2]Isla de Staffa: (Phillips et al, 2013); 3. datos de China: Li y Liu (2020).

La inspección visual de las figuras 5.9 no revela tendencias claras en los datos, por lo que de este análisis no se pudo establecer una correlación significativa entre estos dos parámetros para los afloramientos estudiados en Colombia. Es así como en este estudio, no se encontró una relación entre el grado de inhomogeneidad del patrón poligonal y su grado de madurez.

Por otro lado, se observó que la distribución de los ángulos internos medidos en los sitios es similar entre sí en la mayoría de los casos, y como se esperaba, se agruparon alrededor de 120° . También se encuentra que la desviación estándar relativa de los ángulos internos $\frac{\sigma_\theta}{\theta}$, es baja para casi todos los afloramientos estudiados. En comparación con las estadísticas de columnas en almidón de maíz desecado (Goehring y Morris, 2008), y las medidas de los

ángulos de la famosa Figura 2.8 de O'Reilly (1879) de la Calzada del Gigante, se puede decir que las estructuras de disyunción en Colombia están en el mismo rango.

En lo que respecta a χ_N y $\frac{\sigma_\theta}{\theta}$ de los afloramientos, se encontró una correlación positiva significativa, lo cual era de esperarse ya que las columnas con más lados deben tener un ángulo interno promedio más alto, ya que la suma de los ángulos internos de un cuadrilátero es 360° . Por lo tanto, los patrones que tienen un alto índice de hexagonalidad tendrán una mayor dispersión de ángulos internos, como el caso del afloramiento Cristales-Peñón.

También se puede mencionar que, a partir de las comparaciones realizadas de los datos de los afloramientos en Colombia con facies tipo columnata; frente a los datos de Phillips et al. (2013) de la Isla de Staffa y de la Calzada del Gigante, mostrados en las figuras 4.13 y 4.16; el afloramiento Cristales es uno de los niveles con la facies columnata más completamente desarrollada, ya que posee el mayor grado de madurez y regularidad. Ahora, si se compara con las estadísticas de la Calzada del Gigante que es uno de los afloramientos más maduros y que tiene uno de los mayores números de medidas que se hayan registrado, resultan ser similares. Esta afirmación se relaciona con la cercanía de los dos datos, como se puede evidenciar en las gráficas.

5.5 Relación entre el tamaño de estría (E) vs. Longitud de lado (L)

De la gráfica mostrada en la figura 4.20 de E vs. L , se puede ver que, entre los siete sitios representados, los datos del Domo Victoria muestran valores de dispersión mayores a las demás unidades. También se puede observar que según el ajuste lineal realizado se encuentra que la altura de la estría, esta correlacionada positivamente con la longitud de lado de las columnas, y hay una tendencia lineal entre los datos, lo cual es confirmado mediante el valor del coeficiente de determinación cuyo valor es $R= 0,9$, obtenido mediante el ajuste lineal de los datos por mínimos cuadrados. Esto comprueba que existe una proporción directa entre el tamaño de estría y el tamaño de lado de las columnas en la facies columnata de los

afloramientos estudiados en Colombia. De la gráfica 4.19 se encuentra que en general los resultados encontrados pueden ser comparables en relación a los publicados para otros sitios alrededor del mundo, como por ejemplo los resultados de Goehring (2008), quien recopiló datos en 18 sitios de disyunciones columnares pertenecientes al grupo de Basaltos del Río Columbia en Estados Unidos; y a los de Grossenbacher y McDuffie (1995), quienes sugirieron que la relación entre el promedio de estría y el promedio de la longitud de lado varía entre 5% y 20% de esta. Como lo muestra la figura 4.18, los datos tomados en los afloramientos en Colombia están en este rango.

5.6 Variación de la composición química de los afloramientos estudiados

En el diagrama TAS de la figura 4.20 se puede observar que la mayoría de las rocas de los afloramientos estudiados son de composiciones químicas intermedias y se clasifican como Traquiandesitas. Con la mayoría de datos aglomerados en un rango químico estrecho, se evidencia la escasa variación composicional que presentan las lavas estudiadas, aunque los sitios Ataúdes y Carros de Piedra representan los extremos composicionales de Basaltos y Dacitas, respectivamente.

De la figura 4.21 podemos inferir que en general existe una correlación positiva entre la longitud del lado de polígonos y el contenido de SiO_2 , lo cual puede dar cuenta de una relación entre la composición química y el tamaño de las columnas. Dada la relevancia de la composición química en el comportamiento de los magmas, es razonable decir que puede existir un control primario a través de las propiedades físicas de la lava.

6. Conclusiones

Se clasificaron los afloramientos que presentan disyunción columnar en tipo columnata y tipo entablatura, mediante la descripción cualitativa de los rasgos morfológicos que presentan las columnas, tales como su dirección, orientación y la distribución de sus tamaños. En este sentido de los trece afloramientos estudiados, nueve de ellos se establecieron como tipo columnata, y los otros cuatro como tipo entablatura. De las disyunciones columnares tipo columnata de las cuales se lograron obtener mediciones, se obtuvieron dos parámetros estadísticos, el índice de hexagonalidad el cual está asociado al grado de madurez de evolución del patrón poligonal, y el promedio de lado. Con estos dos parámetros se estableció la predominancia de las formas hexagonales en la mayoría de afloramientos estudiados. Además, mediante las variaciones relativas de los parámetros geométricos como longitud de lado, área promedio y ángulo interno, se pudo establecer las relaciones entre el grado de regularidad o desorden, e inhomogeneidad de los tamaños, con el índice de hexagonalidad, determinando así que el sitio denominado Cristales es el afloramiento con disyunción columnar tipo columnata con mayor madurez y regularidad que se ha registrado en Colombia, comparable bajo estos parámetros al afloramiento llamado La Calzada del Gigante en Irlanda.

También, mediante el promedio de los datos obtenidos de variación relativa de las longitudes de lado de las disyunciones columnares tipo columna en Colombia, con los datos similares recogidos por otros autores en diferentes afloramientos alrededor del mundo, se puede reafirmar la hipótesis del desorden residual inherente del fenómeno de disyunción columnar, que se presenta a diferentes escalas de longitud y distintos materiales. Es decir que el grado de desorden de un patrón formado por las disyunciones columnares no depende

significativamente del proceso físico que lleva a la contracción del material. Adicionalmente, se estableció que la relación entre el promedio de estría y el promedio de la longitud de lado para los datos tomados en los afloramientos en Colombia están, entre 5% y 20%, lo que concuerda con los resultados de Goehring (2008) y Grossenbacher et al (1995).

