Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Civil

Efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades geomecánicas de las rocas

Proyecto Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería

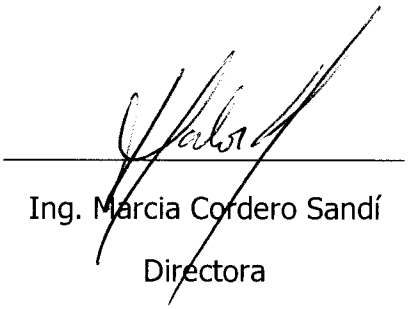
Presenta:
Roberto Antonio Peralta Vargas

Directora de Proyecto de Graduación:
Ing. Marcia Cordero Sandí

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

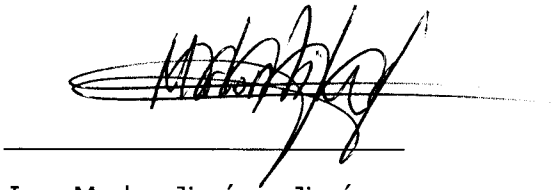
Costa Rica Enero, 2015

Hoja de aprobación



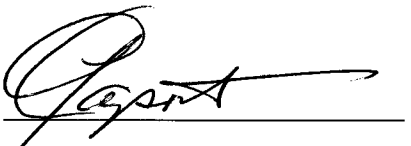
Ing. Marcia Cordero Sandí

Directora



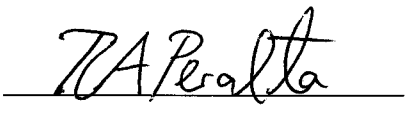
Ing. Marlon Jiménez Jiménez

Asesor



Ing. Gastón Laporte Molina M.Sc.

Asesor



Roberto Peralta Vargas

Estudiante

Derechos de propiedad intelectual

Roberto Antonio Peralta Vargas, cédula 1-1422-0111, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A94657**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades geomecánicas de las rocas,** bajo la Dirección de Ing. Marcia Cordero Sandí, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Reconocimientos

Le agradezco a Dios, al país, a mis padres, a mis familiares y amigos por formarme y apoyarme en realizar mis estudios universitarios. Han sido años muy gratos que recordaré siempre con cariño.

Un gran agradecimiento le debo a la Directora de este trabajo de investigación –Ing. Marcia Cordero— por su decisión de permitirme hacer mi proyecto de graduación bajo su consejo y guía. También le agradezco a los dos asesores –Ing. Gastón Laporte e Ing. Marlon Jiménez— que cooperaron con su experiencia y recomendaciones, así como a otros profesionales que estuvieron involucrados en la ejecución del Proyecto. Específicamente quisiera agradecer al Dr. Guillermo Alvarado por ayudar a analizar las muestras desde un punto de vista geológico.

También quisiera agradecer a todo el personal del Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR, donde me proporcionaron el equipo e insumos necesarios para las pruebas de laboratorio.

Índice

Derechos de propiedad intelectual 2

Reconocimientos 3

Índice de Figuras 8

Índice de Cuadros 10

Resumen 12

Capítulo 1. Introducción 13

1.1. Justificación 13

1.1.1. El problema específico 13

1.1.2. Importancia 13

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema 14

1.2. Objetivos 16

1.2.1. Objetivo General 16

1.2.2. Objetivos específicos 16

1.3. Delimitación del problema 17

1.3.1. Alcance 17

1.3.2. Limitaciones 18

Capítulo 2. Marco teórico y Metodología 19

2.1. Mineralogía 19

2.1.1 Alteración hidrotermal 19

2.1.2. Ensayos para determinar Mineralogía 24

2.2. Propiedades físicas 28

2.3. Propiedades mecánicas.....29

2.4. Sistemas de clasificación de rocas.....37

2.5. Metodología.....41

Capítulo 3. Resultados.....44

3.1. Escogencia del sitio de estudio: Visitas de campo.....44

3.1.1. Gira del 25 de Setiembre del 2013.....44

3.1.2. Gira del 10 de diciembre del 2013.....47

3.2. Zona geológica.....50

3.3. Propiedades mineralógicas.....52

3.3.1. Petrografía.....52

3.3.2. Difracción de rayos X.....65

3.3.3. Ensayo de azul de metileno.....65

3.3.4. Ensayo de determinación de pH de los tipos de roca.....66

3.4. Propiedades físicas.....66

3.4.1 Porosidad.....66

3.4.2 Gravedad específica.....67

3.4.3 Absorción.....67

3.5. Propiedades mecánicas.....68

3.5.1. Abrasión.....68

3.5.2. Carga Puntual.....68

3.5.3. Ensayo de Martillo de Schmidt.....69

3.5.4. Ensayo de Compresión Uniaxial 72

Capítulo 4. Análisis de Resultados 75

4.1. Comparación de resultados mineralógicos 75

4.2. Comparación de propiedades físicas entre tipos de roca alterada. 78

4.2.1. Análisis de resultados de gravedad específica 78

4.2.2. Análisis de resultados de porosidad 79

4.2.3. Comparación absorción 80

4.2.4. Comparación entre absorción y porosidad 81

4.2.5. Comparación entre porosidad y densidad seca 83

4.3. Comparación de propiedades mecánicas 85

4.3.1. Comparación entre valores de porcentaje de abrasión 85

4.3.2. Comparación entre resultados de resistencia a la compresión uniaxial inconfinada 88

4.3. Recomendación de metodología para identificar alteración hidrotermal en obra 95

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones 98

5.1. Conclusiones 98

5.2. Recomendaciones 100

Capítulo 6. Referencias 102

Anexo 1 Resultados de ensayos físicos 106

Anexo 2 Resultados de ensayos mecánicos 107

Anexo 2b Resultados de ensayo de abrasión 107

Anexo 2c Resultados de ensayo de carga puntual 108

Anexo 2d Resultados de martillo de Schmidt 111

Anexo 2e Resultados de compresión uniaxial inconfinada 112

Anexo 3 Resultados de ensayos mineralógicos 117

Anexo 3a Informe de petrografía de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica 117

Anexo 3b Resultados de difracción de rayos-x 129

Anexo 3c Resultados de prueba de azul de metileno 135

Índice de Figuras

Figura 2. 1. Tipos de alteración hidrotermal asociados a tipos de mineralización. Modelo de Lowell-Guilbert. 23

Figura 2. 2. Ejemplos de microscopios para petrografía. 25

Figura 2. 3. Ejemplo de difractómetro. 26

Figura 2. 4. Gráfico de cálculo de módulo de Young. 31

Figura 2. 5. Equipo de carga puntual. 36

Figura 2. 6. Martillo Schmidt. 37

Figura 2. 7. Diagrama de flujo de la metodología a usar. 41

Figura 3. 1. Talud de estudio en km 48 de Ruta 27 45

Figura 3.2. Rocas en diferentes grados de alteración. 45

Figura 3.3. Paredes del macizo más alteradas. 46

Figura 3.4. Bloque que por su coloración apunta a una alteración ferruginosa. 46

Figura 3.5. Vista del talud en el que se observan las diferencias en materiales en distancias cortas. 47

Figura 3.6. Vista del talud en la que se observan las diferencias en materiales. 48

Figura 3.7. Fotografía de deslizamiento regional. 48

Figura 3.8. Formación del mineral melanterita (FeSO4). 49

Figura 3.9. Gráfico relacionando compresión uniaxial con valor de rebote de Martillo de Schmidt. 70

Figura 3.10. Resultados de ensayo de martillo de Schmidt. 71

Figura 3.11. Arreglo para fallar rocas con extensómetro láser. 73

Figura 4. 1. Comparación entre valores de gravedad específica bruta seca de diferentes grados de alteración de la roca. 79

Figura 4. 2. Comparación entre valores de porosidad de tipos de roca alterada. 80
Figura 4. 3. Comparación entre valores de absorción de grados de alteración de la roca.81
Figura 4. 4. Comparación entre valores de absorción y porosidad.....82
Figura 4. 5. Gráfico de relación entre absorción y porosidad para diferentes tipos de roca con los datos obtenidos de los resultados.....83
Figura 4. 6. Gráfico de correlación entre resultados densidad seca y porosidad.....84
Figura 4. 7. Gráfico de correlación entre resultados de densidad seca y porosidad modificado para mostrar los resultados obtenidos. 85
Figura 4. 8. Comparación entre valores de porcentaje de pérdida de abrasión entre grados de alteración de la roca. 86
Figura 4. 9. Comparación entre valores de porcentaje de pérdida de abrasión y valores promedio de absorción. 87
Figura 4. 10. Clasificación de rocas según resistencia según varios autores. 90
Figura 4. 11. Correlación entre resistencia y módulo de Young con resultados de experimentos.....91
Figura 4. 12. Comparación de la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada y la gravedad específica.....94
Figura 4. 13. Metodología para identificación de alteración hidrotermal en un sitio.....96

Índice de Cuadros

Cuadro 2. 1. Minerales de reemplazo en alteración hidrotermal. 21

Cuadro 2. 2. Tipos diferentes de alteración hidrotermal y sus productos. 23

Cuadro 2. 3. Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas. 29

Cuadro 2.4. Valores típicos de resistencia compresión uniaxial inconfinada de la matriz rocosa sana para diferentes tipos de roca.....32

Cuadro 2.5. Valores típicos de constantes de resistencia de la matriz rocosa sana para diferentes tipos de roca. 33

Cuadro 2.6. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR.....39

Cuadro 3.1. Resultados R27-1 53

Cuadro 3.2. Resultados R27-2 55

Cuadro 3.3. Resultados R27-3 57

Cuadro 3.4. Resultados R27-4 58

Cuadro 3.5. Resultados R27-5 60

Cuadro 3.6. Resultados R27-7 62

Cuadro 3.7. Resultados de prueba de azul de metileno.....65

Cuadro 3.8. Resultados de prueba de pH. 66

Cuadro 3.9. Valores de porosidad obtenidos en pruebas experimentales. 67

Cuadro 3.10. Valores de gravedad específica. 67

Cuadro 3.11. Valores de absorción.....68

Cuadro 3.12. Valores de porcentaje de pérdida por abrasión.....68

Cuadro 3.13. Valores de la carga puntual e índice de resistencia a carga puntual representativa para una muestra de 50 mm de diámetro. 69

Cuadro 3.14. Valores promedio de rebote de Martillo de Schmidt y su correlación a resistencia a la compresión uniaxial inconfinada.....71

Cuadro 3.15. Resultados de compresión uniaxial inconfinada. 74

Cuadro 4. 1 Comparación de minerales de alteración presentes en los diferentes grados de alteración. 76

Cuadro 4. 2. Resumen comparativo de resultados que se relacionan con la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada. 88

Resumen

Peralta Vargas, Roberto Antonio

Efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades geomecánicas de las rocas

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C. R.:

R. Peralta V., 2015

xi, 93, [30]h; ils. col. –27 refs.

RESUMEN

El fenómeno geológico del hidrotermalismo, como el presente en el área de estudio en el km 48 de la Ruta 27 a Caldera, es generado por el flujo de alguna sustancia –usualmente agua— que junto con otros factores como la temperatura, el pH y la presión genera una sustitución de minerales que lleva a cambios en las propiedades geomecánicas utilizadas para el diseño de obras civiles.

Se realizó una serie de ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas y otras con diferentes grados de alteración de las rocas volcánicas de la unidad montañosa prominente de la formación Aguacate. Se compararon los resultados de ensayos mineralógicos (petrografía, difracción de rayos-X, azul de metileno, medición de pH), físicos (porosidad, gravedad específica, absorción) y mecánicos (abrasión, carga puntual, martillo de Schmidt, Compresión uniaxial inconfinada).

La alteración hidrotermal encontrada en las muestras analizadas a la altura del km 48 es de tipo propilítica, sericítica y de argilítica. Conforme más intensa es la alteración tienden a aumentar exponencialmente los valores de porosidad y la absorción, mientras que la gravedad específica disminuye linealmente. Con respecto a la resistencia a la compresión uniaxial, los resultados no permiten llegar a ninguna aseveración concreta. Por otra parte, si se detecta olor a azufre, coloraciones amarillentas y anaranjadas en la roca, o la presencia de pirita, debe tenerse en cuenta la posibilidad de que exista este fenómeno, y la variabilidad de sus características en pocos metros. Finalmente considerar que estos materiales no deben utilizarse como agregados para concreto y se debe estudiar su interacción con el acero y el concreto. R. A. P. V.

Palabras clave: geotecnia, hidrotermalismo, mecánica de rocas, Ruta 27, formación Aguacate.

Ing. Marcia Cordero Sandí

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. El problema específico

Costa Rica es un país con una gran diversidad de ambientes geológicos, un fenómeno común, pero poco estudiado, en macizos rocosos de ambientes geológicos volcánicos es la alteración hidrotermal. Este tipo de alteración puede degradar las características geomecánicas de los macizos rocosos, las cuales son utilizadas como criterio para la mayoría de sistemas de clasificación de macizos rocosos. El problema que se busca resolver es la reducción de la incertidumbre sobre cómo incide la alteración hidrotermal sobre las propiedades geomecánicas. Uno de los sitios donde se encuentra alteración hidrotermal es en la Ruta Nacional No. 27. Esta investigación estudió las rocas encontradas en el km 48 de esta carretera, que corresponden específicamente con rocas de la Formación Aguacate.

En esta investigación se procurará comparar los resultados de una serie de ensayos de laboratorio realizados sobre muestras inalteradas y otras con diferentes grados de alteración; de forma tal que se pueden formular algunas conclusiones prácticas para estabilidad de taludes y seguridad de obras subterráneas.

Mediante una batería completa de ensayos se busca definir recomendaciones para los ingenieros civiles que estén desarrollando obras en ambientes geológicos análogos.

1.1.2. Importancia

Es relevante estudiar los cambios que se pueden dar en las propiedades geomecánicas de las rocas para poder predecir cuál será su respuesta en interacción con una obra civil.

Estas propiedades son los insumos necesarios para un adecuado diseño geotécnico de obras en sitios con rocas alteradas hidrotermalmente. En el diseño de taludes y obras subterráneas, es todavía más importante tener mayor conocimiento sobre el comportamiento del macizo afectado por este fenómeno. Esta investigación procura aportar conocimiento para poder mejorar estos procesos.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

El fenómeno de alteración hidrotermal es un tema tan complejo que es poco entendido incluso en el ámbito de la geología. Por esta misma razón desde el punto de vista de la ingeniería civil, existen pocos estudios que traten sobre las propiedades geomecánicas de rocas alteradas hidrotermalmente y la variación entre los diferentes tipos y grados de alteración.

Los estudios existentes en el país son principalmente desde un enfoque geológico. En particular se puede mencionar, entre otros, los trabajos realizados por Laguna (1984) sobre las vulcanitas originadas por la alteración hidrotermal en la formación Aguacate; su tesis doctoral estudia la geoquímica y petrografía de las rocas de esa formación.

También desde el punto de vista geológico, se puede mencionar la tesis de licenciatura de Fernández (1984) que propone una metodología para estimar si en un sitio se dan las temperaturas adecuadas para explotación geotérmica, dependiendo del grado de alteración de testigos de perforaciones. Esta investigación se realizó para el sitio del campo geotérmico Miravalles. Algunas de las muestras se analizaron en laboratorios en Italia.

Otras investigaciones geológicas sobre el fenómeno de alteración hidrotermal es por ejemplo el trabajo de Ortega, L. et al (1994) sobre la *Geoquímica de los procesos de alteración hidrotermal en la mineralización de Sb de Mari Rosa (Zona Centro Ibérica).*

Un punto importante es que en el país no se ha realizado un mapeo general de la presencia de zonas afectadas hidrotermalmente. Así lo dejó claro la Coordinadora de la Sección de Geoquímica y Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, Stephanie Murillo Maikut M.Sc., experta en el fenómeno de alteración hidrotermal.

Una investigación importante fue la realizada en la zona de Miramar por Žáček, V. et al (2012). En esa investigación se presenta un mapa geológico de la hoja cartográfica Miramar en el que se identifican varias zonas hidrotermalizadas en las que se puede facilitar la localización de un sitio apropiado para extraer los testigos para la presente investigación.

Desde el punto de vista geotécnico se puede citar el artículo de J. D. Ale et al (2012) sobre la "Influencia de alteración hidrotermal en el diseño geotécnico de macizos rocosos" presentado en el *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2012 CAMSIG XXI, Rosario, Santa Fé, Argentina.* En este artículo se presentan los resultados de ensayos de carga puntual en testigos de rocas con diferentes grados de alteración identificados cualitativamente en campo. Estos resultados se correlacionaron con la resistencia a compresión uniaxial y al grado de alteración. Se llegó varias conclusiones como que la resistencia de la roca a la compresión inconfinada decrece exponencialmente con el grado de alteración.

También existe un informe importante del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) (2011) que evalúa las condiciones de alteración hidrotermal en la Ruta Nacional 27.