Consecuentemente, se pudo inferir una correlación positiva entre el la longitud de lado y el contenido de SiO₂, de las disyunciones columnares tipo columnata, lo cual puede dar cuenta de una relación entre la composición química y el tamaño de las columnas, es decir que puede haber un control primario a través de las propiedades físicas de la lava.

Finalmente se encontraron los números de Péclet, para los afloramientos con disyunciones columnares estudiados, los cuales están sobre el rango entre 0,28-0,41, y un promedio de 0,32, este resultado concuerda con el resultado del número de Péclet de 0,3 encontrado por Goehring (2008), para las lavas del rio Columbia en Estados Unidos.

A. Anexo: Porcentajes en peso de óxido y compuestos presente de los afloramientos estudiados

Afloramiento	Elemento														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Cl	Sr	Zr
Ataúdes	57,43	0,78	18,24	6,86		0,12	2,11	7,82	4,56	1,44	0,24	0,1	0,11	0,06	0,02
Calera	57,43	0,78	18,24	6,86		0,12	2,11	7,82	4,56	1,44	0,24	0,1	0,11	0,06	0,02
Ataúdes	47,03	2,32	13,62	18,81		0,22	6,34	9,07	2,01	0,08	0,24		0,02	0,01	0,02
Domo Victoria	60,19	0,69	16,51	5,55		0,09	2,55	6,23	4,79	2,65	0,31	0,18	0,04	0,08	0,03
Domo Sancancio	59,46	0,66	16,33	6,29		0,11	3,47	6,74	4,71	1,62	0,23	0,15	0,03	0,07	0,02
Carros de Piedra	65,59	0,50	20,21			0,28	1,42	5,21	3,03	3,25		0,06	0,37	0,05	0,01
Cristales	59,66	0,74	18,40	5,62		0,10	2,08	5,79	4,59	2,27	0,29	0,19	0,07	0,07	0,03
Crsitales- Negritos	59,04	0,72	19,40	5,66		0,09	1,81	6,03	4,31	2,16	0,30	0,2	0,05	0,08	0,03
Cristales- Peñón	59,69	0,73	16,90	5,25		0,10	1,94	6,00	4,03	2,66	1,42	0,22	0,07	0,09	0,03
Casabianca ¹	65,12	0,52	16,05	4,45	1,71		2,30	4,52	4,24	1,99	0,22				
Casabianca ²	64,52	0,57	16,01	4,71	0,48		2,42	4,82	4,19	1,82	0,23				
Casabianca ³	65,52	0,65	16,51	5,40	1,82		2,81	5,46	4,13	1,62	0,26				

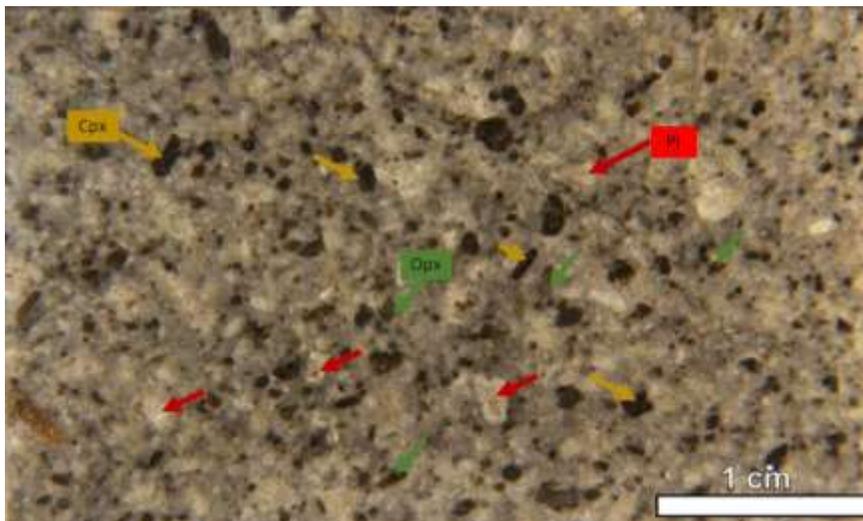
Tabla B1. Porcentajes en peso de óxido y compuestos presente de los afloramientos estudiados. Los datos de los afloramientos Casabianca 1,2 y 3 fueron tomados de las nuestras analizadas por Martínez et al (2014), cerca al municipio de Casabianca (Tolima).

B. Anexo: Análisis petrográfico de las muestras de los sitios Cristales, Cristales-Negritos y Cristales-Peñón.

Los análisis petrográficos de las muestras fueron realizados por el laboratorio petrográfico Rock & Rock y a continuación se muestra el informe petrográfico

B1. Cristales- Negritos

Tipo de Muestra: Muestra de mano



Tipo de roca: Andesita

Características generales: Roca ígnea volcánica compuesta por fenocristales con tamaños de hasta 2 mm de plagioclasas (Pl) con hábito tabular y fenocristales de piroxenos de color verde oliva (ortopiroxeno - Opx) y negro (clinopiroxeno-Cpx) embebidos en una matriz microcristalina clara. Con presencia de magnetita diseminada.

Color: Gris medio

Características texturales: Se observa textura porfirítica

Grado de meteorización: Roca fresca (Meteorización grado I)

Análisis microscópico	
Muestra	Descripción general de la roca
Tipo de muestra Andesita	Roca ígnea compuesta principalmente por fenocristales de grano medio y microcristales de tamaño fino de plagioclasas, ortopiroxeno y clinopiroxeno y minerales opacos diseminados dentro de una matriz criptocristalina.
Número de puntos: 500	Porosidad 1,2 % Vesículas con formas redondeadas.
Minerales esenciales Plagioclasa 100% normalizado. En roca total 48,2% de plagioclasa	Textura general Porfíritica y afanítica Texturas específicas Hipocristalina, microlítica, glomeroporfíritica, Sieve (en plagioclasas)
Minerales esenciales máficos Ortopiroxeno (10%) Clinopiroxeno (4,8%)	Alteración No presenta
Matriz criptocristalina 34,6%	Clasificación de la roca Andesita
Minerales de mena Magnetita 1,2%	Interpretación geológica Roca ígnea volcánica de composición intermedia que se refleja por la presencia de plagioclasa tipo andesina a labradorita y piroxenos de composición intermedia como augita e hiperstena.
Minerales accesorios Apatito <<1%	
Índice de Color: Leucocrático – 24,9	

- 1 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
 0 Casos de estudio en Colombia
 6

	Los fenocristales se formaron en condiciones de alta temperatura y con un periodo de tiempo lento para que se diera una buena cristalización (formas euhedrales), con etapas posteriores de enfriamiento rápido que dio origen a la formación de microcristales y matriz criptocristalina. La matriz criptocristalina no presenta alteración.
--	---

Composición de la muestra						
	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios	Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno	Criptocristalina	Apatito	Magnetita
Puntos	241	50	24	173	0	6
Porcentaje (%)	48,2	10	4,8	34,6	<<1%	1,2

Tipo de muestra Andesita Número de puntos: 500 Minerales esenciales Plagioclasa 100% normalizado. En roca total 48,2% de plagioclasa Minerales esenciales máficos Ortopiroxeno (10%) Clinopiroxeno (4,8%)	Tamaños de los componentes de la roca		
	Tamaño de los cristales	Número de puntos	Porcentaje (%)
	Grueso($2 \leq 16$ mm)	22	4,4
	Medio ($0,25 \leq 2$ mm)	214	42,8
	Fino ($0,032 \leq 0,25$ mm)	87	17,4
	Muy fino ($0,004$ mm \leq $0,032$ mm)	4	0,8
	Criptocristalino ($0,004$ mm) 4μ m	173	34,6
Diagrama para la clasificación Modal realizada de la roca volcánica analizada (Streckeisen,1976)			

Matriz criptocristalina

34,6%

Minerales de mena

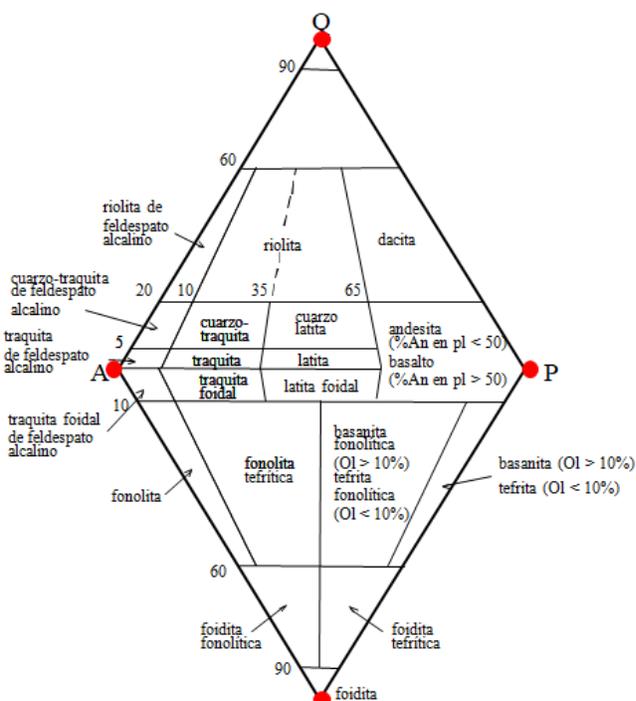
Magnetita 1,2%

Minerales accesorios

Apatito <<1%

Índice de Color:

Leucocrático – 24,9



De acuerdo a la composición de las plagioclasas indican 40-55% de anortita que corresponde andesina a labradorita determinada según el método de Michel-Levy (Kerr, F. P. 1959).

Lo que clasifica la roca como una andesita.

Composición de la muestra

	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios	Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno			
Puntos	241	50	24	Criptocristalina	Apatito	Magnetita
Porcentaje (%)	48,2	10	4,8	34,6	<<1%	1,2

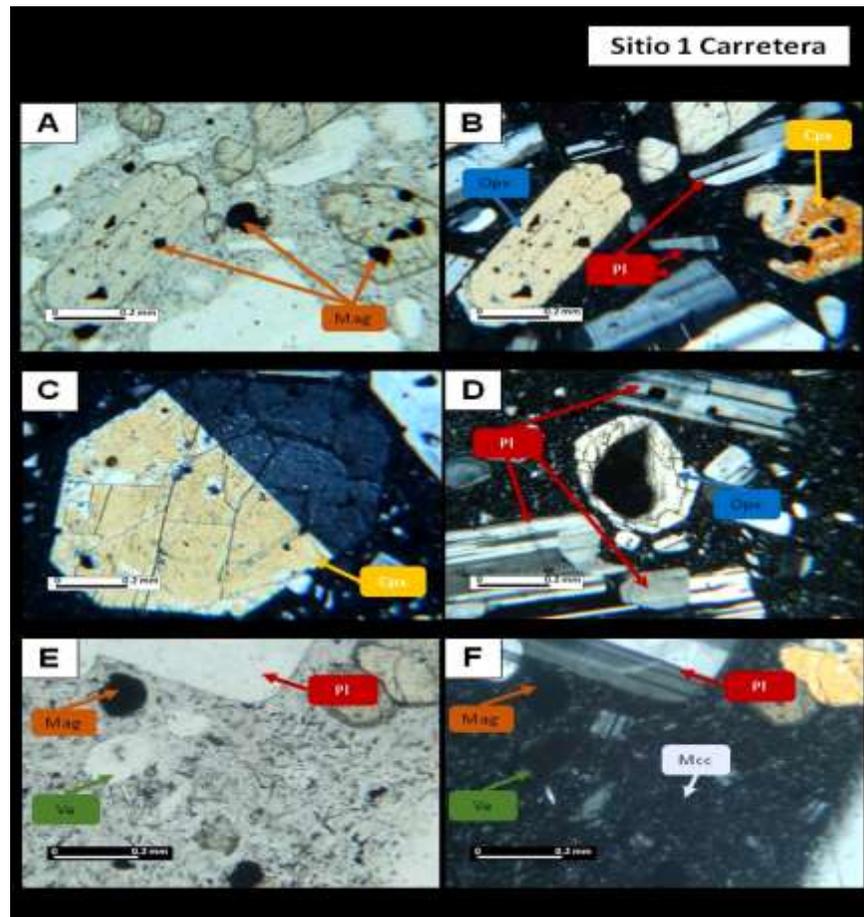
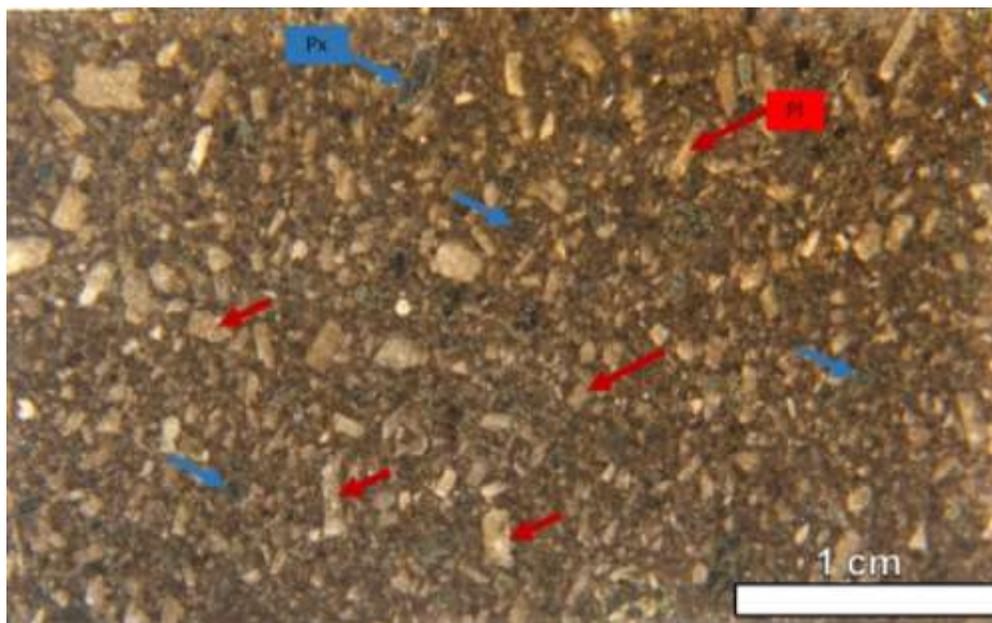