Otra investigación desde el punto de vista geotécnico son los artículos hermanos publicados por A. Pola et al en el tercer "Workshop" internacional en Tenerife (2010). En el primer artículo se caracterizan y comparan las distribuciones de poros en rocas volcánicas alteradas mediante diferentes técnicas. Las muestras son de un campo hidrotermalizado en Italia y fueron caracterizadas mediante ensayos petrográficos. En el segundo artículo se relaciona estos resultados de porosimetría con las propiedades mecánicas de rocas volcánicas alteradas. Se prosigue a someter las muestras caracterizadas por su porosidad a pruebas de compresión uniaxial y tensión indirecta. Los resultados enseñan que según el grado de alteración hasta el modo de falla puede variar. También se caracteriza la gráfica de esfuerzo-deformación de los diferentes grados de alteración.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar los efectos de la alteración hidrotermal sobre las propiedades geomecánicas de las rocas para conocer cómo incide en obras civiles.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recopilar literatura para reconocer los tipos de alteración hidrotermal.
- Identificar zonas que podrían estar afectadas por alteración hidrotermal.

- Seleccionar un sitio representativo para toma de muestras sanas y con algún grado de alteración.
- Realizar pruebas de laboratorio y de campo para determinar las características geomecánicas de los materiales, mediante ensayos básicos, físicos y mecánicos.
- Identificar los diferentes productos mineralógicos de alteración hidrotermal mediante difracción de rayos-X.
- Caracterizar mediante petrografía los bloques de roca alterados o sanos.
- Comparar los resultados de las pruebas de laboratorio para determinar cómo el proceso de alteración afecta las propiedades de la roca.
- Dar recomendaciones para el uso correcto de las técnicas de investigación en este tipo de ambiente geológico.

1.3. Delimitación del problema

1.3.1. Alcance

La investigación es de naturaleza geotécnica y no geológica pues forma parte de un trabajo de investigación de la Escuela de Ingeniería Civil. Debido a la formación profesional de un ingeniero civil, no se conoce a fondo los mecanismos y geoquímica propios de la alteración hidrotermal. El énfasis es más bien el efecto de esta alteración en las propiedades geomecánicas que puedan afectar la respuesta de la roca ante esfuerzos generados por una obra civil, para un sitio específico (km 48, Ruta 27).

El proyecto no incluye propiamente analizar los taludes afectados por hidrotermalismo; que es donde se aprecian comportamientos diferenciales de los materiales afectados. Es decir, no se trata de un análisis de taludes o de macizos, sino de una caracterización de los materiales presentes en el sitio.

Se investigaron diferentes grados de alteración, pero solo de la alteración hidrotermal y no se investigará ningún otro tipo de alteración.

1.3.2. Limitaciones

La investigación realizada se trata de rocas alteradas hidrotermalmente en el km 48 de la Ruta 27 a Caldera y no a lo largo de toda la Ruta. Los resultados obtenidos tienen la limitación de que solamente aplican para ese sitio. Esto se debe a que cada contexto geológico tiene diferentes características y particularidades a tener en cuenta. Esto es propio de las investigaciones geotécnicas, pues se estudia materiales que pueden cambiar drásticamente en distancias relativamente pequeñas.

Una limitación propia del estudio de macizos rocosos es el factor de escala. Esto quiere decir que los resultados obtenidos para un testigo de pequeñas proporciones no se pueden transferir directamente al macizo rocoso. Esto se debe a la heterogeneidad del macizo y a las discontinuidades locales y generalizadas que se puedan dar.

Debido a limitaciones económicas y de equipo no se realizarán pruebas triaxiales de rocas en el laboratorio. Otra limitación es la representatividad, ya que los ensayos son puntuales y pueden no representar bien la heterogeneidad (González de Vallejo, 2002). La investigación utiliza materiales tomados directamente de los macizos expuestos en el km 48 de la Ruta 27, pero también de bloques sueltos tomados en ese mismo km por lo que de estos no se puede asegurar su procedencia, aunque sí se puede constatar la presencia de alteración hidrotermal.

Capítulo 2. Marco teórico y Metodología

La presente investigación abarca los diferentes aspectos del estudio de los materiales rocosos. Se dividen los aspectos a caracterizar en tres: primero desde un punto de vista mineralógico, luego en cuanto a sus propiedades físicas y por último en cuanto a sus propiedades mecánicas.

2.1. Mineralogía

La determinación de los minerales presentes en la roca es de suma importancia para una caracterización a fondo del material rocoso. Son precisamente los diferentes minerales, y las interacciones entre ellos, los que llevan a diferentes comportamientos geotécnicos. En esta investigación es de particular interés este aspecto, debido a que la alteración hidrotermal produce diferentes minerales. Si estos se cuantifican e identican, se puede determinar más certeramente el grado de alteración.

2.1.1 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal es un término que engloba diferentes tipos de alteraciones en las rocas, en las cuales un fluido hidrotermal de agua caliente, vapor o gas, proporciona los reactivos químicos para que se dé un reemplazo de los minerales originales de roca por nuevos. Dependiendo del grado de alteración, la textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente transformada hasta el punto que ya no es reconocible su textura original (Fernández, 1984). La alteración hidrotermal de materiales volcánicos que se reemplazan son por ejemplo la plagioclasa, ortoclasa, cuarzo, biotita, muscovita, anfíboles, piroxenos y titanomagnetita. En ambientes litológicos sin presencia de metamorfismo, estos minerales pueden ser reemplazados con materiales de alteración como por ejemplo: cuarzo, otras formas de silicatos (calcedonia, ópalo, silicato amorfo),

ilita, sericita, esmectita, clorita, serpentina, albita, pirita, carbonatos, talco, caolinita, pirofilita, sulfatos y óxidos (Shanks, 2010)

En la formación de los nuevos minerales uno de los factores más influyentes para determinar el tipo y la intensidad de la alteración hidrotermal es la temperatura, que suele estar en el rango de 150-400 °C. En particular la diferencia de la temperatura entre la roca y el fluido es lo determinante. Entre mayor sea la diferencia entre la temperatura de la roca y el fluido, mayor será la alteración. El otro factor más determinante es la composición del fluido, de particular importancia es el pH del fluido, mientras más bajo sea el pH del fluido hidrotermal, mayor será el efecto de alteración que genera. Una mayor acidez en el fluido que atraviesa la roca genera una modificación mayor de los minerales originales.

Otro factor que influye en este fenómeno es por ejemplo la permeabilidad de la roca, ya que entre menos permeable sea la roca madre más resistente será a los efectos de la alteración hidrotermal debido a que se le dificultará el flujo del agua caliente que genera la alteración. También el tema de la composición de la roca, en cuanto a proporción de materiales y diferentes tipos de roca más o menos susceptibles a la alteración es importante, Por último otros factores importantes son la duración de la interacción entre el agua y la roca y las proporciones entre ellas, así como la presión a la que se encuentre la roca que puede generar ebullición de fluidos y fracturamiento hidráulico (Maksaev, 1991).

La alteración hidrotermal se puede manifestar en un sitio en diferentes intensidades. En una intensidad débil, se alteran solo algunos de los minerales originales, no se permea toda la roca y aun se puede reconocer la textura original de la roca madre, en particular en este estado puede ser difícil distinguirla de la simple meteorización. Las matrices con

minerales vidriosos son particularmente susceptibles a la alteración hidrotermal y pierden fácilmente sus características. Se convierte fácilmente a ópalo, smectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla. Cuando el grado de alteración es alto, las rocas se alteran profusamente por lo que prácticamente todas las fases de la roca se han reemplazado a nuevos minerales. En particular en estos casos se dificulta la determinación del origen litológico de la roca en cuestión (Shanks, 2010).

En cuanto a las propiedades de la roca, una mayor permeabilidad permite que la roca sea más invadida por el flujo. Además la composición de la roca interviene en el tipo de la alteración que se produce porque hay algunos minerales más susceptibles a ser alterados que otros. Otro factor importante es la presión, ya que afecta el punto de ebullición de los líquidos y la fracturación del macizo.

Grandes masas de fluidos a temperatura alta fluyen a través de la roca permeable por medio de diaclasas o estructuras porosas. La alteración en sí se da debido a que no hay un equilibrio termodinámico entre el fluido y las rocas adyacentes. Por esta razón los minerales originales de la roca se intercambian. En el Cuadro 2.1. se puede apreciar cuáles minerales de alteración se generan como productos de diferentes materiales.

Cuadro 2. 1. Minerales de reemplazo en alteración hidrotermal.

Mineral original	Productos de reemplazo
Vidrio volcánico	Zeolitas, cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas
Magnetita/ilmenita/titanomagnetita	Pirita, leucoxeno, esfena, pirrotina, hematita
Piroxena/anfíbola/olivino/calcita/biotita	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita
Plagioclasa cálcica	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, montmorillonita, epidota
Ortoclasa/sanidina	Adularia

Fuente: Maksaev (1991).

Como se mencionó previamente, el fenómeno de la alteración hidrotermal es un concepto análogo que se dice de muchas realidades diferentes. Se puede clasificar el fenómeno según el material más común en la roca alterada (silicificación, sericitización, etc.) o usar el tipo de reacciones químicas que se dieron durante el proceso o bien se puede clasificar el fenómeno según la asociación de minerales que se den. Esta última forma es muy adecuada debido a que con un tipo de asociación ya se hace referencia a unas condiciones de temperatura, presión, composición química, mineralogía y el tiempo que tomó (Maksaev, 1991).

Una de estas clasificaciones, propuesta por Meyer y Hemley (1967), identifica cinco tipos: propilítica, argilítica intermedia, argilítica avanzada, sericítica y potásica. La alteración hidrotermal potásica se caracteriza por la presencia de feledespatos potásicos y biotitas. La propilítica se caracteriza por la presencia de clorita, epidota y calcita. La argilítica es cuando se forma caolinita o montmorillonita. La sericítica se caracteriza por el desarrollo de sericita y cuarzo secundario. También se da la silifización que se caracteriza por la destrucción parcial o total de la textura de la roca y un reemplazo por cuarzo, calcedonia entre otros.

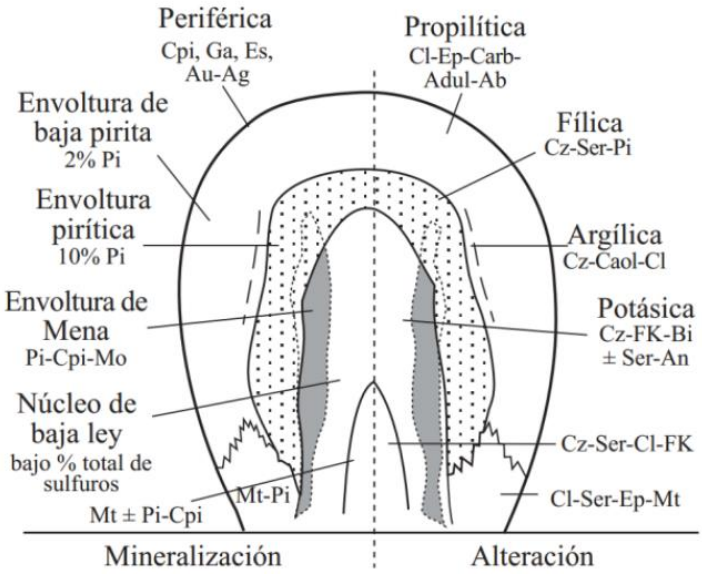


Figura 2. 1. Tipos de alteración hidrotermal asociados a tipos de mineralización. Modelo de Lowell-Guilbert.

Fuente: Ale et al (2012).

En la figura 2.1.se muestra el modelo de Lowell-Guilbert que ayuda a ilustrar la como se distribuyen los diferentes tipos de alteración en un macizo. Los tipos principales de alteración hidrotermal y los minerales que son sus productos se resumen en el Cuadro 2.2.

Cuadro 2. 2. Tipos diferentes de alteración hidrotermal y sus productos.

Clasificación	Productos
Propilítica	Epidota, clorita, albita, calcita, pirita
Argilítica Intermedia	Caolinita, montmorillonita, smectita, arcillas amorfas. Posiblemente sericita
Sericítica o cuarzo sericítica	Sericita y cuarzo y posiblemente caolinita
Argilítica avanzada	Dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo.
Potásica	Feldespatos, biotita,

Fuente: Victor Maksaev (1991)

Los efectos de la alteración hidrotermal pueden ser muy variados, por lo que se dificulta describirlos de forma general. Sin embargo se puede esperar cambios de aumento o disminución en la densidad, en la porosidad, permeabilidad, resistividad y susceptibilidad magnética. Lo mismo ocurre con la resistencia a la compresión: si bien cierto tipo de alteración hidrotermal lleva a una pérdida considerable de la competencia de la roca, por otro lado ciertos procesos de silificación lleva a generar cuarzo por lo que más bien se aumenta la resistencia de la roca. Dependiendo del tipo de alteración que se identifique se puede precisar mejor los cambios esperados.

Que haya una variedad tan grande de efectos posibles debido a la alteración hidrotermal se debe a que el término engloba muchos procesos geológicos diferentes.

2.1.2. Ensayos para determinar Mineralogía

A continuación se resume el aspecto teórico de los principales ensayos que se pueden utilizar para caracterizar las propiedades mineralógicas de un material rocoso.

Ensayo petrográfico

Se trata de una metodología especializada y un área de estudio de la Geología. Consiste en utilizar microscopios petrográficos para analizar las rocas preparadas en capas delgadas. De esta forma se califica cualitativamente y cuantitativamente, la composición mineralógica de la roca. Además, se puede analizar la estructura de la roca. Se determinan las propiedades ópticas de los cristales individuales (Aragonés, 1984) en microscopios como los que se muestran en la Figura 2.2.

Figura 2. 2. Ejemplos de microscopios para petrografía.

Fuente: http://www.imcyc.com/

Ensayo de difracción de rayos X

Por medio del método de la difracción de rayos X se puede analizar la sombra que imprimen los materiales con el objetivo de cuantificar las proporciones presentes en el material. Se pulveriza la muestra y se somete a radiación X. Dependiendo de los minerales que se hallen presentes en la muestra, los rayos X se reflejan en diferentes ángulos. Los espectros obtenidos de la muestra se comparan con una base de datos de espectros conocidos para diferentes materiales. En la Figura 2.3. se da un ejemplo de una máquina de difracción de rayos-X.

Figura 2. 3. Ejemplo de difractómetro.

Fuente: http://www.upct.es/

Prueba de azul de metileno

La prueba de azul de metileno sigue la norma de ASTM C837. Esta prueba consiste en una medición de la adsorbción en arcillas del tinte azul de metileno mediante el cálculo de índice de azul de metileno. En la norma se explica que muchas pruebas realizadas indican una relación proporcional entre el índice de azul de metileno (MBI en inglés) y propiedades fundamentales de las arcillas como capacidad de intercambio de cationes y fuerza cohesiva seca. Cuando la porción coloidal es caolinita también hay una correlación directa con la superficie específica, determinada mediante la adsorbción de nitrógeno.

Ensayo para determinar valor del pH

Con el objetivo de tener más información sobre las características minerales de las rocas se podría realizar un ensayo para determinar el valor del pH de las rocas. Se trata de

calcular cuán ácido o base son los materiales. Se seguirá el ensayo ASTM D4972 para la determinación del pH usando las rocas pulverizadas alteradas en diferentes grados.

Esto es importante porque se relaciona con el efecto que pueden tener con concretos hidráulicos y con el acero de refuerzo utilizado en los principales métodos de soporte geotécnico. La presencia de ácidos libres provenientes de los minerales en las rocas podría disolver el concreto y agregados que tengan carbonatos y corroer los elementos de acero.

Análisis termogravimétrico

El análisis en el Termoanalizador Gravimétrico en el que se puede evaluar el comportamiento y las propiedades de los materiales respecto a la temperatura. Estas técnicas se fundamentan en medir el peso de una muestra frente al tiempo sometiendo la muestra a un programa de temperatura controlado en una atmósfera específica. Según lo que se desee determinar se puede someter a un programa isotermo, a un calentamiento a velocidad constante, un enfriamento, o combinaciones de estos. Este método puede detectar procesos como descomposición, sublimación, reducción, desorción, absorción, etc.

Espectroscopia de Absorción Atómica

Por medio de un espectofotómetro se puede realizar un análisis de espectroscopia de absorción atómica. Este es un método para la determinación elemental de los componentes de los materiales. La técnica se basa en medir la presencia de los diferentes elementos dependiendo de su absorción a una longitud de onda particular. La muestra primero se nebuliza mediante distintos métodos.

Si bien se llevarán a cabo algunos de estos ensayos, otros quedarán para etapas futuras de investigación.

2.2. Propiedades físicas

Es parte central de la presente investigación realizar una caracterización de las propiedades físicas de las muestras de rocas. Esto se refiere a características como la densidad, la gravedad específica, absorción, etc.

Gravedad específica, densidad y absorción

El mismo ensayo que se usa para el agregado grueso se puede usar para determinar la gravedad específica, densidad y absorción de testigos de roca. Se usa como norma de referencia la ASTM C 127. Estas son unas de las propiedades básicas que se determinan en el estudio geotécnico de rocas. De forma general se sumerge la muestra en agua por 24 horas para saturar los poros y por medio del desplazamiento de agua se determina el volumen de la muestra y luego de secar el espécimen se determina su masa. En el Cuadro 2.3. se enumeran valores típicos de peso específico y porosidad para diferentes tipos de roca.

Cuadro 2. 3. Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas.

Roca	Peso específico (g/cm^3)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10-15
Anfibolita	2,9-3,0	-
Arenisca	2,3-2,6	5-25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0,1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20 (11,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0,1-0,5
Creta	1,7-2,3	30
Diabasa	2,9	0,1
Diorita	2,7-2,85	-
Dolomía	2,5-2,6	0,5-10
Esquisto	2,5-2,6	3
Gabro	3,0-3,1	0,1-0,2
Gneiss	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5-1,5 (0,9)
Grauvaca	2,8	3
Mármol	2,6-2,8	0,3-2 (0,6)
Lutita	2,2-2,6	2-15
Pizarra	2,5-2,7	0,1-1
Riolita	2,4-2,6	4-6
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

(González de Vallejo, 2002)

2.3. Propiedades mecánicas

Tanto la mineralogía como las propiedades físicas describen la roca que se está estudiando. Sin embargo, para un estudio desde la ingeniería civil, es de mayor importancia aún describir y conocer a profundidad el comportamiento mecánico. En este apartado se describe el fundamento teórico de los principales ensayos mecánicos.

Ensayo de compresión uniaxial

Este es el ensayo más simple que se realiza sobre testigos de roca para obtener valores de la resistencia uniaxial no confinada de la roca. Se usa la nomenclatura σ_c para denominar este parámetro. Además este ensayo permite conocer las constantes elásticas de la roca como el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (v) y también la curva de esfuerzo-deformación.

El módulo de Young se calcula dividiendo el cambio en esfuerzo entre el cambio de la deformación unitaria axial, en un tramo en el que el comportamiento sea homogéneo. Por otro lado el módulo de Poisson se obtiene de forma análoga dividiendo el cambio en la deformación unitaria transversal entre la deformación unitaria axial.

$$E = \frac{\sigma_{ax}}{\varepsilon_{ax}} \quad \nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}}$$

En la Figura 2.4. se muestra un gráfico que ejemplifica la relación del módulo de deformación con el gráfico de deformación unitaria contra esfuerzo y que ayuda a ilustrar la interacción entre las diferentes propiedades que intervienen en la relación esfuerzo-deformación.

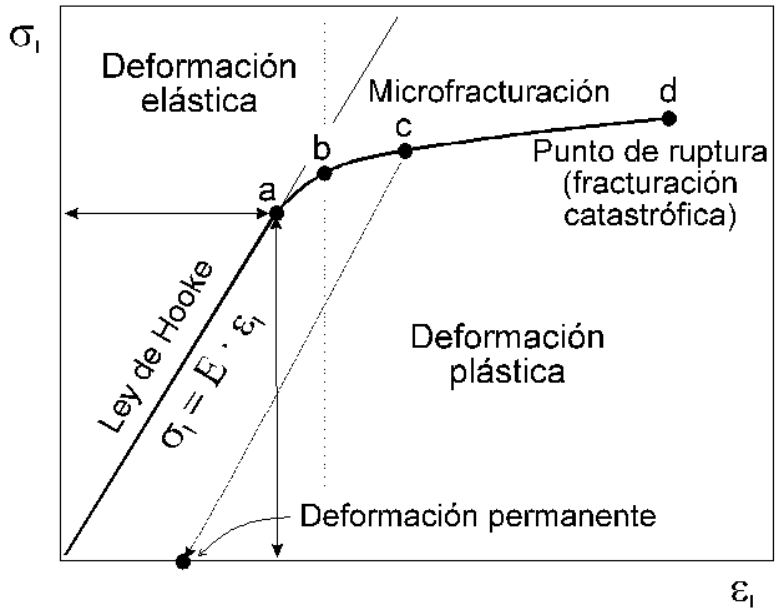


Figura 2. 4. Gráfico de cálculo de módulo de Young.

(García Casco, 2007)

Algunos de los factores que influyen en los resultados del ensayo pueden ser la forma y el volumen de la probeta. También puede influir que la roca sea anisótropa por lo que la dirección de la carga tendría influencia en los resultados. Por esto es que es conveniente seguir un proceso normado para la realización de los ensayos, como la normativa de la ASTM D2938.

En el siguiente cuadro tomado de González y Vallejo (2002) se muestran los valores típicos de resistencia a compresión uniaxial inconfinada de la matriz rocosa sana.

Cuadro 2.4. Valores típicos de resistencia compresión uniaxial inconfinada de la matriz rocosa sana para diferentes tipos de roca.

Roca sana	Resistencia a compresión inconfinada de la matriz rocosa sana (kg/cm^2)	
	Valores medios	Rango de valores
Andesita	2.100-3.200	1.000-5.000
Anfibolita	2.800	2.100-5.300
Anhidrita	900	800-1.300
Arenisca	550-1.400	300-2.350
Basalto	800-2.000	600-3.500
Caliza	600-1.400	500-2.000
Cuarcita	2.000-3.200	1.000-5.000
Diabasa	2.400-3.500	1.300-3.650
Diorita	1.800-2.450	1.200-3.350
Dolerita	2.000-3.000	1.000-3.500
Dolomía	600-2.000	500-3.500
Esquisto	300-600	200-1.600
Gabro	2.100-2.800	1.800-3.000
Gneiss	600-2.100	500-2.500
Granito	700-2.100	500-3.000
Grauvaca	1.000-1-500	800-2.200
Limolita		350-2.500
Lutita	200-400	100-900
Marga	300-700	200-900
Mármol	1.200-2.000	600-2.500
Pizarra	400-1.500	300-2.000
Sal	120	50-300
Toba		100-460
Yeso	250	100-400

Fuente: González de Vallejo, (2002).

Luego en en el cuadro 2.5. se muestran los valores típicos de resistencia a la compresión de la matriz rocosa sana para diferentes tipos de rocas. Ambos cuadros serán de utilidad al comparar los resultados obtenidos con los valores típicos.

Cuadro 2.5. Valores típicos de constantes de resistencia de la matriz rocosa sana para diferentes tipos de roca.

Roca sana	Módulo de elasticidad estático, E kg/cm^2 ($x10^5$)	Coeficiente de Poisson, v
Andesita	3,0-4,0	0,23-0,32
Anfibolita	1,3-9,2	
Anhidrita	0,15-7,6	
Arenisca	0,3-6,1	0,1-0,4
		(0,24-0,31)
Basalto	3,2-10	0,19-0,38
		(0,25)
Caliza	1,5-9,0	0,12-0,33
	(2,9-6,0)	(0,25-0,30)
Cuarcita	2,2-10	0,08-0,24
	(4,2-8,5)	(0,11-0,15)
Diabasa	6,9-9,6	0,28
Diorita	0,2-1,7	
Dolomía	0,4-5,1	0,29-0,34
Gabro	1-6,5	0,12-0,20
Gneiss	1,7-8,1	0,08-0,40
	(5,3-5,5)	(0,20-0,30)
Esquisto	0,6-3,9	0,01-0,31
	(2)	(0,12)
Granito	1,7-7,7	0,1-0,4
		(0,18-0,24)
Grauvaca	4,7-6,3	
Limolita	5,3-7,5	0,25
Lutita	0,3-2,2	0,25-0,29
Marga	0,4-3,4	0,1-0,4
Mármol	2,8-7,2	(0,23)
Pizarra	0,5-3,0	
Sal	0,5-2,0	0,22
Toba	0,3-7,6	0,24-0,29
Yeso	1,5-3,6	

Fuente: González de Vallejo, (2002).

Este ensayo es el más difundido para obtener parámetros de resistencia en el laboratorio, debido a que es más económico y requiere de maquinaria más sencilla que el ensayo triaxial. En el Cuadro 2.5. se enumeran valores típicos de módulo de deformación elástica

y coeficiente de Poisson para diferentes tipos de roca. El resultado obtenido es muy importante ya que es el ensayo en el que más experiencia se tiene en diferentes obras. Por esta misma razón es el parámetro con el que se trabaja en los sistemas de clasificación de roca.

Ensayo triaxial

El ensayo de compresión triaxial intenta representar las condiciones reales in situ de las rocas en cuanto a los esfuerzos confinantes. Para asemejar estas condiciones ejerce presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta. Variando las presiones se logra obtener la envolvente de resistencia de donde se extraen los parámetros de cohesión (c) y el ángulo de fricción (Φ).

Los datos que se registran son el esfuerzo axial, la deformación axial y el ángulo del plano de fractura. Los resultados varían con la presión confinante aplicada y así reflejan posibles comportamientos de la roca a diferentes condiciones in situ.

Aunque los resultados de este tipo de ensayos son muy valiosos para la caracterización de la roca, existe el inconveniente de que es oneroso y su equipo es muy especializado. Por estas razones solo se utiliza para obras de envergadura considerable y pocos laboratorios están en condiciones de llevarlo a cabo.

Ensayo de resistencia a tracción

Un tercer tipo de ensayos que se utilizan para determinar parámetros de resistencia de la roca son los ensayos de resistencia a tracción.

Por un lado está el ensayo de **tracción directa** en el que se sujeta firmemente por sus extremos la probeta y se aplica fuerza traccional uniaxial en la dirección de la mayor longitud de la probeta hasta la rotura. Este ensayo es difícil de realizar debido a la

dificultad del tallado de las muestras y asegurar que haya una buena conexión entre la muestra y los cabezales.

Por otro lado existe el ensayo de **tracción indirecta** o prueba brasileña. En este ensayo se somete el testigo a un estado de esfuerzos biaxial. Se toma como supuesto que la falla se dará por tracción cuando hay un esfuerzo principal a tracción y otro compresivo de magnitud no superior a 3 veces el esfuerzo traccional. Para alcanzar este estado se aplica una carga vertical compresiva a una probeta que se coloca horizontalmente.

Ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento (Slake durability index)

Este es un ensayo común para valorar los efectos de la alteración en los materiales rocosos. Se somete el material a dos ciclos de humedad, secado y desmoronamiento de diez minutos. Se usa un equipo especial que consta de dos tambores con una malla exterior de 2 mm, parcialmente llenos de agua. Se gira los tambores un número determinado de veces, se extraen los pedazos que quedan dentro y se repite el proceso. Comparando el peso antes y después de los ciclos se determina un índice de durabilidad I_D. Para este ensayo se recomienda seguir la norma ASTM D 4644 – 08.

Ensayo de abrasión de los Ángeles

Una de las pruebas que se realizan en materiales que pueden servir como agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles. La resistencia a la abrasión es una propiedad geotécnica importante. En este ensayo se busca determinar la degradación del material que se coloca en un tambor rotatorio con esferas de acero. Luego de una cantidad específica de revoluciones se calcula qué porcentaje del material se ha quebrado en pedazos más pequeño. Este ensayo está normado por la ASTM con la norma C 535-12.

Carga puntual (Point load test)

También es denominado ensayo Franklin y sirve para determinar la resistencia a compresión uniaxial inconfinada de trozos de roca irregulares o testigos de exploraciones. Del ensayo se obtiene un índice I_s que se relaciona con la compresión uniaxial inconfinada. El ensayo es más fiable si se ensayan testigos y no se recomienda para rocas blandas o con fuerte anisotropía. A lo largo el testigo debe ser alrededor de 1,5 veces el diámetro. Se usa la norma ASTM D 5731-08. En la Figura 2.5. se muestra un diagrama del equipo que se utiliza para esta prueba.

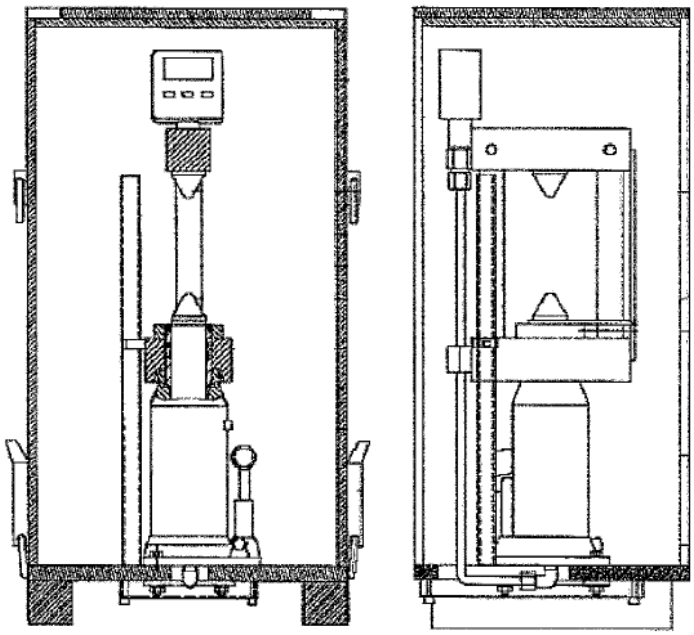


Figura 2. 5. Equipo de carga puntual.

Fuente: ASTM, (2008).

Martillo de Schmidt

Este ensayo se puede realizar en campo y permite aproximar la resistencia a compresión uniaxial inconfinada de la matriz rocosa. Mediante un golpe del martillo se mide el rebote y se correlaciona con la resistencia.. Se recomienda realizar entre cinco y diez mediciones

en cada punto de examinación. La Figura 2.6. es una fotografía de un martillo de Schmidt para ilustrar el equipo utilizado en la prueba.

Figura 2. 6. Martillo Schmidt.

Fuente: ASTM, (2013).

2.4. Sistemas de clasificación de rocas

Se han desarrollado diferentes sistemas que procuran clasificar empíricamente los macizos rocosos para estimar el soporte temporal que se debe proveer a las obras subterráneas, para clasificar las rocas según su competencia geomecánica y para el análisis de excavaciones a cielo abierto.

En los siguientes apartados se mencionan los aspectos básicos de los principales sistemas de clasificación de macizos rocosos que se usan alrededor del mundo.

Sistema Q

El sistema Q fue desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974 y ha sido actualizado luego por Barton en 2000. Dichos autores usaron evidencia y experiencia acumulada sobre estudios en gran número de túneles. Es un sistema orientado a estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas. Se basa en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \cdot \frac{Jr}{Ja} \cdot \frac{Jw}{SRF}$$

El primer término se refiere de la ecuación se refiere al tamaño de los bloques, ya que toma en cuenta el *RQD* y el *Jn* que es un índice que depende de la cantidad de juegos de discontinuidades.

El segundo término tiene que ver con la resistencia al corte entre los bloques. Por eso tiene el *Jr* (índice de rugosidad de las discontinuidades) y el *Ja* (índice que indica la alteración de las discontinuidades). Evidentemente el término *Ja* es uno que se ve muy afectado por el fenómeno de la alteración hidrotermal.

Por último el tercer término trata de la influencia del estado tensional. El factor *Jw* es un coeficiente reductor por la presencia de agua y el SRF es el "stress reduction factor", que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Sistema RMR

Este es un sistema llamado "Rock Mass Rating" y fue desarrollado en 1973 por Bieniawski y se actualizó en 1989. Este sistema de clasificación de macizos rocosos permite relacionar

índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y criterios de excavación y sostenimiento. En esta consultoría se utilizó la versión actualizada de 1989.

Esta clasificación toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- Grado de fracturación representado por el RQD
- Espaciado de las discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades (Persistencia, Abertura, Rugosidad, Relleno, Alteración)
- Condiciones hidrogeológicas
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación

El RMR varía de 0-100 mejorando la calidad conforme aumenta la puntuación. Según el RMR se clasifican los macizos en cinco clases, como se muestra en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR

Clase	Calidad	RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	> 4 kg/cm^2	> 45°
II	Buena	80-61	3- 4 kg/cm^2	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm^2	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm^2	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm^2	<15°

Fuente: González de Vallejo, 2002.

Se puede ver que incluye estimaciones para la cohesión y el ángulo de rozamiento. A partir del valor calculado del RMR se puede por ejemplo estimar el soporte temporal recomendado.

Como se observa entonces, la resistencia a la compresión inconfinada es la propiedad mecánica de la roca intacta más utilizada en la geomecánica. Forma parte directa o indirecta de las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos, por lo tanto una variación en los valores de esta propiedad afecta la resistencia del macizo rocoso y por ende su calidad o competencia, de la cual depende la estabilidad de muchas obras civiles.

2.5. Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 2.7.