Figura B1. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) A) Se observa textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas (Pl), ortopiroxeno (Opx) y clinopiroxeno (Cpx) y magnetita (Mag) diseminada en una matriz criptocristalina, PPL. B) Misma fotografía anterior, XPL. Fenocristal de clinopiroxeno (Cpx) de forma octogonal con macla simple, XPL. D) Se observa textura porfírica de la roca con fenocristales de plagioclasas (Pl), y fenocristal de ortopiroxeno (Opx) con evidencia de fracturamiento y rompimiento de cristal, XPL. E) Se observa con más detalle la matriz criptocristalina y vesículas redondeadas presentes en la roca, PPL. F) Misma fotografía anterior, XPL.

B2. Crsitales- Peñón

Tipo de Muestra: Muestra de mano



Tipo de roca: Andesita

Características generales: Roca ígnea volcánica compuesta por fenocristales con tamaños de hasta 3 mm de plagioclasas (Pl) con hábito tabular y fenocristales prismáticos de piroxenos (Px) de color negro embebidos en una matriz microcristalina oscura. Con presencia de magnetita diseminada. Se observan vesículas con formas redondeadas.

Color: Negro grisáceo N2. (Munsell Rock Colour Book -2009).

Características texturales: Se observa textura porfírica

Grado de meteorización: Roca fresca (Meteorización grado I)

Análisis microscópico	
<p>Tipo de muestra</p> <p>Andesita</p> <p>.</p> <p>Número de puntos: 500</p>	<p>Descripción general de la roca</p> <p>Roca ígnea compuesta principalmente por fenocristales de grano medio hasta grueso y microcristales de tamaño fino de plagioclasas, ortopiroxeno y clinopiroxeno con trazas de biotita y minerales opacos diseminados dentro de una matriz criptocristalina.</p>

- 1 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
 1 Casos de estudio en Colombia
 0

<p>Minerales esenciales Plagioclasa 100% normalizado. En roca total 53% de plagioclasa</p> <p>Minerales esenciales máficos Ortopiroxeno (12,8%) Clinopiroxeno (3,8%)</p> <p>Matriz criptocristalina 27,8%</p> <p>Minerales de mena Magnetita 2.0%</p> <p>Minerales accesorios Biotita <<1%, Apatito <<1%</p> <p>Índice de Color: Leucocrático – 25.9</p>	<p>Porosidad 0.6 % : Vesículas con formas redondeadas</p>						
	<p>Textura general Porfírica y afanítica</p> <p>Texturas específicas Hipocristalina, microlítica,, glomeroporfírica, Sieve (en plagioclasas)</p>						
	<p>Alteración No evidencia</p>						
	<p>Clasificación de la roca Andesita</p>						
	<p>Interpretación geológica</p> <p>Roca ígnea volcánica de composición intermedia que se refleja por la presencia de plagioclasa tipo andesina a labradorita y piroxenos de composición intermedia como augita e hiperstena. Los fenocristales se formaron en condiciones de alta temperatura y con un periodo de tiempo lento para que se diera una buena cristalización (formas euhedrales), con etapas posteriores de enfriamiento rápido que dio origen a la formación de microcristales y matriz criptocristalina. La matriz criptocristalina presenta un color marrón que indicaría un proceso incipiente de meteorización.</p>						
<p>Composición de la muestra</p>							
	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios		Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno	Criptocristalina	Biotita	Apatito	Magnetita
Puntos	265	64	19	139	0	0	10
Porcentaje (%)	53	12,8	3,8	27,8	<<1%	<<1%	2,0

Tipo de muestra

Andesita

Número de puntos:
500**Minerales esenciales**Plagioclasa 100%
normalizado.En roca total 53% de
plagioclasa**Minerales esenciales máficos**

Ortopiroxeno (12,8%)

Clinopiroxeno (3,8%)

**Matriz
criptocristalina**

27,8%

Minerales de mena

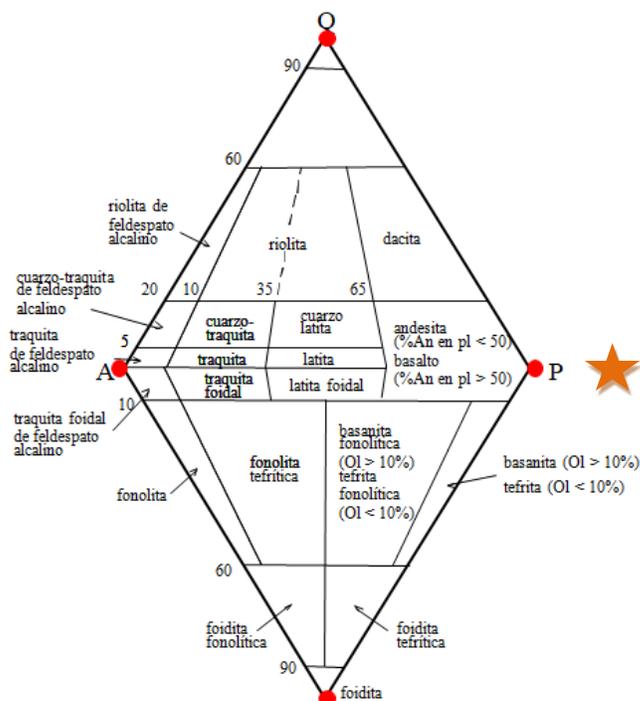
Magnetita 2.0%

Minerales accesoriosBiotita <<1%, Apatito
<<1%**Índice de Color:**

Leucocrático – 25.9

Tamaños de los componentes de la roca

Tamaño de los cristales	Número de puntos	Porcentaje (%)
Grueso($2 \leq 16$ mm)	23	4,6
Medio ($0,25 \leq 2$ mm)	234	46,8
Fino ($0,032 \leq 0,25$ mm)	100	20
Muy fino ($0,004$ mm \leq $0,032$ mm)	4	0,8
Criptocristalino ($0,004$ mm) 4μ m	139	27,8

Diagrama para la clasificación Modal realizada de la roca volcánica analizada (Streckeisen,1976)

De acuerdo a la composición de las plagioclasas indican 40 % de anortita que corresponde andesina determinada según el método de Michel-Levy (Kerr, F. P. 1959). Lo que clasifica la roca como una andesita.