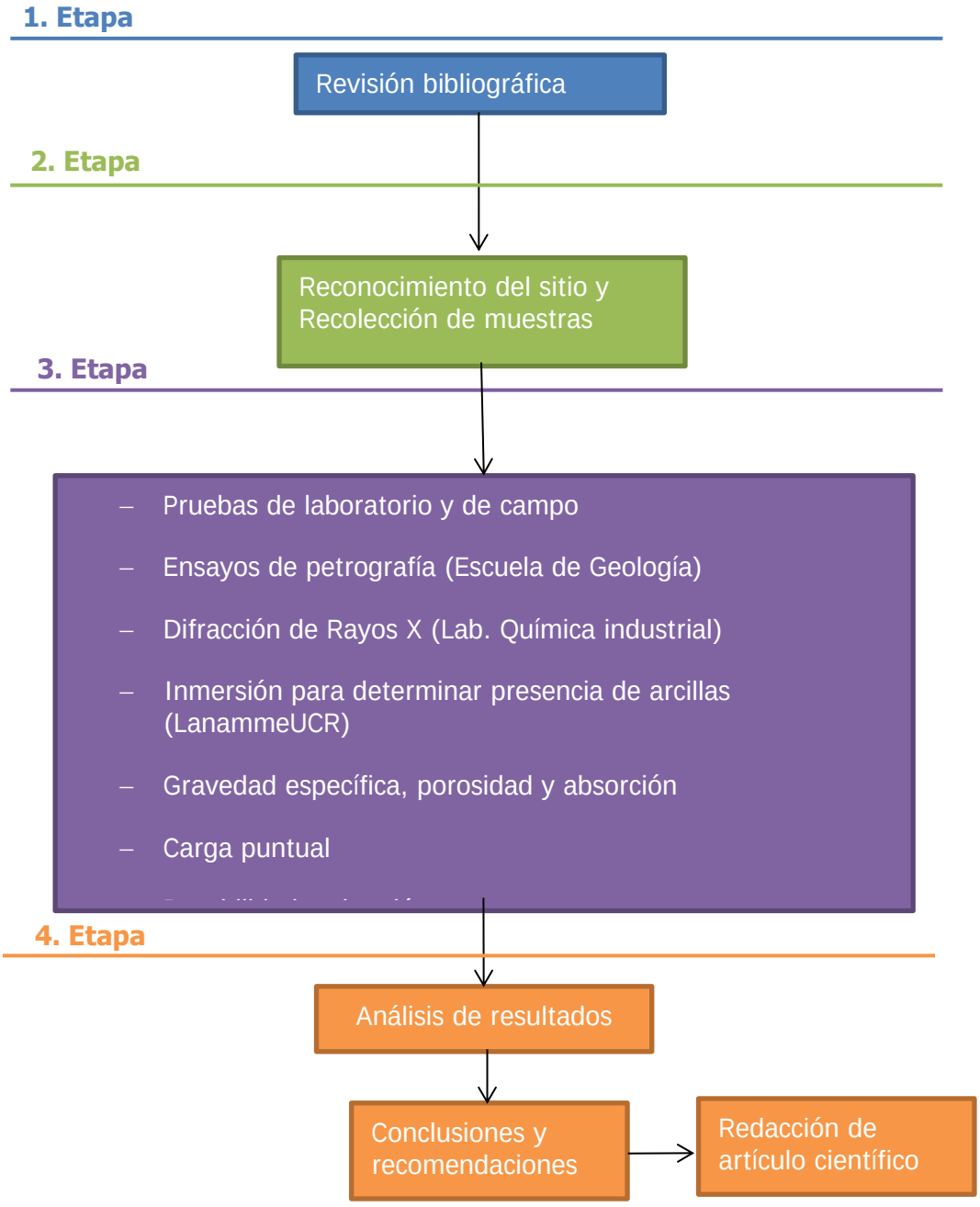


Figura 2. 7. Diagrama de flujo de la metodología a usar.

1. Etapa

La investigación realizada se dividió en cuatro etapas. La primera fase consistió en una revisión bibliográfica sobre las investigaciones afines y material de referencia sobre el tema.

2. Etapa

La siguiente etapa planteó la visita de reconocimiento al sitio de estudio para valorar la disponibilidad de equipo y la facilidad de acceso para la recolección de las muestras. Se recolectan las muestras necesarias con diferentes grados de alteración.

3. Etapa

La tercera fase de la investigación es la del desarrollo experimental, ya con el muestreo realizado.

Luego de tener la cantidad de muestras necesarias se procedió a realizar los ensayos en el laboratorio. En este momento se debe clasificar cualitativamente los fragmentos según el grado de alteración.

Se realizan los dos primeros ensayos que son el de petrografía y el de difracción de rayos X. El primero se hace en la el Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, UCR y el segundo en el Laboratorio de Química Industrial de la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica, UCR. Con estos dos ensayos se tendrá claridad en cuanto al grado de alteración y se puede cerciorar si verdaderamente en los fragmentos se ha dado alteración hidrotermal.

Seguidamente se prosigue con los ensayos de laboratorio que se realizarán en el laboratorio de Geotecnia y Asfaltos del LANAMME.

El primer ensayo a realizar será el de Gravedad específica, densidad y absorción según la norma C127.

Posteriormente se realizará el ensayo de carga puntual según la norma ASTM D5731-08.

El siguiente paso es realizar los ensayos de abrasión con la máquina de Los Ángeles y de durabilidad según las normas de ASTM C535-12 y D4644–08 respectivamente.

Por último se llevarán a cabo, si es posible, los ensayos con el termoanalizador gravimétrico y el espectofotómetro.

4. Etapa

La cuarta etapa consiste en recopilar los resultados de los diferentes ensayos para buscar conclusiones prácticas sobre los efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades de la roca. Se plantea la hipótesis de que la roca perderá competencia en la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada, lo cual tiene implicaciones a nivel de sistemas de clasificación de rocas y en el diseño estructural de las obras civiles que se construyan sobre este macizo.

Esta hipótesis se fundamenta sobre investigaciones mencionadas en la lista de referencias bibliográficas.

El último paso es la redacción de un artículo científico según las normas de la Escuela de Ingeniería Civil.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Escogencia del sitio de estudio: Visitas de campo

Después de considerar diferentes sitios que podían presentar alteración hidrotermal se decidió escoger el macizo expuesto por los cortes de la Ruta 27 en el kilómetro 48. Otros sitios considerados fueron Pocosol, el Cerro de la Muerte y el Tajo del Incofer cercano a Orotina, pero se decidió que era preferible el sitio de la Ruta 27 porque el macizo está expuesto y en una vía pública por lo que es de más fácil acceso. Además la carretera tiene un proyecto de expansión por lo que los resultados de este proyecto serán más pertinentes y prácticos.

3.1.1. Gira del 25 de Setiembre del 2013

La primera gira al sitio de estudio se realizó el 25 de setiembre del 2013. Además del estudiante autor de este proyecto, acudieron la Directora del Proyecto de Graduación y dos técnicos del Lanamme-UCR.

Se puede observar en la Figura 3.1. que para la construcción de la carretera se realizó un corte de varios metros de profundidad para el paso de la carretera y actualmente está expuesto. En la figura 3.2 también se puede apreciar la coloración característica generada durante la alteración hidrotermal.

Figura 3. 1. Talud de estudio en km 48 de Ruta 27

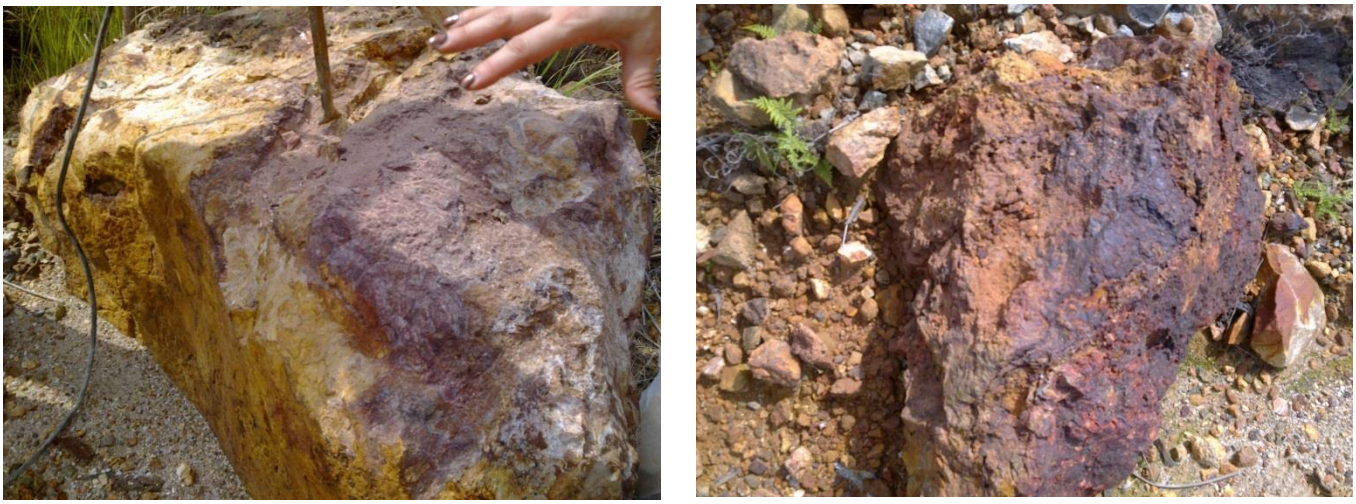


Figura 3.2. Rocas en diferentes grados de alteración.

Se identificó bloques sueltos en diferentes estados de alteración. En la Figura 3.3. se observa una de las zonas más alteradas. La coloración blanca indica la posible presencia de caolinita. El mal estado del material era tal que se desmenuzaba fácilmente con la mano.

Figura 3.3. Paredes del macizo más alteradas.

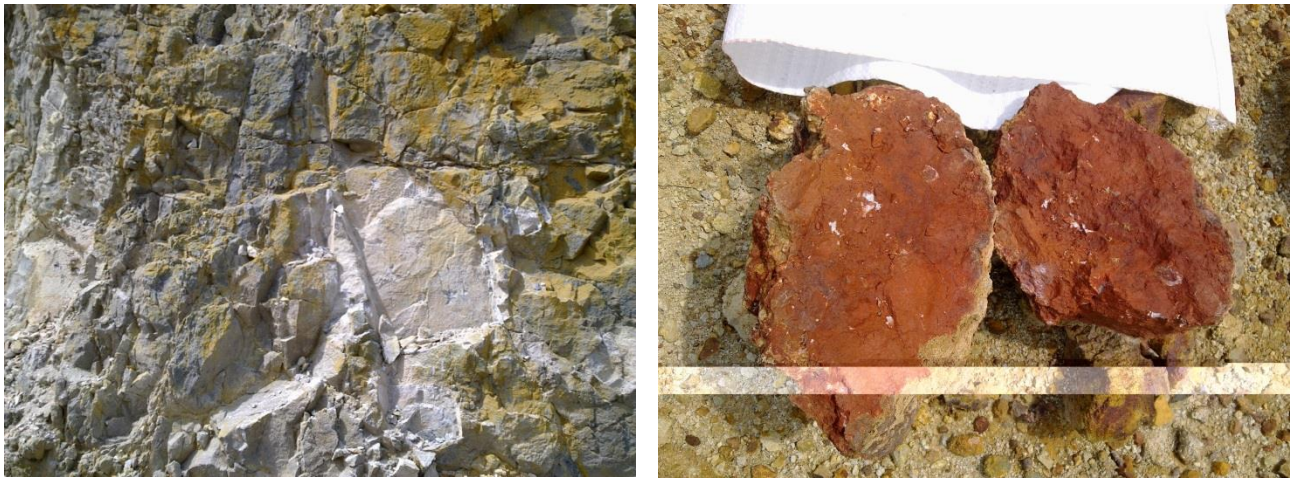


Figura 3.4. Uno de los bloques que por su coloración apuntaba a una alteración ferruginosa.

3.1.2. Gira del 10 de diciembre del 2013

Esta visita se realizó en compañía de un especialista en geología de medios volcánicos para constatar que la toma estuviera afectada hidrotermalmente y para reconocer los minerales y formaciones que se dan en el sitio.

Figura 3.5. Vista del talud en el que se observan las diferencias en materiales en distancias cortas.

Figura 3.6. Vista del talud en la que se observan las diferencias en materiales.

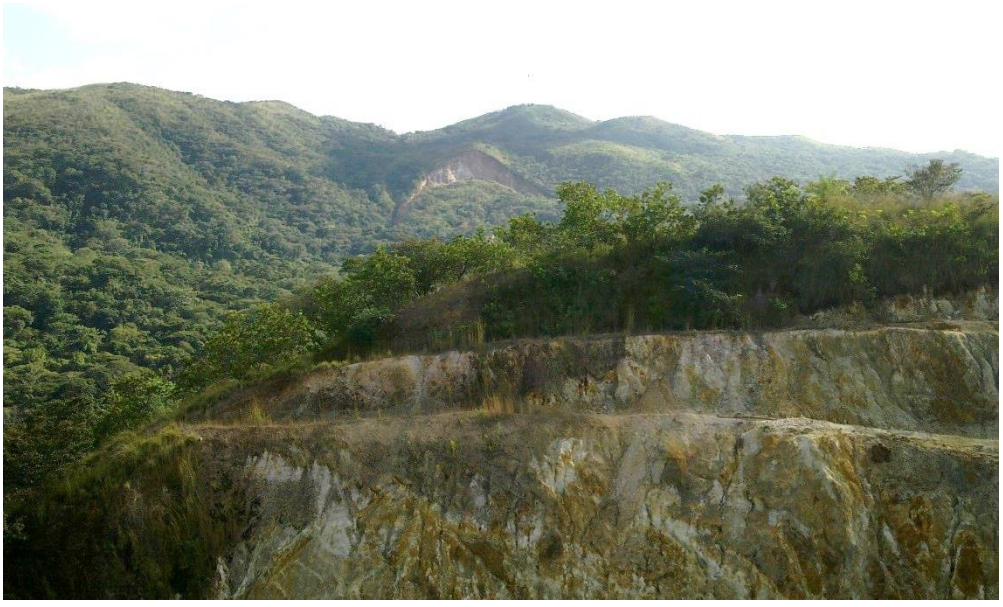


Figura 3.7. Fotografía a distancia de deslizamiento regional.

En la Figura 3.7. se puede apreciar un deslizamiento de gran tamaño a la distancia, el cual es de esperar se asocie a la acción de materiales alterados hidrotermalmente, pues se trata de condiciones similares. Esto aumenta la pertinencia de esta investigación. En la Figura 3.8. se observa que se deposita melanterita sobre el material. Además con el lente de geólogo se puede identificar el mineral pirita sobre las rocas. Según el experto estos hechos se implican mutuamente ya que la melanterita (FeSO4) se forma a partir de la transformación de la pirita (Fe2S).

Figura 3.8. Formación del mineral melanterita (FeSO4).

Son notorios los efectos que las condiciones geológicas han tenido sobre las obras de concreto y acero a lo largo de la Ruta 27. En el km 48 y en sus alrededores se han edificado obras de contención y soporte en los taludes generados por los cortes para la carretera. Se puede ver en varios puntos acero corroído y el concreto manchado de color naranja y dañado. Los recubrimientos sufren de agrietamiento que puede estar causado posiblemente por la expansión de los materiales afectados por la alteración hidrotermal. También se pueden observar cavidades que se generan entre esos recubrimientos y el material. Esto puede ser por cambio de volumen los materiales o bien porque el material de mala calidad se lave.

Evidentemente al cortar estos taludes, los materiales se exponen a condiciones ambientales distintas de las que tenían anteriormente. Por ejemplo el flujo de agua que puede bajar sobre sus caras, así como la exposición prolongada a la luz solar. Esto puede tener efectos de pérdida de masa.

3.2. Zona geológica

A continuación se presentará una descripción geológica de la zona del Monte del Aguacate. Sin embargo, para mayor información se remite a los trabajos de los geólogos que se mencionan como referencias. La primera identificación de la sucesión de rocas volcánicas en la zona fue de Dengo (1962). Posteriormente Castillo (1969) y Denyer & Arias (1991) fueron describiendo la estratigrafía. Luego también hay investigaciones realizadas a nivel petroquímico y de dataciones radiométricas en las rocas volcánicas que colocan las rocas en el Plioceno superior (Tournon, 1984 y Appel et al, 1994).

Ahora bien, la investigación más reciente e importante es la realizada por Porras, Cascante, Granados & Alvarado (2012) sobre la volcano-estratigrafía y tectónica de la zona. Se distinguen tres unidades geológicas: la unidad montañosa prominente, unidad de

transición y la unidad de planicie intramontaña. Según los mapas presentados en el artículo, la zona de estudio pertenece a la unidad montañosa prominente. La descripción es:

> "Corresponde con los relieves positivos propios de los Montes del Aguacate, los cuales sobresalen sobre las áreas adyacentes, debido a que corresponden con relictos volcánicos constituidos por rocas del Plioceno. Las morfo-estructuras presentan formas agudas y pendientes abruptas, algún producto del fuerte tectonismo y de la alteración hidrotermal, que favorece deslizamientos."

Además en el mismo artículo se describe el afloramiento que se escogió. Se menciona que se trata de una zona profusamente alterada hidrotermalmente con fuerte olor sulfurado (H2S). Son característicos la coloración variada del macizo "colores café, anaranjados y grises con tonos azulados". Para los autores esta zona pudo ser parte de:

> "un acuífero geotermal fósil en ebullición o de fase vapor, donde las fracturas posiblemente fueron utilizadas en el pasado como conductos preferenciales (chimeneas) para el transporte de fluidos ácido-sulfatados, en donde la transformación del H_2S en H2SO4, y quizá la presencia de HCl, causó lixiviación ácida y alteración argilítica, lo que se produce generalmente entre 100 y 300°C dando como resultado una roca con un carácter poroso y un residuo silíceo."

En general, las rocas volcánicas analizadas presentan una variación entre rocas medianamente sanas con coloración verdosa, hasta rocas muy hidrotermalizadas con colores blancos, amarillentos hasta rojizos según consultas al experto. Las rocas más sanas presentan una típica alteración propilítica con paragénesis mineralógicas caracterizadas por clorita, calcita, cuarzo, magnetita, pirita, zeolitas y epidota. Las rocas

más hidrotermalizadas presentan una alteración argilíca caracterizada por minerales arcillosos (caolinita, dickita y macita). Además de la clorita, sericita y posiblemente la presencia de hematita y jarasita. La presencia abundante de alunita y arcillas es un indicador de soluciones de ácido sulfúrico y temperaturas intermedias entre 100-300 °C que actúan sobre rocas ricas en plagioclasas. La melanterita, pirita y el fuerte olor a H_2S son pruebas de ello (ver Fig. 3.8.).

Si se asume que la presencia de anortita "solica", albita y diópsido corresponde con minerales secundarios y no primarios (magmática), entonces se podría pensar en una alteración potásica con temperaturas superiores a 300°C, aunque no hay biotita secundaria.

3.3. Propiedades mineralógicas

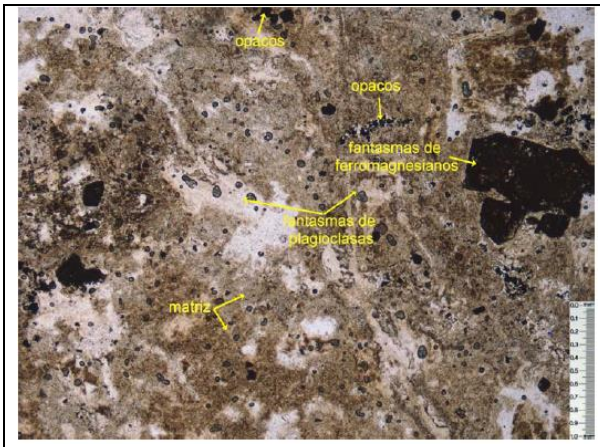
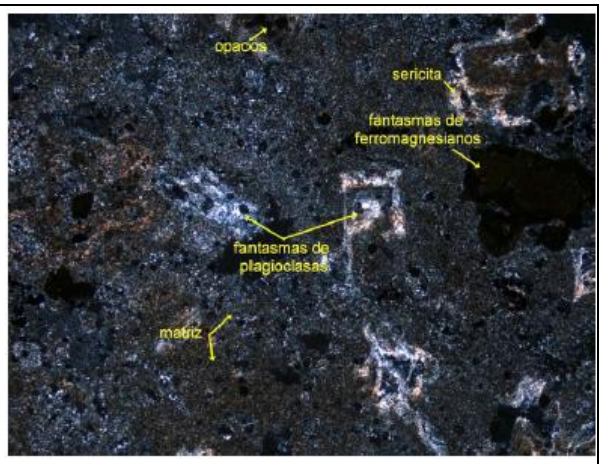
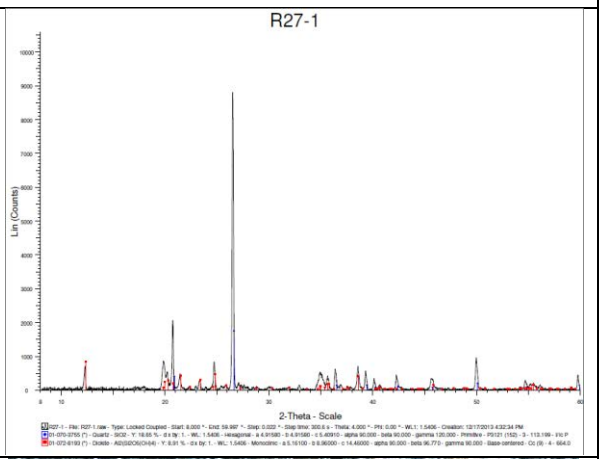
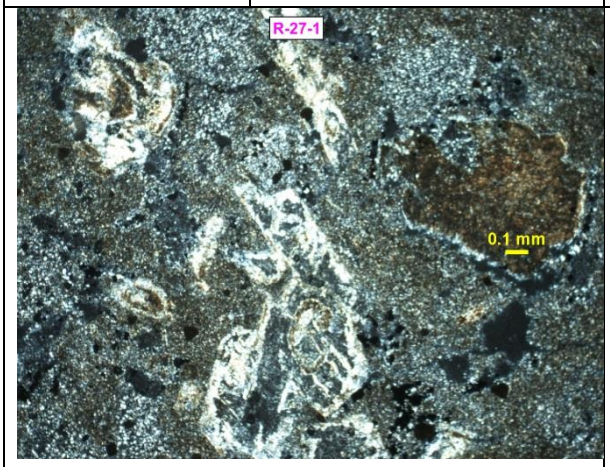
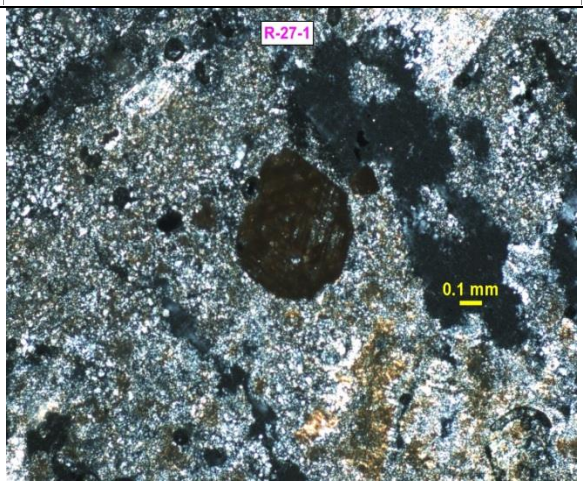
3.3.1. Petrografía

Se confeccionaron láminas delgadas de siete muestras diferentes de roca. Estas se numeraron de R27-1 a R27-7 y se les realizó un análisis petrográfico en la Escuela de Geología, UCR. Debido al grado de alteración de las muestras el departamento de Petrografía de la Escuela de Geología no recomendó hacerle el análisis a algunas de las muestras.

A continuación se presentan en los cuadros de 3.1. a 3.6. los resultados principales. En los Anexos se adjuntan los reportes de los resultados de ensayos mineralógicos, emitidos por la Universidad.

Cuadro 3.1. Resultados R27-1

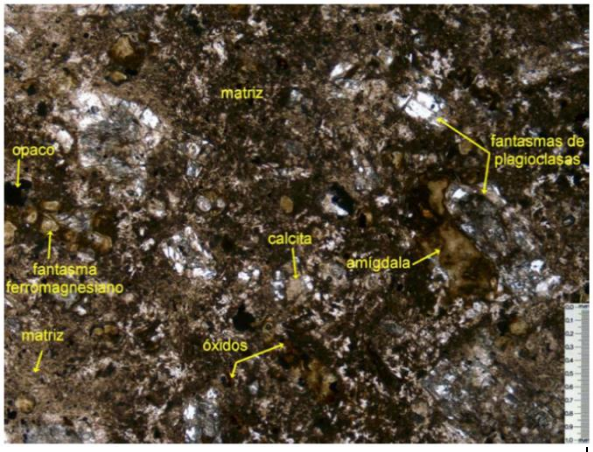
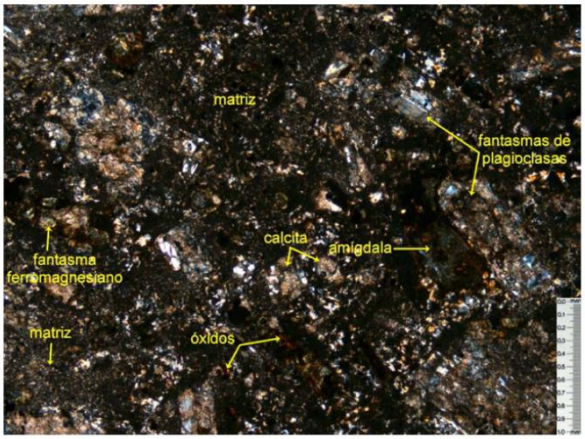
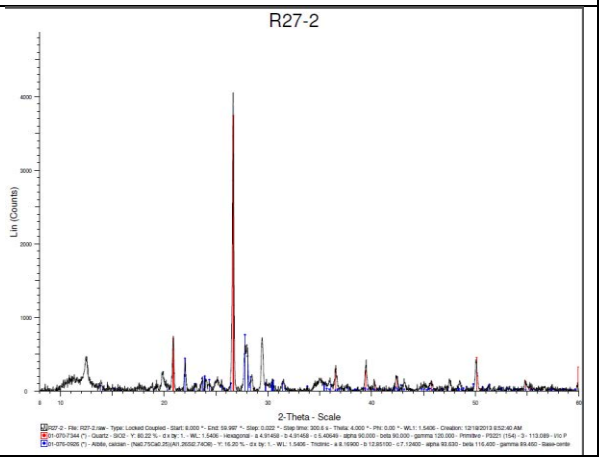
Designación	R27-1	
Nombre	Andesita propilitizada	
Macroscopía	Matriz verdosa-azulado, con partículas más claras. Lava (andesítica ?) porfirítica con fantasmas de fenocristales de plagioclasa, profundamente alterados a arcillas (caolín ?) al igual que la matriz, con algo de sílice y minerales opacos (magnetita y quizás pirita).	
Textura	holocristalina porfirítica con fantasmas de plagioclasa y minerales ferromagnesianos en una matriz recristalizada silícea.	
Composición mineralógica		
Fenocristales (23%)	-Plagioclasas alteradas: aproximadamente 13 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 2,25 x 1,75 mm. Se encuentran sustituidos por sericita, filosilicatos (arcillas) y zeolitas. -Opacos: aproximadamente 5%, xenomórficos, con tamaño máximo de 1,12 x 0,50 mm. Diseminados, en vetillas discontinuas y rellenando vesículas. -Minerales ferromagnesianos alterados (anfíboles): aproximadamente 5 %, con tamaño máximo de 1 x 0,50 mm. Completamente alterados a filosilicatos (arcillas).	
Matriz (72%)	De color café, recristalizada, compuesta principalmente por cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Además se observan en menor cantidad, zeolitas, sericita y epidota.	
Minerales de alteración	Minerales de alteración: presentes alterando minerales y en la matriz. -Cuarzo secundario: Diseminado en la matriz, además rellenando cavidades. -Arcillas: Alterando feldespatos, minerales ferromagnesianos y diseminadas en la matriz. -Óxidos de hierro: Alterando posibles minerales ferromagnesianos y diseminados en la matriz. -Sericita: Alterando plagioclasas y en la matriz. -Zeolitas: Alterando plagioclasas y en la matriz. -Epidota: en cantidades traza (<1%), diseminada.	

<table>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Aspecto general de la roca. Nicoles paralelos.</td><td>Aspecto general de la roca. Nicoles cruzados.</td></tr>
<tr><td>Difractometría</td><td>Cuarzo (SiO_2); Dickita $Al(Si_2O_5(OH)_4)$</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">R27-1A: Cristales fantasmas de plagioclasas en una matriz de arcillas y minerales opacos.</td><td>R27-1B: Cristales fantasmas de plagioclasas en la parte superior (forma tabular), un cristal opaco con estructura enrejada al centro y una matriz arcillosa por alteración de la matriz original.</td></tr>
</table>

La dickita y la nacrita son similares a la caolinita en estructura y composición química, pero son constituyentes menos importantes de los depósitos de arcilla.

Cuadro 3.2. Resultados R27-2

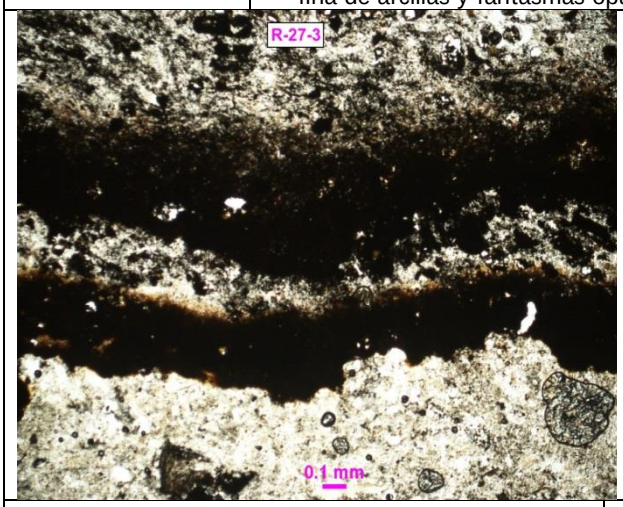
Designación	R27-2	
Nombre	Andesita volcaniclástica propilitizada	
Macroscopía	Roca volcaniclástica muy fracturada, matriz grisácea con partículas más claras.	
Textura	holocristalina porfirítica con fantasmas de plagioclasa y minerales ferromagnesianos en una matriz recristalizada silícea.	
Composición mineralógica		
Fenocristales (25%)	-Plagioclasas alteradas: aproximadamente 18 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 2,40 x 1,25 mm. Se encuentran alteradas a una mezcla de carbonatos, sericita, zeolitas, filosilicatos (arcillas). En algunos casos se observa un pequeño núcleo sano. -Minerales ferromagnesianos alterados (olivinos y piroxenos?): aproximadamente 5 %. Cristales xenomórficos a hipidiomórficos, con tamaño máximo de 1,12 x 0,30 mm. Los olivinos se encuentran alterados a serpentina y arcillas. -Opacos: aproximadamente 2 %, xenomórficos, con tamaño máximo de 0,32 x 0,25 mm.	
Matriz (73%)	De color café, recristalizada, compuesta principalmente por cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Además se observa en menor cantidad calcita y sericita.	
Minerales de alteración	Minerales de alteración: alterando minerales y diseminados en la matriz. -Calcita: Alterando feldespatos y en la matriz. -Sericita: Alterando feldespatos y en la matriz. -Cuarzo secundario: Diseminado en la matriz, además rellenando cavidades. -Zeolitas: Alterando feldespatos y diseminadas en la matriz. -Óxidos de hierro: Impregnaciones en la matriz. -Arcillas: Alterando feldespatos, minerales ferromagnesianos y diseminadas en la matriz. -Serpentina: Alterando olivinos. - Cloritas -Titanita?: Alterando feldespatos y diseminado en la matriz. Se presenta en cantidades traza.	

<table>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Aspecto general de la roca. Nicoles paralelos.</td><td>Aspecto general de la roca. Nicoles cruzados.</td></tr>
<tr><td>Difractometría</td><td>Cuarzo SiO2; Albita, calcita (Na0.75Ca0.25)(Al1.26 Si2.74 O8))</td><td> 
</td></tr>
</table>

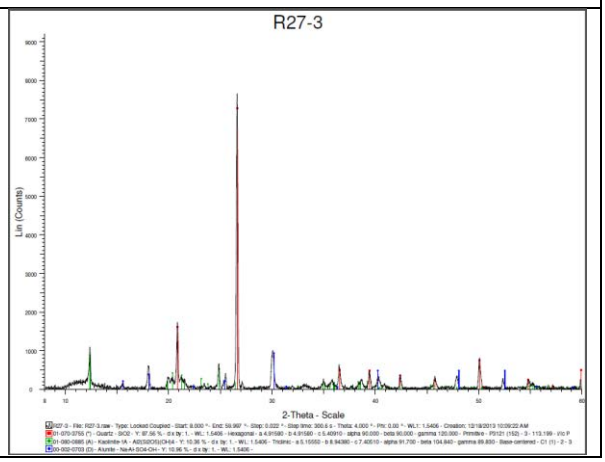
Cuadro 3.3. Resultados R27-3

Designación	R27-3
Nombre	Toba (?) hidrotermalizada
Descripción visual	Roca alterada y dura. Tiñe de color naranja al manipularla. Al cortarla el agua sale de un color naranja intenso.
Textura	
Composición mineralógica	

Fenocristales	
Matriz	
Minerales de alteración	El color naranja se puede deber a la jarosita, mientras los colores blancos pueden estar dados por la caolinita y alunita.
Otros rasgos	Roca muy alterada (toba ?) con hidróxidos de hierro en bandas y una matriz granular fina de arcillas y fantasmas opacitizados (minerales opacos) de antiguos cristales.



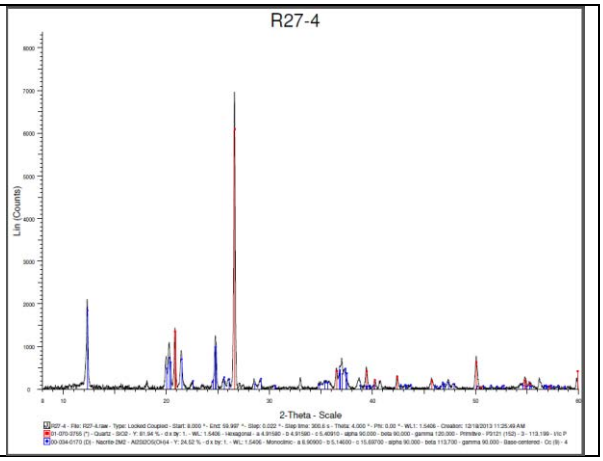
R-27-3: Bandas de hidróxidos de hierro.