Composición de la muestra

- 1 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
 1 Casos de estudio en Colombia
 2

	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios		Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno	Criptocristalina	Biotita	Apatito	Magnetita
Puntos	265	64	19	139	0	0	10
Porcentaje (%)	53	12,8	3,8	27,8	<<1 %	<<1 %	2,0

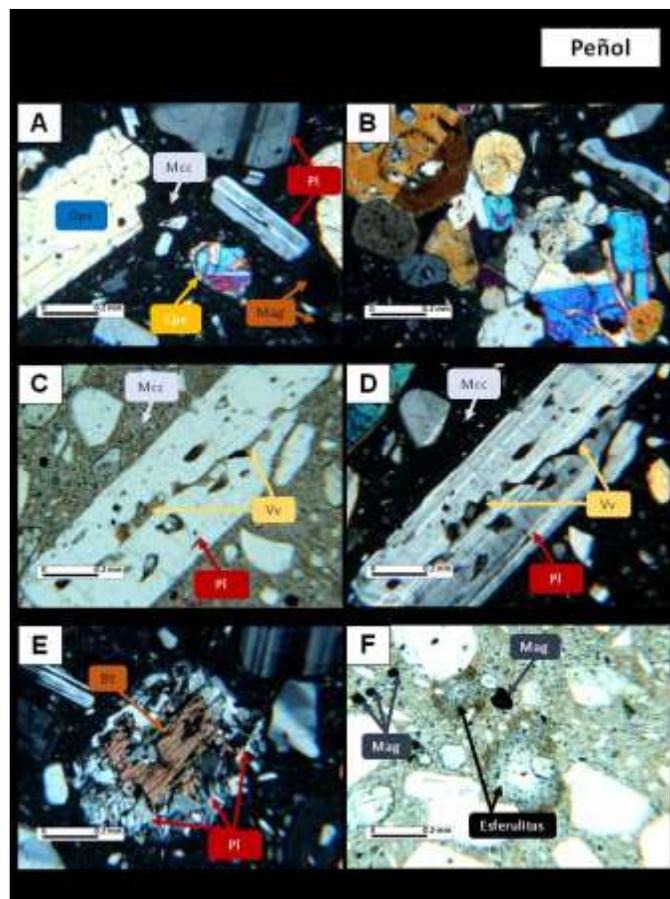
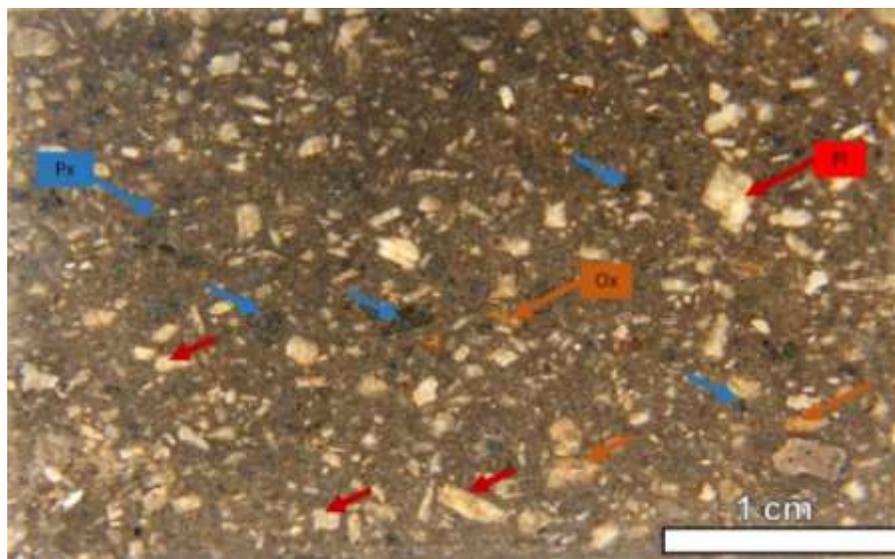


Figura B2. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra (2) Peñol. A) Se observa textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas (Pl), ortopiroxeno (Opx) y clinopiroxeno (Cpx) y magnetita (Mag) diseminada en una matriz criptocristalina, XPL. B) Se observa textura glomeroporfírica conformada por cristales de clinopiroxeno y ortopiroxeno, XPL. C) Fenocristal de plagioclasa (Pl) con inclusiones de vidrio volcánico (Vv) formando textura “Sieve”, PPL. D) Misma fotografía anterior, XPL. E) Xenocristal de

biotita (Bt) rodeado con cristales de plagioclasas (Pl) y magnetita, XPL. F) Se evidencian formas incipientes de esferulitas con centro vacío, PPL

B3. Crsitales

Tipo de Muestra: Muestra de mano



Tipo de roca: Andesita

Características generales: Roca ígnea volcánica compuesta por fenocristales con tamaños de hasta 3 mm de plagioclasas (Pl) con hábito tabular, algunas de ellas presentan oxidación (Ox) y fenocristales de piroxenos (Px) de color negro embebidos en una matriz microcristalina oscura. Con presencia de magnetita diseminada.

Color: Negro grisáceo N2. (Munsell Rock Colour Book -2009).

Características texturales: Se observa textura porfirítica

Grado de meteorización: Roca fresca (Meteorización grado I). La tonalidad (ligeramente marrón) puede deberse a una oxidación incipiente

Análisis microscópico	
Tipo de muestra Andesita	Descripción general de la roca Roca ígnea compuesta principalmente por fenocristales de grano medio y microcristales de tamaño fino de plagioclasas, ortopiroxeno y clinopiroxeno y minerales opacos diseminados dentro de una matriz criptocristalina.
Número de puntos: 500	
Minerales esenciales Plagioclasa 100% normalizado.	Porosidad 0 %
En roca total 49% de plagioclasa	Textura general Porfíritica y afanítica
Minerales esenciales máficos Ortopiroxeno (9,6%) Clinopiroxeno (5,6%)	Texturas específicas Hipocristalina, microlítica, glomeroporfíritica, Sieve(en plagioclasas)
Matriz criptocristalina 33,4%	Alteración Presenta leve oxidación en los cristales de piroxenos y plagioclasas
Minerales de mena Magnetita 2.2%	Clasificación de la roca Andesita
Minerales accesorios Apatito <<1%	Interpretación geológica
Índice de Color: Leucocrático – 26,2	Roca ígnea volcánica de composición intermedia que se refleja por la presencia de plagioclasa tipo andesina a labradorita y piroxenos de composición intermedia como augita e hiperstena. Los fenocristales se formaron en condiciones de alta temperatura y con un periodo de tiempo lento para que se diera una buena cristalización (formas euhedrales), con etapas posteriores de enfriamiento rápido que dio origen a la formación de microcristales y matriz criptocristalina.

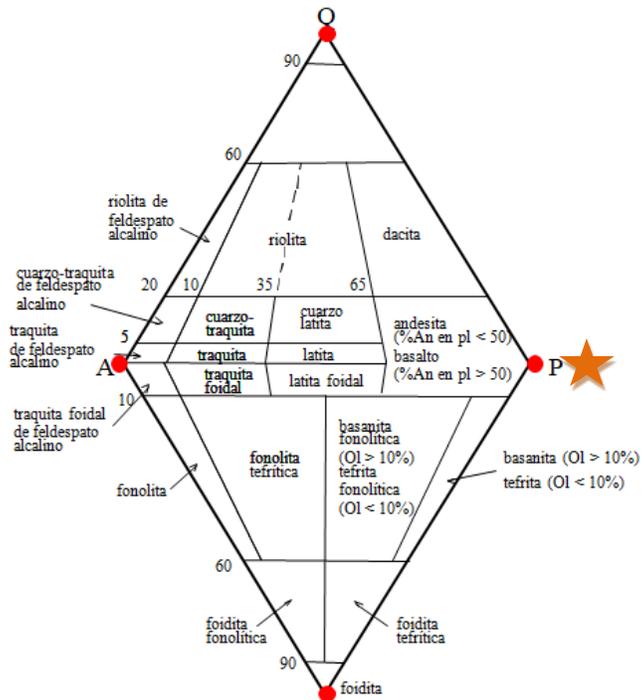
La matriz criptocristalina presenta un color marrón que indicaría posiblemente un proceso incipiente de meteorización.						
Composición de la muestra						
	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios	Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno	Criptocristalina	Apatito	Magnetita
Puntos	245	48	28	167	0	11
Porcentaje (%)	49	9,6	5,6	33,4	<<1%	2,2

Tipo de muestra Andesita . Número de puntos: 500 Minerales esenciales Plagioclasa 100% normalizado. En roca total 49% de plagioclasa Minerales esenciales máficos Ortopiroxeno (9,6%) Clinopiroxeno (5,6%) Matriz criptocristalina 33,4% Minerales de mena Magnetita 2.2% Minerales accesorios Apatito <<1%	Tamaños de los componentes de la roca <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño de los cristales</th> <th>Número de puntos</th> <th>Porcentaje (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grueso ($2 \leq 16$ mm)</td> <td>17</td> <td>3,4</td> </tr> <tr> <td>Medio ($0,25 \leq 2$ mm)</td> <td>209</td> <td>41,8</td> </tr> <tr> <td>Fino ($0,032 \leq 0,25$ mm)</td> <td>105</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>Muy fino ($0,004 \text{ mm} \leq 0,032$ mm)</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Criptocristalino ($0,004 \text{ mm}) 4 \mu\text{m}$</td> <td>169</td> <td>33,8</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño de los cristales	Número de puntos	Porcentaje (%)	Grueso ($2 \leq 16$ mm)	17	3,4	Medio ($0,25 \leq 2$ mm)	209	41,8	Fino ($0,032 \leq 0,25$ mm)	105	21	Muy fino ($0,004 \text{ mm} \leq 0,032$ mm)	0	0	Criptocristalino ($0,004 \text{ mm}) 4 \mu\text{m}$	169	33,8
	Tamaño de los cristales	Número de puntos	Porcentaje (%)																
Grueso ($2 \leq 16$ mm)	17	3,4																	
Medio ($0,25 \leq 2$ mm)	209	41,8																	
Fino ($0,032 \leq 0,25$ mm)	105	21																	
Muy fino ($0,004 \text{ mm} \leq 0,032$ mm)	0	0																	
Criptocristalino ($0,004 \text{ mm}) 4 \mu\text{m}$	169	33,8																	
	Diagrama para la clasificación Modal realizada de la roca volcánica analizada (Streckeisen,1976)																		

- 1 Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas:
- 1 Casos de estudio en Colombia
- 6

Índice de Color:

Leucocrático – 26,2



De acuerdo a la composición de las plagioclasas indican 40- 60% de anortita que corresponde andesina a labradorita determinada según el método de Michel-Levy (Kerr, F. P. 1959).
Lo que clasifica la roca como una andesita.

Composición de la muestra

	Minerales principales			Matriz	Minerales accesorios	Opacos
	Plagioclasa	Ortopiroxeno	Clinopiroxeno	Criptocristalina	Apatito	Magnetita
Puntos	245	48	28	167	0	11
Porcentaje (%)	49	9,6	5,6	33,4	<<1%	2,2