Difractometría	Cuarzo, SiO_2, Caolinita-1A – $Al_2(SiO_5)(OH)_4$; Alunita - Na-Al-SO_4-OH	

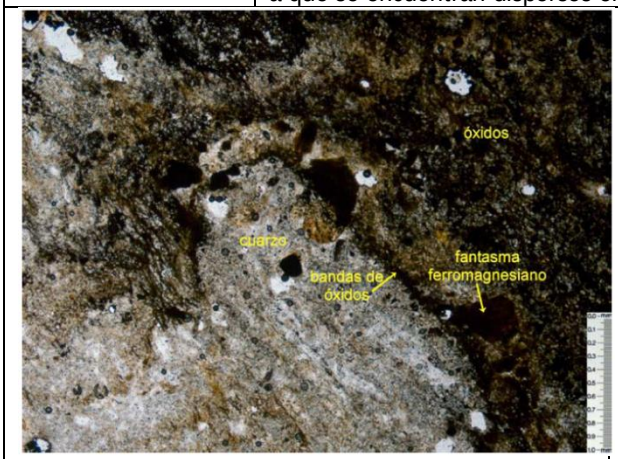
La alunita se forma generalmente por las soluciones de ácido sulfúrico que actúan sobre rocas ricas en feldespatos (plagioclasas).

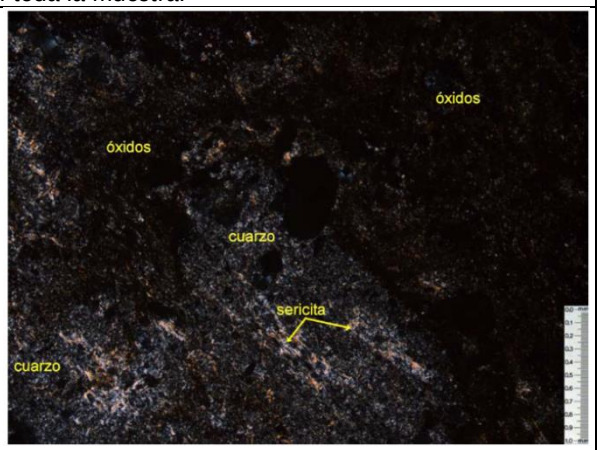
Cuadro 3.4. Resultados R27-4

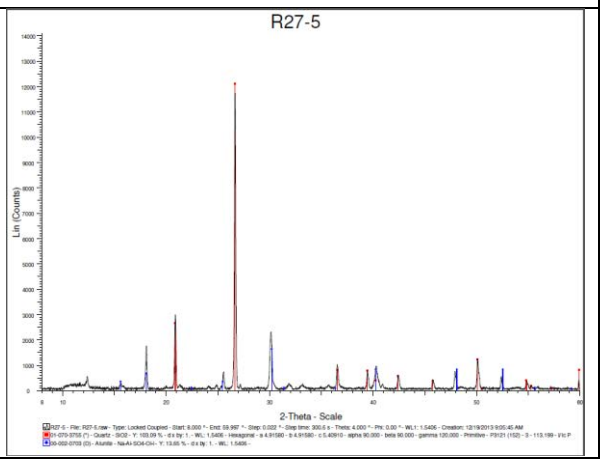
Designación	R27-4	
Nombre	Andesita recristalizada	
Macroscopía	Muy alterada, blanca-amarillenta, muy suave, casi se puede desmenuzar con la mano. En el interior de los bloques si se puede identificar vestigios de una matriz. Lava (andesítica ?) porfirítica con fantasmas de fenocristales de plagioclasa, profundamente alterados a arcillas (caolín ?) al igual que la matriz, con algo de sílice y minerales opacos (magnetita y quizás pirita).	
Textura	holocristalina porfirítica con fantasmas de plagioclasa y minerales ferromagnesianos en una matriz recristalizada silícea.	
Composición mineralógica		
Fenocristales	-Plagioclasas alteradas: aproximadamente 13 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 2,25 x 1,75 mm. Se encuentran sustituidos por sericita, filosilicatos (arcillas) y zeolitas. -Opacos: aproximadamente 5%, xenomórficos, con tamaño máximo de 1,12 x 0,50 mm. Diseminados, en vetillas discontinuas y rellenando vesículas. -Minerales ferromagnesianos alterados (anfíboles): aproximadamente 5 %, con tamaño máximo de 1 x 0,50 mm. Completamente alterados a filosilicatos (arcillas).	
Matriz	De color café, recristalizada, compuesta principalmente por cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Además se observan en menor cantidad, zeolitas, sericita y epidota.	
Minerales de alteración	Minerales de alteración: presentes alterando minerales y en la matriz. -Cuarzo secundario: Diseminado en la matriz, además rellenando cavidades. -Arcillas: Alterando feldespatos, minerales ferromagnesianos y diseminadas en la matriz. -Óxidos de hierro: Alterando posibles minerales ferromagnesianos y diseminados en la matriz. -Sericita: Alterando plagioclasas y en la matriz. -Zeolitas: Alterando plagioclasas y en la matriz. -Epidota: en cantidades traza (<1%), diseminada.	

Difractometría	Cuarzo SiO_2, Nacrita-2M2 - $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	

Cuadro 3.5. Resultados R27-5

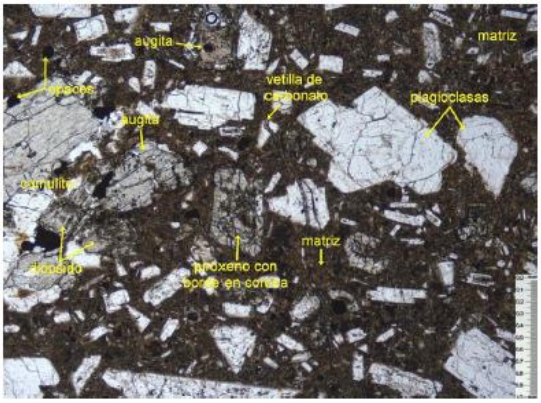
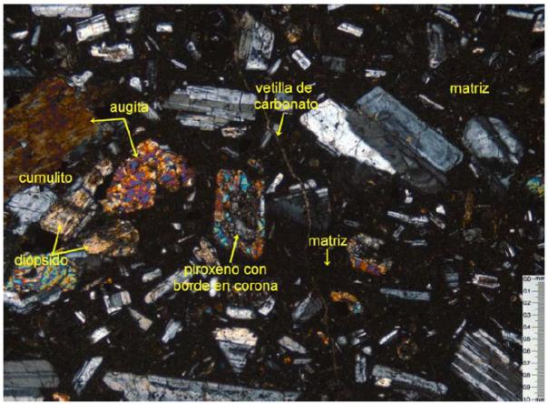
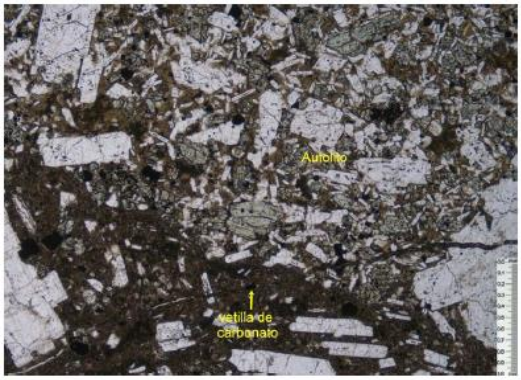
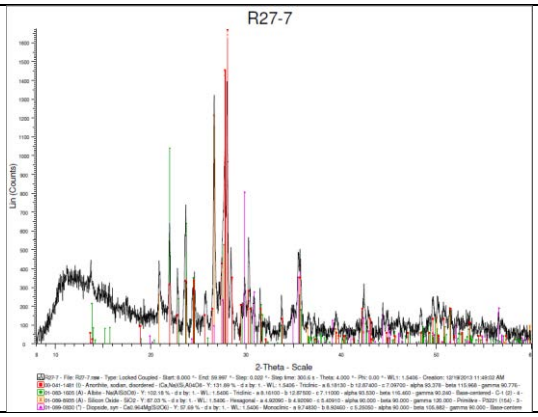
<table>
<tr><td>Designación</td><td>R27-5</td><td rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td>Nombre</td><td>Es una roca hidrotermalizada, debido al grado de alteración no se puede determinar el protolito.</td></tr>
<tr><td>Macroscopía</td><td>Se presenta rojiza que al cortarla queda blanca, mientras el agua se presenta de un color rosado. Es polvorienta y muy suave. Intensamente alterada a arcillas, hidróxidos de hierro bandeados, pocos cristales de cuarzo secundarios.</td></tr>
<tr><td>Textura</td><td>Granoblástica con granos equidimensionales de cuarzo con contactos suturados y con fuerte presencia de sericita y óxidos de hierro.</td><td></td></tr>
<tr><td>Composición mineralógica</td><td colspan="2">Posibles minerales ferromagnesianos alterados: aproximadamente 3%. Cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 0,68 x 0,50 mm. Alterados completamente a una mezcla de óxidos de hierro.
-Cuarzo: Presente en la muestra en general, cristales xenomórficos con tamaño promedio de 0,02 x 0,01 mm diseminados y con contactos suturados. Se observa un cristal de mayor tamaño de 0,50 x 0,40 mm.
-Óxidos de hierro: Presente en la muestra en general diseminados, en forma de bandas, manchas y en vetillas, también se observan reemplazando cristales (minerales opacos) con tamaño máximo de 0,75 x 0,50 mm.
-Sericita: Diseminada entre los granos de cuarzo, con tamaño máximo de 0,15 x 0,075 mm.-Arcillas: Diseminadas.</td></tr>
<tr><td>Otros rasgos</td><td colspan="2">-Vetilla de 0,15 mm de espesor de cuarzo secundario.
-Vetillas de 0,025 mm de espesor promedio, rellenas de óxidos de hierro.
-Vesículas: aproximadamente, con diámetro máximo de 0,90 mm.
-Amígdalas: aproximadamente, con diámetro máximo 1,0 mm. Rellenas con cuarzo secundario y sericita.
-No es posible determinar los porcentajes de cuarzo, sericita y óxidos de hierro debido a que se encuentran dispersos en toda la muestra.</td></tr>
<tr><td colspan="3"> 

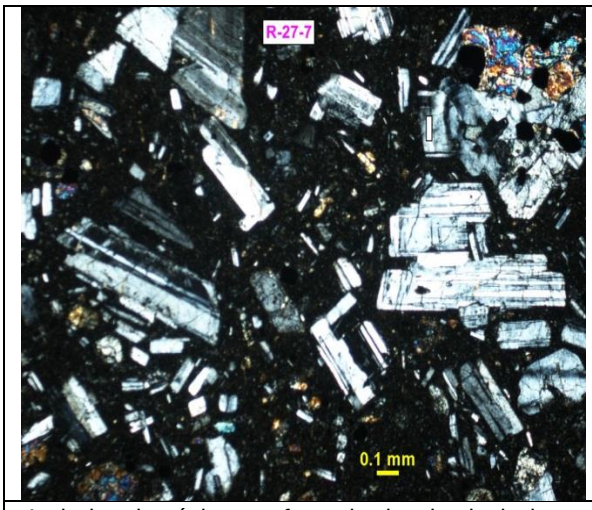
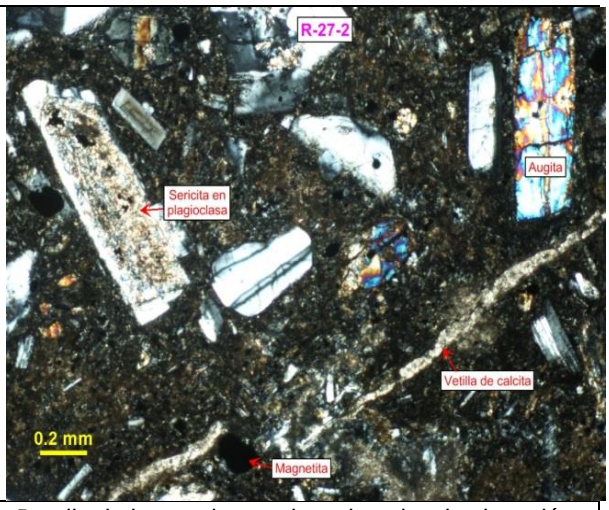

</td></tr>
</table>

Aspecto general de la roca. Nicoles paralelos.		Aspecto general de la roca. Nicoles cruzados.
Difractometría	Cuarzo, SiO_2; Alunita - Na-Al-SO_4-OH	

Cuadro 3.6. Resultados R27-7

Designación	R27-7	
Nombre	Andesita piroxénica con alteración propilítica	
Descripción visual	Roca sana, matriz negra con partículas claras, capa de alteración exterior.	
Textura	Hipocristalina glomeroporfirítica seriada con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y minerales opacos en una matriz intersertal.	
Composición mineralógica		
Fenocristales	(48%) -Plagioclasa: aproximadamente 30 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 3,38 x 1,75 mm, algo orientadas. Se distinguen maclas polisintéticas, zonación continua y discontinua, localmente con textura cribosa, algunas con inclusiones de piroxenos y minerales opacos, inter crecimientos tipo banat. Se encuentran alteradas a calcita, sericita y epidota. Además algunas se hallan arcillitizadas. También presentan fracturillas rellenas de calcita. -Augita aproximadamente 5-8 %, cristales idiamórficos a hipidiomórficos, con tamaño máximo de 3,25 x 1,10 mm. Algunas presentan inclusiones de opacos y plagioclasa. Alteradas por arcillas, también presentan fracturillas rellenas de calcita. -Diópsido aproximadamente 2-4 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 1,25 x 0,40 mm. Algunos presentan inclusiones de opacos y plagioclasa, localmente poseen bordes en corona. Alterados por arcillas, también presentan fracturillas rellenas de calcita. -Opacos aproximadamente 1-3 %, cristales hipidiomórficos a xenomórficos, con tamaño máximo de 1,40 x 1,25 mm. Se observan algunos cristales reabsorbidos o como impregnaciones (especialmente en el autolito).	
Matriz	(41%) Intersertal, de color café, compuesta por feldespatos, piroxenos, opacos, filosilicatos (arcillas) y vidrio. Además epidota y calcita.	
Minerales de alteración	(10%) -Sericita: Aproximadamente 2 %. Alterando plagioclasas y en la matriz. -Arcillas: Alterando feldespatos y diseminadas en la matriz. -Calcita: Alterando feldespatos y piroxenos aproximadamente 8 %, y mucha más diseminada en la matriz, también en vetillas. -Óxidos de hierro: Diseminados en la matriz. -Epidota: Diseminada en la matriz. El orden de formación de los minerales secundarios sería aproximadamente: Calcita + sericita + pocas arcillas incipientes → arcillas + sílice + opacos + cloritas → hidróxidos de Fe.	

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Aspecto general de la roca. Nicoles paralelos.</td><td>Aspecto general de la roca. Nicoles cruzados.</td></tr>
<tr><td> 
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Detalle del autolito. Nicoles paralelos.</td><td>Detalle del autolito. Nicoles cruzados.</td></tr>
<tr><td>Difractometría</td><td>Anortita “sólica” (Ca, Na) $(Si,Al)_4\ O_8$; Albita $Na(AlSi_3O_8)$; Óxido de silicio (SiO_2); Diopsido</td><td> 
</td></tr>
</table>

	
Andesita piroxénica con fenocristales de plagioclasas y piroxenos, algo de opacos (magnetita) en una matriz de los mismos cristales (microlitos) y posiblemente vidrio alterado.	Detalle de la anterior con los minerales de alteración señalados.

3.3.2. Difracción de rayos X

Se realizaron pruebas de difracción de rayos X la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica para los siete tipos de roca inicialmente propuestos. Los gráficos con los espectros de cada muestra se incluyen en los Anexos y de manera ilustrativa en los Cuadros 3.1. a 3.6.

3.3.3. Ensayo de azul de metileno

Se realizó la prueba del azul de metileno según la norma ASTM C 837. El cálculo del índice de azul de metileno (MBI) se hace según la siguiente fórmula:

$$MBI = \frac{E \times V}{W} \times 100$$

Donde:
MBI: methylene blue index (índice de azul de metileno) en meq/100 g de arcilla.
E: miliequivalentes de azul de metileno por mililitro.
V: es la cantidad de milímetros de la solución de azul de metileno requeridos para la tintura.
W: gramos de material seco.

Si se utilizan los valores especificados por la norma de una masa de 2,00 g de material y una solución de azul de metileno de 0,01N la fórmula se simplifica a:

$$MBI = \frac{0.01 \times V}{2} \times 100$$

En el Cuadro 3.7. se presentan los resultados del ensayo para los diferentes tipos de roca.

Cuadro 3.7. Resultados de prueba de azul de metileno.

No. Muestra	Descp.	MBI
R27-7	Sana	2
R27-4	Blanca	1,25
R27-5	Roja	1,25
R27-2 (rep)	Gris	11,46
R27-1	Verde	6,49

3.3.4. Ensayo de determinación de pH de los tipos de roca.

Se realizó el ensayo de determinación de pH para los diferentes tipos de roca. En el Cuadro 3.8. se presentan los resultados de esta prueba.

Cuadro 3.8. Resultados de prueba de pH.