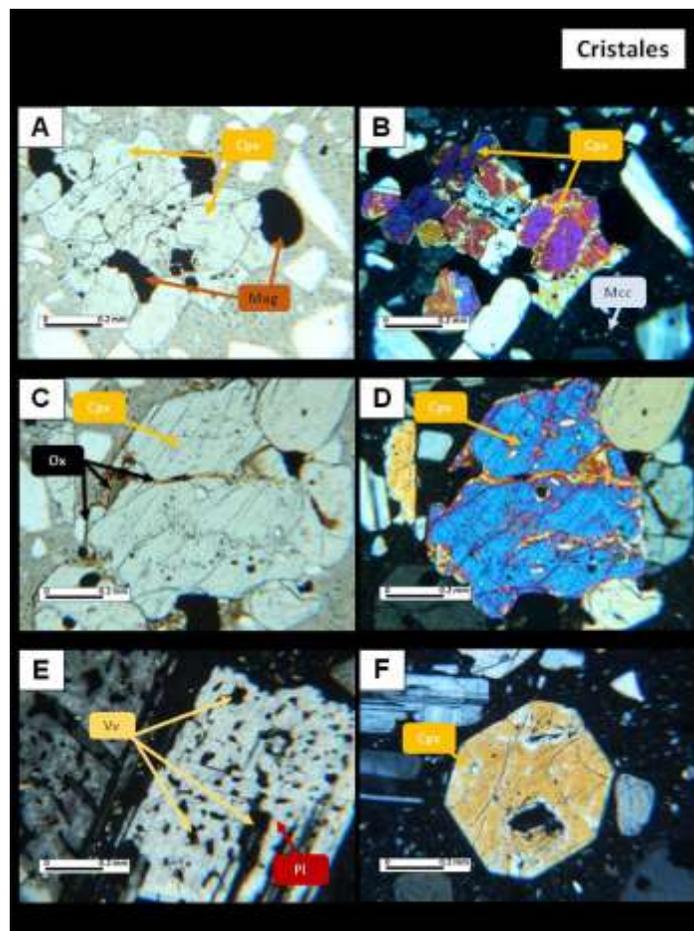


Figura B3. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra (3) Cristales. A) Se observa textura glomeroporfírica compuesta por fenocristales de clinopiroxenos (Cpx) y magnetita (Mag), PPL. B) Misma fotografía anterior, XPL. C) Fenocristal de clinopiroxeno (Cpx) con evidencia de fracturamiento y relleno de óxidos (Ox), PPL. D) Misma fotografía anterior, XPL. E) Fenocristal de plagioclasa (Pl) con inclusiones de vidrio volcánico (Vv) formando textura “Sieve”, XPL. D) Fenocristal de clinopiroxeno (Cpx) de forma octogonal, con evidencia fracturamiento y rompimiento del cristal, XPL.

Referencias

- Anderssohn, R., y Hofmann, M. (2017). Determination of the diameter of columnar jointed volcanics using. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 243-244.
- Aydin, A., y DeGraff, J. (1988). Evoluton of Polygonal Fracture Patterns in Lava Flows. *Science*, 239, 471-476.
- Bakewell, R. (1813). *An Introduction to geology*. Londres: J.Harding.
- Bénard, H. (1901). Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. - Méthodes optiques d'observation et d'enregistrement. *Journal of Theoretical and Applied Physics.*, 254-266.
- Bohn, S., Pauchard, L., y Couder, Y. (2005). Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. *Physical Review E*, 046214-7.
- Bonney, T. (1876). On Columnar, Fissile, and Spheroidal Structure. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 140-154.

- Builes, S., Ordóñez, O., Restrepo, J., y Barbosa, N. (2014). Descripción e interpretación geológica de las Islas de Providencia y Santa Catalina. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 67-81.
- Botero, L., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., y Grajales, J. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termales, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*, 85-102.
- Budkewitsch, P., y Robin, P.-Y. (1994). Modelling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 219-239.
- Bulkeiey, R. (1693). Part of a letter concerning the Giants Causeway in the County of Attire in Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 708-710.
- Calderón, C., Flórez, D., y Sánchez, J. (2017). XVI Congreso Colombiano de Geología III Simposio de Exploradores. *Mecanismos geofísicos de formación de diaclasas columnares en rocas volcánicas: Casos de estudio en Colombia* (pp. 959-963). Santa Marta: Congreso Colombiano de Geología.
- Cashman, K., y Scheu, B. (2015). Magmatic Fragmentation. In H. Sigurdsson, *The Encyclopedia* (pp. 459-471). Londres: Academic Press.
- Christensen, A. (2017). Stress-driven pattern formation in living and nonliving. (*Tesis de Doctorado*). Universidad Copenhagen, 94p.

-
- Christensen, A., Raufaste, C., Misztal, M., Celestini, F., Guidi, M., Ellegaard, C., y Mathiesen, J. (2016). Scale selection in columnar jointing: Insights from experiments on cooling stearic acid and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1462–1482.
- D'Antuono, P., y Morandini, M. (2017). Thermal shock response via weakly coupled. *International Journal of Solids and Structures*, 30418-3.
- DeGraff, J., y Aydin, A. (1993). Effect of thermal Regime on Growth Increment and Spacing of Contraction Joints in Basaltic Lava. *Journal Of Geophysics*, 95-98.
- DeGraff, J., Long, P., y Aydin, A. (1989). Use of joint-growth directions and rock textures to infer thermal regimes during solidification of basaltic lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309-324.
- DeGraff, J., y Aydin, A. (1987). Surface morphology of columnar joints and its significance to mechanics and direction of joint growth. *Geological Society of America Bulletin*, 605-617.
- Demarest, N. (1777). Mémoire sur le basalte, troisième partie. Histoire et. *Année*, 599–670.
- Flórez, D. (2017). Descripción de rocas volcánicas con diaclasas columnares en varios sitios de Colombia. *Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia*, 53.
- Foley, S. (1694). An account of the Giants Causeway in the North of Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 170-172.

Forero, S. (2020). Caracterización morfológica de flujos de lavas con disyunción columnar en cercanías a Santa Rosa de Cabal,. *Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia*, 71 p.

Gesner, K. (1516). *De omni rerum fossilium genere, gemmis, lapidibus, metallis, et huiusmodi, libri aliquot, plerique nunc primum editi*. Retrieved from <http://www.cervantesvirtual.com/obra/de-omni-rerum-fossilium-genere-gemmis-lapidibus-metallis-et-huiusmodi-libri-aliquot-plerique-nunc-primum-editi>

Gilman, J. (2009). Basalt columns: Large scale constitutional supercooling? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 347–350.

Goehring , L., y Morris, S. (2008). Scaling of columnar joints in basalt. *Journal Of Geophysical Research*, B102031-18.

Goehring, L. (2005). Order an disorder in columnar joints. *Europhysics letters.*, 739-745.

Goehring, L. (2008). On the scaling and ordering of columnar joints. (*Tesis de Doctorado*), *Universidad de Toronto Canada*, 172p.

Goehring, L. (2016). Evolving fracture patterns: columnar joints, mud cracks and poligonal terrain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1-18.

Goehring, L., Morris, S., y Zhenquan, L. (2006). Experimental investigation of the scaling of columnar joints. *Physical ReviewE*, 036115.

-
- Goehring, L., Nakahara, A., Dutta, T., Kitsunezaki, S., y Tarafdar, S. (2015). *Desiccation Cracks and their Patterns*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Gray, N., Anderson, J., Devine, J., y Kwasnik, J. (1976). Topological Properties of Random Crack Networks. *Mathematical Geology*, 617-627.
- Grossenbacher, K., y McDuffie, S. (1995). Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95-103.
- Guidi, M. (2013). Scale selection in fracture patterns, a case study in columnar joints. (*Tesis de Maestria*), Univerisdad de Copenague Dinamarca, 56p.
- Guy, B., y LeCoze, J. (1990). Reflections on columnar jointing of basalts: the instability of the planar solidification front. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 943–949.
- Hardee, H. (1980). Solidification in Kilauea Lava Lake. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 211-223.
- Hetényi, G., y Milazzo, M. (2014). Columnar Joints. In *Encyclopedia of Planetary Landforms* (pp. 1-7). New York: Springer Science+Business Media.
- Hetényi, G., Taisne, B., Garel, F., Médard, É., Bosshard, S., y Mattsson, H. (2012). Scales of columnar jointing in igneous rocks: field measurements and controlling factors. *Bulletin of Volcanology* , 457-482.