		T	m	pH
		°C	g	
R27-7	Sana	24,3	10,004	6,174
R27-1	Verde	24,1	10,001	7,675
R27-2	Gris	23,7	10,008	2,590
R27-4	Blanca	24,1	10,006	2,159
R27-3	Naranja	23,7	10,007	3,952
R27-5	Roja	23,8	23,800	4,838

3.4. Propiedades físicas

Las propiedades físicas ensayadas fueron la porosidad, la absorción y la gravedad específica. Estos parámetros serán indicadores básicos para una clasificación de los grados de alteración de la roca. En los Anexos se presentan los resultados de los ensayos de propiedades físicas.

3.4.1 Porosidad

Se calculó los valores de porosidad de los diferentes grados de roca alterada. Estos valores se obtuvieron con la siguiente fórmula. Para obtener el volumen total y de los vacíos se usó el peso seco, el peso sumergido y el peso saturado superficie seca.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Cuadro 3.9. Valores de porosidad obtenidos en pruebas experimentales.

		MIN	PROM	MAX
R27-1	**Verde**	2,21%	3,29%	4,64%
R27-2	**Gris**	1,48%	5,59%	10,51%
R27-3	**Naranja**	13,61%	15,39%	17,40%
R27-4	**Blanca**	13,52%	14,49%	15,67%
R27-5	**Roja**	11,61%	14,70%	17,36%
R27-7	**Sana**	1,86%	2,61%	3,80%

3.4.2 Gravedad específica

De la misma manera se calculó la gravedad específica de los diferentes grados de roca alterada. Se presentan los valores máximos y mínimos y el promedio.

Cuadro 3.10. Valores de gravedad específica.

		MIN	PROM	MAX
R27-1	**Verde**	2,44	2,49	2,52
R27-2	**Gris**	2,07	2,31	2,45
R27-3	**Naranja**	2,03	2,12	2,25
R27-4	**Blanca**	2,12	2,17	2,21
R27-5	**Roja**	1,88	2,08	2,38
R27-7	**Sana**	2,57	2,62	2,64

3.4.3 Absorción

También se calculó la absorción de los diferentes grados de roca alterada. En el Cuadro 3.11. se pueden apreciar los valores máximos, mínimos y el promedio.

Cuadro 3.11. Valores de absorción.

	MIN	PROM	MAX
R27-1	0,90%	1,37%	1,99%
R27-2	0,62%	2,70%	5,68%
R27-3	7,01%	8,63%	10,37%
R27-4	7,07%	7,82%	8,79%
R27-5	5,51%	8,55%	11,07%
R27-7	0,72%	1,03%	1,54%

3.5. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas que se ensayaron fueron: la determinación del porcentaje de pérdida por abrasión en la máquina de Los Angeles, resistencia a carga puntual y la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada.

3.5.1. Abrasión

Usando la máquina de abrasión de los Ángeles se calculó el porcentaje de pérdida después de mil ciclos. En el Cuadro 3.12. se resumen los resultados.

Cuadro 3.12. Valores de porcentaje de pérdida por abrasión.

		% de pérdida por abrasión
R27-7	**sana**	8,0
R27-1	**verde**	16,2
R27-2	**gris**	20,7
R27-4	**blanca**	60,2
R27-3	**naranja**	58,8
R27-5	**roja**	56,0

3.5.2. Carga Puntual

Luego de la calibración de la máquina para el ensayo de carga puntual se realizaron ensayos para la determinación del índice de resistencia de carga puntual de cinco muestras de roca con diferentes grados y tipos de alteración

En los anexos se adjuntan los resultados de cada una de las series de ensayos. Y los resultados en gráficos, necesarios para identificar el índice de resistencia a la carga puntual corregido por la forma y tamaño de las muestras.

Las muestras eran en forma de "bulto", una de las opciones que permite la norma para esta ensayo (ASTM-D5731). Posteriormente se calculó el valor de la resistencia a compresión uniaxial inconfinada (σ_c) multiplicando el valor del índice a resistencia a la carga puntual corregido por la forma (I_{50}) por un factor K_{50}. Según Ale et al (2012) para la estimación no se debe usar el valor de K_{50} tradicionalmente recomendado de 23, ya que este no da un resultado adecuado para rocas de baja resistencia. Se utilizó un valor de 14 recomendado por Palmström (1995).

Cuadro 3.13. Valores de la carga puntual e índice de resistencia a carga puntual representativa para una muestra de 50 mm de diámetro.

	P_{50}	Is_{50}	σ_c	
	kN	**MPa**	**MPa**	**kg/cm^2**
R27-1 (verde, sat)	3,16	1,26	17,69	180,36
R27-1 (verde, seco)	3,82	1,53	21,39	218,09
R27-2 (gris, sat)	5,00	2,00	28,00	285,42
R27-2 (gris, seco)	5,96	2,38	33,38	340,30
R27-4 (blanca)	1,39	0,56	7,79	79,39
R27-3 (naranja)	5,43	2,17	30,44	310,25

3.5.3. Ensayo de Martillo de Schmidt

El ensayo con el martillo de Schmidt se hizo para los las muestras de roca sana (R27-7), verde (R27-1) y la naranja (R27-3). Se hizo en general con el martillo apuntando hacia abajo perpendicularmente, esto tiene importancia para luego usar los gráficos que correlacionan el número del martillo con la resistencia a compresión uniaxial. En la Figura 3.11. están graficados los datos según tipo de muestra. Se usó la correlación que trae el

martillo utilizado, es el martillo SC-001 del LANAMME-UCR. En el Cuadro 3.9. se muestra un gráfico que relaciona la dureza registrada con el rebote del martillo y la resistencia a la compresión uniaxial.

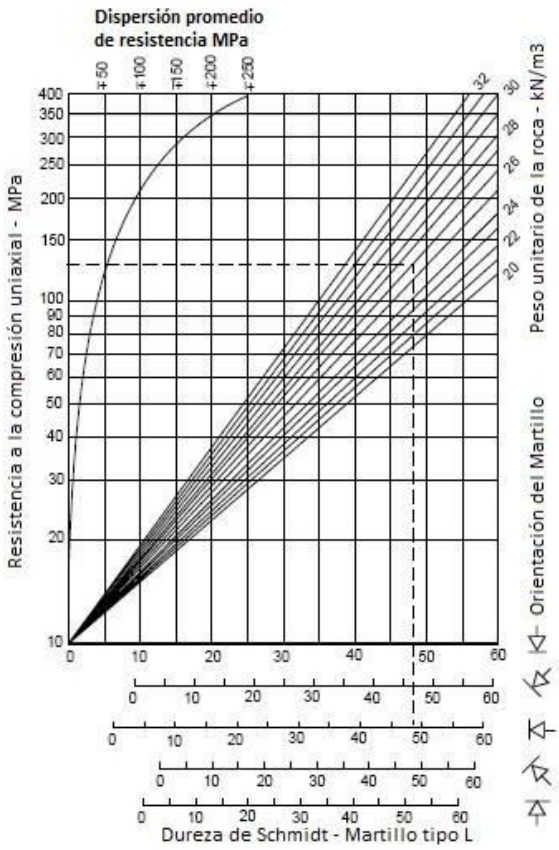


Figura 3.9. Gráfico relacionando compresión uniaxial con valor de rebote de Martillo de Schmidt.

Modificado de http://data.fine.cz/help/geo5/en/data/img/barton-bandis-parameters-01-4.jpg

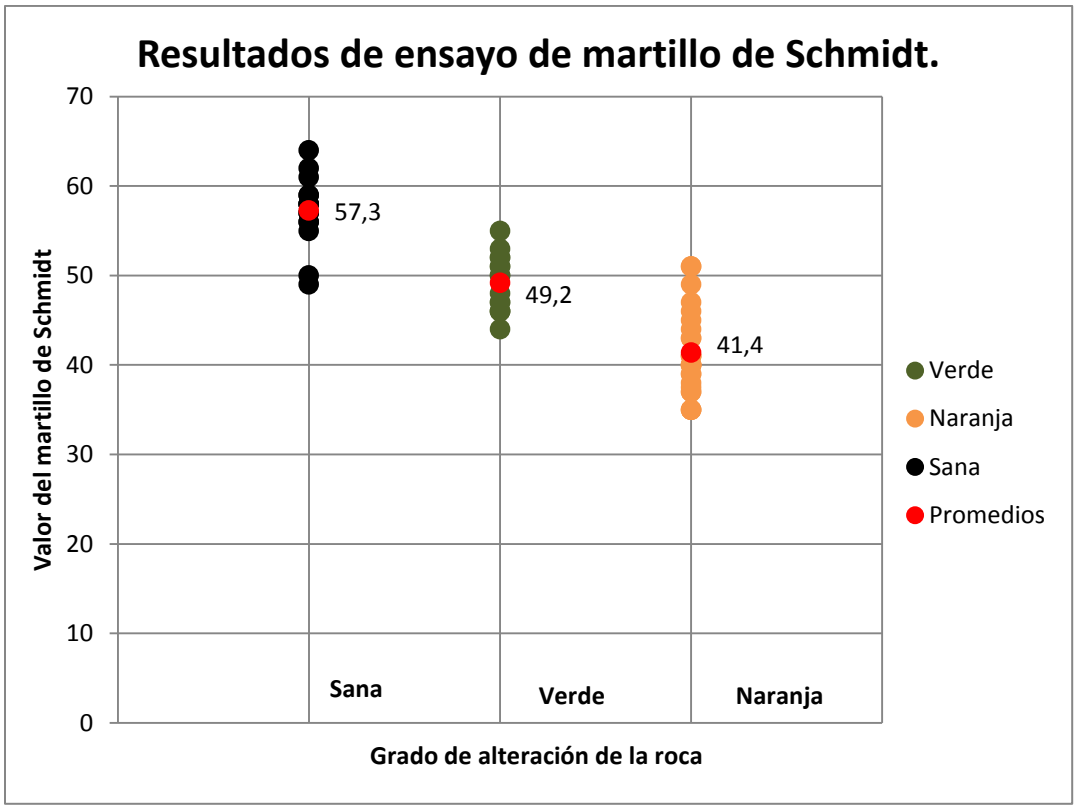


Figura 3.10. Resultados de ensayo de martillo de Schmidt.

Según recomienda González de Vallejo (2002) de los datos que se tiene por cada diez se quitan los cinco más bajos. Luego se saca el promedio de los datos restantes y se usa la correlación del martillo. Haciendo este procedimiento se obtiene los resultados expuestos en el Cuadro 3.7.

Cuadro 3.14. Valores promedio de rebote de Martillo de Schmidt y su correlación a resistencia a la compresión uniaxial inconfinada.

	Valor de rebote promedio	σ_c	
		kg/cm^2	MPa
Sana	60	750	74
Verde	51	652	64
Naranja	45	550	54

3.5.4. Ensayo de Compresión Uniaxial

Primero se extrajeron los cilindros con ayuda de un taladro especial para este fin. Estos cilindros luego se cortaban con una sierra. Para lograr cumplir las normas de la ISRM y la ASTM en cuanto a planicidad, rectitud, perpendicularidad y paralelismo, se buscó pulirlos. Para esto se confeccionó una pieza a modo de calza para que la pulidora de núcleos de concreto del laboratorio pudiera pulir los núcleos de roca que eran de menor diámetro.

Sin embargo, una vez que se logró confeccionar la pieza, se pudo constatar que el proceso de pulir los núcleos suponía un esfuerzo demasiado grande para las muestras de roca más alteradas y que se reventaban los núcleos. En el Anexo 3 se presentan las dimensiones de los 14 núcleos que se buscó fallar y qué aspectos de las normas cumplen. Debido a las características de las diferentes muestras de roca se pudieron confeccionar testigos adecuados de cuatro grados de alteración: sana (R27-7), verde (R27-1), roja (R27-5) y naranja (R27-3). Debido a la mala calidad de la roca no se pudo hacer núcleos de los tipos más alterados como de la gris (R27-2) y la blanca (R27-4).

Los núcleos del tipo de roca verde (R27-1) y sana (R27-7) se fallaron con una galga en dirección axial y otra en dirección perpendicular a la dirección axial, por lo que se pudo determinar tanto el módulo de elasticidad (E) y el módulo de Poisson *v.*

Por otro lado no se pudo instrumentar los testigos de los tipos de roca roja (R27-5) y naranja (R27-3) debido a que no se lograba adherir las galgas por su textura como tiza. Para estos dos tipos de roca se utilizó un arreglo con un extensiómetro láser para medir el desplazamiento axial, como se muestra en la siguiente Figura 3.11.

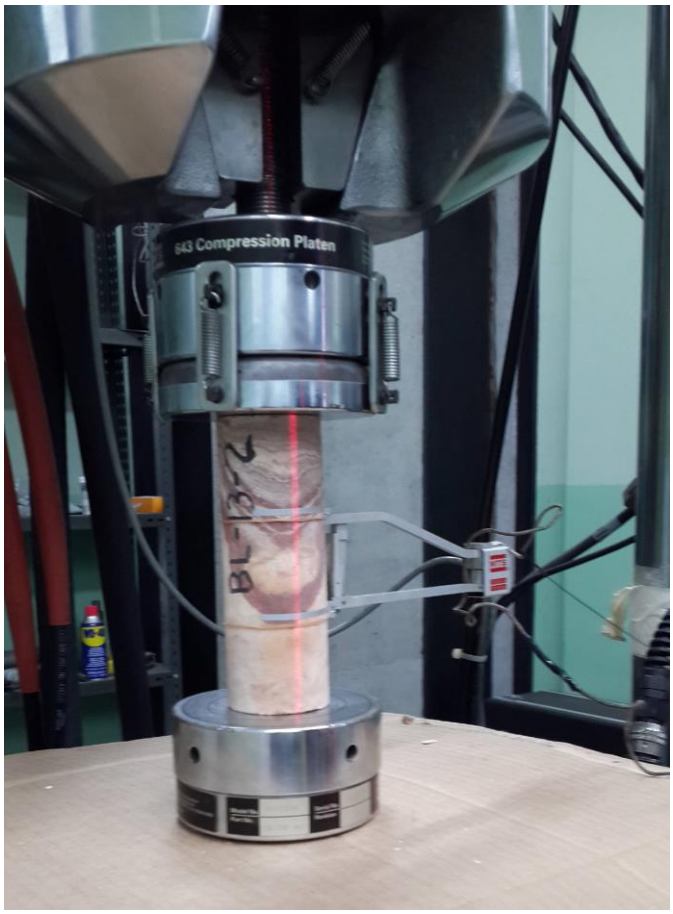


Figura 3.11. Arreglo para fallar rocas con extensómetro láser.

En el siguiente el Cuadro 3.15. se exponen los resultados de los ensayos de compresión uniaxial. En los Anexos se adjuntan las curvas de esfuerzo deformación de donde se obtuvo el módulo de deformación.

Cuadro 3.15. Resultados de compresión uniaxial inconfinada.

Tipo	Desc.	Nombre	L/D	P	Esfuerzo	Promedio	E	Coeficiente
				kg	kg/cm^2		kg/cm^2 $(x10^5)$	Poisson
R27-1	Verde	Prueba	1,64	6.044	294			
		BL3-1	2,52	12.886	624	970 kg/cm^2 95 MPa	2,52	0,19
		BL3-2	2,51	27.057	1.309		2,70	0,24
		BL14-2	2,01	16.922	824		2,29	0,18
		BL20	2,02	23.151	1.122		2,10	0,15
R27-3	Naranja	Prueba	2,47	5.966	292			
		BL1-1	2,93	4.386	211		3,88	
		BL1-2	2,91	6.957	332	236 kg/cm^2 23 MPa	1,33	
		BL13-1	2,96	3.327	160		1,12	
		BL13-2	2,81	4.559	220		1,24	
		BL13-4	2,86	4.093	199		0,32	
R27-5	Roja	BL5-1	2,94	5.311	257	257 kg/cm^2 25 MPa	0,01	
R27-7	Sana	Prueba	2,56	37.821	1.940			
		Prueba	1,77	15.634	753	1.488 kg/cm^2 146 MPa		
		BL4-1	2,35	24.577	1.193		5,87	0,20
		BL7-2	2,91	42.765	2.067		5,66	0,18

Capítulo 4. Análisis de Resultados

4.1. Comparación de resultados mineralógicos

Los tres ensayos mineralógicos realizados son el análisis petrográfico, la difracción de rayos-x y la prueba de azul de metileno.

Los resultados de la prueba de azul de metileno confirman la presencia de arcillas en las muestras analizadas, sobre todo en las roca con alteración verde (R27-1) y gris (R27-2). El índice de azul de metileno sirve como medida directa de la capacidad de intercambio de cationes de las arcillas. Los valores obtenidos no son particularmente altos, ni indican arcillas de alta plasticidad. Esto indica más hacia la presencia de caolinita (Bois, 2011).

Por otro lado, al unir los resultados de la difracción de rayos-x con los resultados de la petrografía, se puede generar el Cuadro 4.1. que presenta un resumen de los principales minerales de alteración presentes en las diferentes muestras.