- Hofmann, M., Anderssohn, R., Bahr, H.-A., Weiß, H.-J., y Nellesen, J. (2015). Why Hexagonal Basalt Columns? *Physical Review Letters*, 154301-5.
- Iddings, J. (1886). The columnar structure in the igneous rock on Orange Mountain, Nero Jersey. *American Journal of Science*, 321-330.
- IDEAM. (2010). *Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C.,: IDEAM.
- Jagla, E., y Rojo, A. (2002). Sequential fragmentation: the origin of columnar quasi-hexagonal patterns. *Physical Review E*, 50-62.
- Jungen, M. (2012). A Model of Columnar Jointing. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 1150006-29.
- Jukes, J. (1862). *Manual of Geology*. Edinburgh: Adam and Charles Black.
- Le Bas, M., Le Maitre, R., Streckeisen, A., y Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 745-750.
- Lefeber, D. (1956). Columnar Jointing and Intracolumnar Differentiation in Basaltic Rocks. Brouwer. *Netherlands Geological*, 1-9.

-
- Li, Y., y Liu, J. (2020). Late Cenozoic columnar-jointed basaltic lavas in eastern and southeastern China: morphologies, structures, and formation mechanics. *Bolletín of Volcanology*, 1-23.
- Lim, C., Huh, M., Yi, K., y Lee, C. (2015). Genesis of Columnar Joints from welded tuff in Mount Mudeung National Geopark; Republic of Korea. *Earth, Planets and Space*, 1-19.
- Long, P., & Wood, B. (1986). Structures, textures and cooling histories of Columbia River basalt. *Geological Society of America Bulletin*, 1144-1155.
- Lore, J., Aydin, A., y Goodson, K. (2001). A deterministic methodology for prediction of fracture distribution in basaltic multiflows. *Journal of Geophysical Research*, 6447-6459.
- Mallet, R. (1875). On the origin and mechanism of production of the prismatic (or columnar structure of basalt. *Science The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 201-226.
- Martínez, L., Valencia, L., Ceballos, J., B, N., Pulgarín, B., Correa, A., y Pardo, N. (2014). *Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Milazzo, M., Keszthelyi, L., Jaeger, W., Rosiek, M., Mattson, S., Verba, C., y Beyer, R. (2009). Discovery of columnar jointing on Mars. *The Geological Society of America*, 171-174.

- Molyneux, T. (1698). letter containing some additional observations on the Giants Causeway in Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 209-223.
- Müller, G. (1998). Experimental simulation of basalt columns. *Journal of volcanology and geothermal research*, 93-96.
- Naranjo, J., y Rios, P. (1989). Geología de Manizales y sus Alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas*, 1-3.
- O'Reilly, J. (1879). Explanatory notes and discussion on the nature of the prismatic forms of a group of columnar basalts, Giant's Causeway. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 641-728.
- Phillips, J., Humphreys, M., Daniels, K., Brown, R., y Witham, F. (2013). The formation of columnar joints produced by cooling in basalt at Staffa, Scotland. *Bulletin of Volcanology*, 1-17.
- Piombo, A., y Dragoni, M. (2018). A model for crack initiation in solidifying lava. *Journal Geophysical Research*, 1-16.
- Pyle, D., y Sigurdsson, H. (1999). Melting the Earth. The History of Ideas on Volcanic Eruptions. *Geological Magazine*, 697-711.
- Raspe, R. (1771). A letter containing a short account of some basalt hills in Hassia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 580-588.

-
- Rave, Y. (2019). Estructuras de Disyunción Columnar en Flujos de Lava Asociados al Complejo Volcánico Nevado del Ruiz en la vía Murillo-Manizalez. (*Trabajo de grado*). Universidad Nacional de Colombia, 76p.
- Rave, Y., y Sánchez, J. (2019). XVII Congreso Colombiano de Geología. *Estructuras de disyunción columnar en flujos de lava asociados al complejo volcánico Nevado del Ruiz* (pp. 1391-1395). Santa Marta: XVII Congreso Colombiano de Geología.
- Ryan, M., y Sammis, C. (1978). Cyclic fracture mechanism cooling basalt. *Geological Society of America Bulletin*, 1295-1308.
- Ryan, M., y Sammis, C. (1981). The glass transition in basalt. *Journal Geophysical Research*, 9519-9535.
- Saliba, R., y Jagla, E. (2003). Analysis of columnar joint patterns from three-dimensional stress modeling. *Journal of Geophysical Research*, 1-7.
- Scrope, G. (1825). *Frontmatter. In Considerations on Volcanos: The Probable Causes of their Phenomena, the Laws Which Determine their March, the Disposition of their Products, and their Connexion with the Present State and Past History of the Globe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sepúlveda, J. (2009). Santiago de Cali: Ingeominas.
- Tellez, L. (2011). Aporte al conocimiento de la Geología Volcánica en las Inmediaciones de la Población de Río Blanco (Cauca). (*Trabajo de Grado*). Universidad EAFIT Colombia, 131p.

Thomson, d. (1863). On the origin of the jointed prismatic structure in basalt and other igneous rocks. *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 89-98.

Tiller, W., Jackson, K., Rutter, J., y Chalmers, W. (1953). The redistribution of solute atoms during the solidification of metals La distribution des atomes d'un corps dissous lors de la solidification des métaux Die während des kristallisationsvorgangs in metallen auftretende veränderung in der verteilung der gelö. *Acta Metallurgica*, 428-437

Tiller, W. (1963). *Principles of solidification: The Art and Science of Crystal Growth*. New York: In John Wiley & Sons.

Tomkeieff, S. (1940). Basalt Lavas of the Giant's Causeway. *Bulletin Volcanological Napoli*, 2-6.

Toramaru, A., y Matsumoto, T. (2004). Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment. *Journal Geophysics Research*, 1-10.

Turcotte, D., y Schubert, G. (2002). *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge.

Walker, J. (1986). Cracks in a Surface Look Intricately Random but Actually Develop Rather. *Scientific American*, 178-183.

Watt, G. (1804). Observations on basalt, and on the transition from the vitreous to the stony texture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 12-25.

Webb, S. (1997). Silicate melts: Relaxation, rheology, and the glass transition. *Reviews of Geophysics*, 191-218.

Woodell, D. (2012). Constraints on Formation of Columnar Joints in Basalta Lava. (*Tesis de Maestria*)Univerisdad de Bristish Columbia, 147p.