Debido a los minerales de alteración hallados en las muestras tomadas directamente del talud y en la más sana (R27-1, R27-2, R27-4 y R27-7), se puede concluir que se trata de una alteración propilítica. Este tipo de alteración se caracteriza por la presencia de epidota, clorita, albita, calcita y pirita.

Por otro lado la presencia de caolinita, sericita y cuarzo, sobre todo en las muestras blancas, naranjas y rojas (R27-3, R27-4 y R27-5) apuntan a una alteración argilítica o sericítica. Es normal que se identifiquen diferentes tipos de minerales en pocos metros.

Cuadro 4. 1 Comparación de minerales de alteración presentes en los diferentes grados de alteración.

Descripción	Sana	Verde	Gris	Blanca	Naranja	Roja
Designación	R27-7	R27-1	R27-2	R27-4	R27-3	R27-5
Caolinita		?		x	x	
Zeolita		x	x	x		
Cuarzo secundario		x	x	x	x	x
Pirita		x	x	x		
Calcita	x		x			
Arcillas	x	x	x	x	x	x
Sericita	x	x	x	x		x
Epidota	x	x		x		
Serpentina			x			
Óxidos de hierro	x	x	x	x		x
Titanita			?			
Clorita			x			
Alunita					x	x

Según Laguna (1984) estos tipos de alteración son los propios de la formación Aguacate. Él identifica zonas de alteración propilítica con altos grados de piritización y silicificación y fases con epidota, clorita y pirita. Identifica también los pequeños cristales de pirita que se forman en la roca aflorante. Los otros dos tipos de alteración que identifica son la alteración argilítica de intermedia a avanzada y la sericitización. Esta primera se caracteriza por coloraciones cenicientas a rojizas y en partes amarillentas. Predomina la caolinita y la esmectita. También se presente la alunita como la que se encontró en los tipos de roca R27-3 (naranja) y R27-5 (roja). En la sericitización se reconoce principalmente la sericita, el cuarzo y la pirita.

Como se observa en el Cuadro 3.8. los valores de pH son muy variados. Hay valores relativamente neutros, con pH de 7,68 en la R27-1 (verde) y 6,17 R27-7 (sana). Como también hay valores sumamente ácidos de 2,16 en la R27-4 (blanca) y 2,59 en la R27-2

(gris). Estos valores tan ácidos tienen alto potencial de ocasionar corrosión del acero o disolución de agregados. Por estas razones es importante no utilizar rocas tan alteradas como agregados de construcción, ya que por su alta acidez pueden corroer el acero y disolver los materiales cementantes. Es mejor, en todo caso, usar cementos puzolánicos si van a estar en contacto con este roca en este grado de alteración.

Como se menciona en Vargas A. y Fernández J. F. (2002) los valores de pH menores a 4,5 son catalogados como "Muy fuerte". Otro factor que afecta la agresividad del agua hacia el concreto es la presencia de sulfatos. Según esta misma investigación el ataque de los sulfatos al concreto genera un hinchamiento. Es posible que esto pueda ser lo que cause el agrietamiento en los recubrimientos de concreto presentes en la Ruta. Se puede realizar un análisis de agresividad del agua para conocer la concentración y el tipo de sulfatos presentes en el sitio.

Los minerales presentes en el macizo tienen un efecto directo en las obras de concreto que se construyan como parte del soporte temporal, o de las construcciones definitivas. Por ejemplo la presencia de pirita, que es un mineral de sulfuro de hierro, puede generar ácido sulfúrico al oxidarse, lo que generaría los valores de pH tan ácidos. Esto ocasiona un ataque químico que produce tensiones internas que llevan a la rotura. Usualmente va acompañada de coloraciones marrones (Gonzáles de Cotera, 1991). Como se indica en el informe del PITRA (2011) dependiendo del tipo de cemento, puede ser "muy susceptible a ser atacado por ácidos. Estos disuelven la pasta del cemento hidratado en el concreto provocando su desintegración, desmoronamiento, la pérdida de la resistencia del concreto y la corrosión del acero de refuerzo."

A la vez minerales como caolinita y otras arcillas introducen planos de debilidad en los macizos y presentan problemas de cambios de volumen. Ahora bien, como no se detectó montmorillonita la capacidad de expansión no debería ser un factor preponderante. Sin embargo sí se han identificado formaciones con montmorillonita en estos kilómetros de la Ruta 27 (PITRA, 2011).

4.2. Comparación de propiedades físicas entre tipos de roca alterada.

A continuación se realiza una comparación de los resultados de los diferentes ensayos realizados para conocer las propiedades físicas de las rocas con diferentes grados de alteración.

4.2.1. Análisis de resultados de gravedad específica

Se puede ver en la Figura 4.1. una clara tendencia decreciente conforme a un mayor de grado de alteración. Se puede concluir que este es el orden del grado de alteración de la menos alterada (sana) a las más alteradas (blanca, naranja y roja) basado en la identificación visual y los ensayos petrográficos.

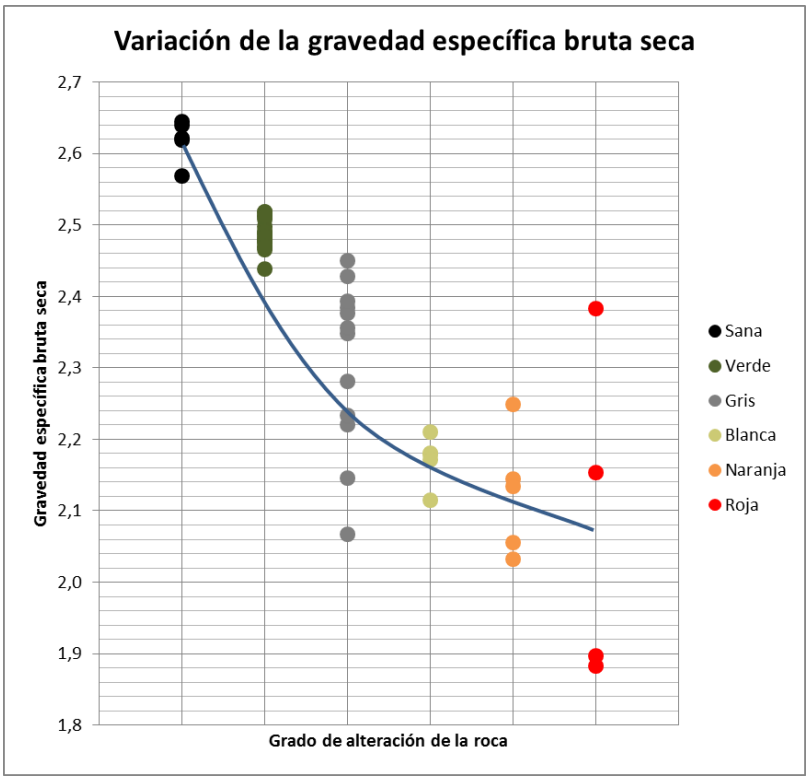


Figura 4. 1. Comparación entre valores de gravedad específica bruta seca de diferentes grados de alteración de la roca.

El rango de los valores de gravedad específica es de 1,88 hasta 2,64. Los valores de la gravedad específica para la roca sana y la verde (R27-7) son considerablemente mayores que los típicos citados en el Cuadro 2.3. para una andesita, pero al aumentar en intensidad la alteración va disminuyendo hasta que está en valores más comunes.

4.2.2. Análisis de resultados de porosidad

En cuanto a los valores de porosidad usando la misma escala de comparación para el grado de alteración se puede identificar una clara tendencia a aumentar el porcentaje de porosidad conforme aumenta el grado de alteración. Destaca la variabilidad de los valores de porosidad obtenidos, ya que oscilan en un rango de 1,48% hasta 17,36%. Esto se

explica con los diferentes grados de alteración de los materiales y su consecuente sustitución de materiales.

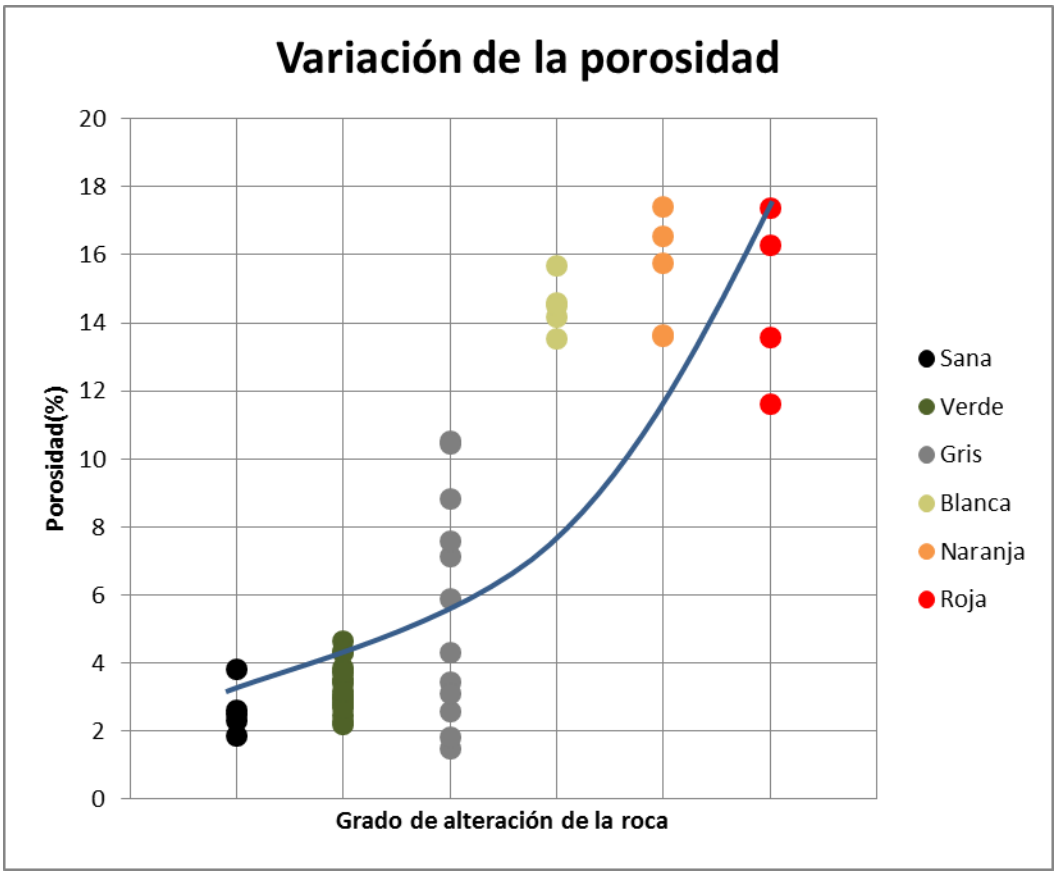


Figura 4. 2. Comparación entre valores de porosidad de tipos de roca alterada.

4.2.3. Comparación absorción

En la Figura 4.3. se vuelve a ver la tendencia apuntada en las dos últimas figuras. Es decir que la absorción es mayor cuanto más intensa es la alteración. Los valores varían desde 0,72% hasta 11,07%.

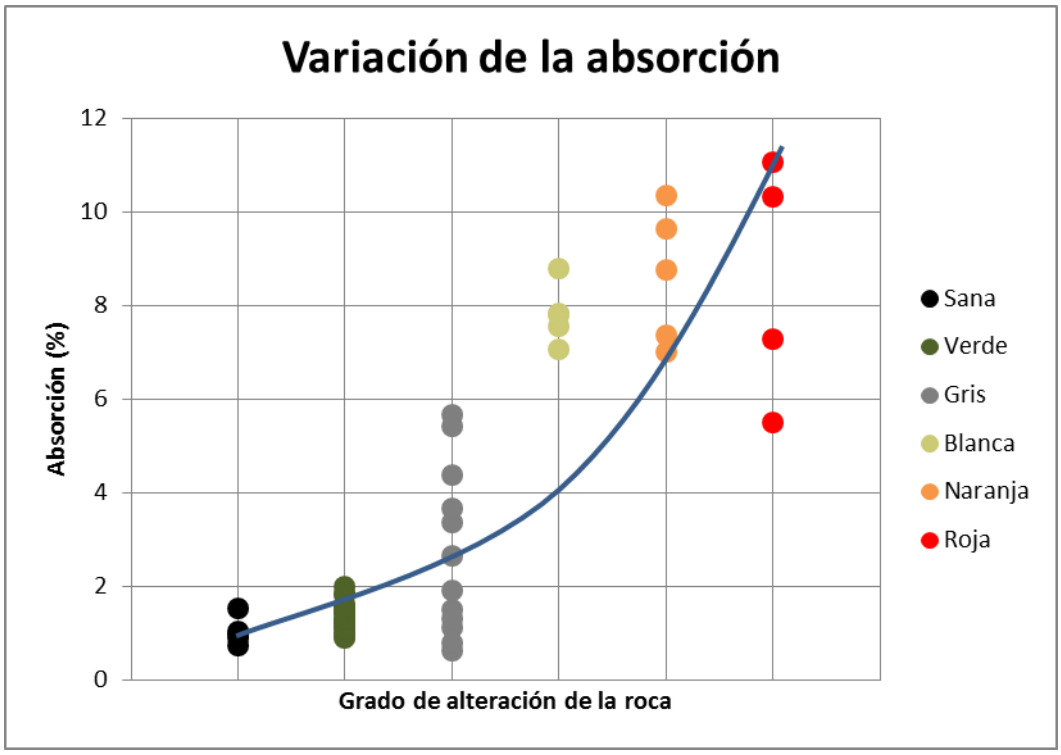


Figura 4. 3. Comparación entre valores de absorción de grados de alteración de la roca.

4.2.4. Comparación entre absorción y porosidad

Si se compara la absorción contra la porosidad se muestra una clara relación exponencial decreciente. A realizar el ajuste se obtiene una ecuación exponencial con una coeficiente de correlación de 0,9975 lo cual corresponde a una excelente correlación. Esto se muestra en la Figura 4.4.

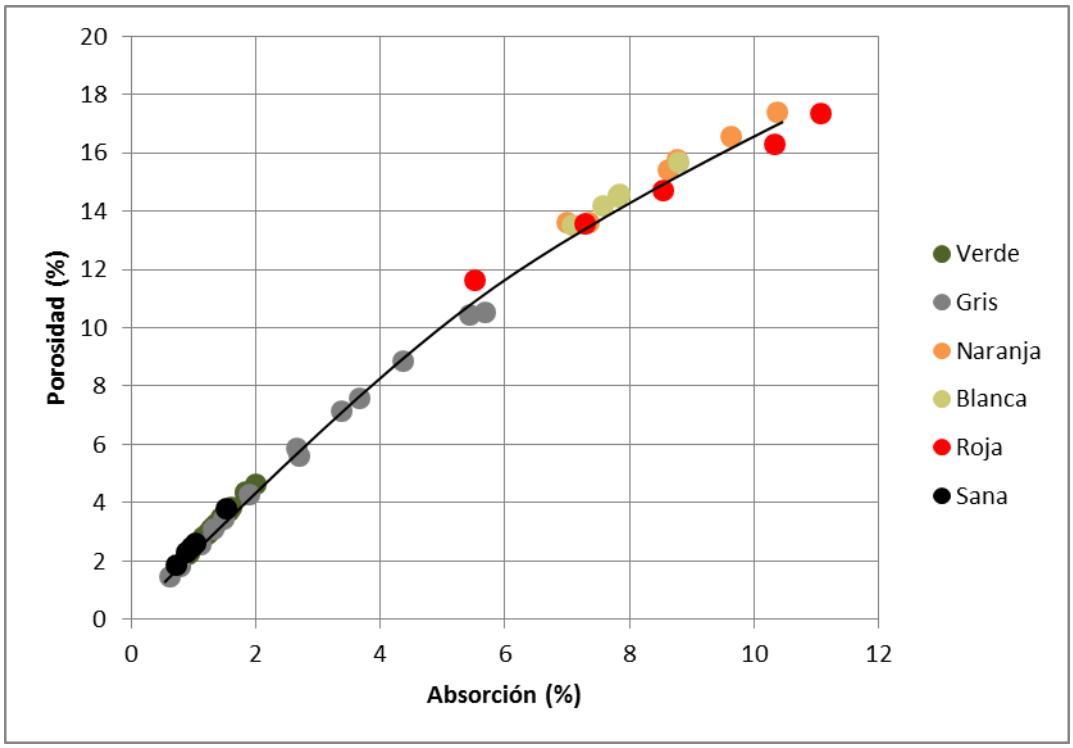


Figura 4. 4. Comparación entre valores de absorción y porosidad

Más aún, al comparar estos resultados con los obtenidos en otros estudios, como los que presenta Kanji (2014) se puede que coincide el comportamiento con resultados de otros estudios, tipos de roca y orígenes geológicos. En la Figura 4.5 se muestra la relación entre absorción y porosidad con los datos obtenidos en los experimentos y los de Kanji. Se puede ver que independientemente del grado de alteración los datos obedecen a la línea teórica. Según Kanji (2014) el hecho de que la absorción y la porosidad se relacionen de esta forma es importante, debido a que obtener el valor de la absorción es un ensayo sencillo y a su vez la porosidad se correlaciona directamente con la densidad seca de donde se puede estimar el nivel de resistencia.

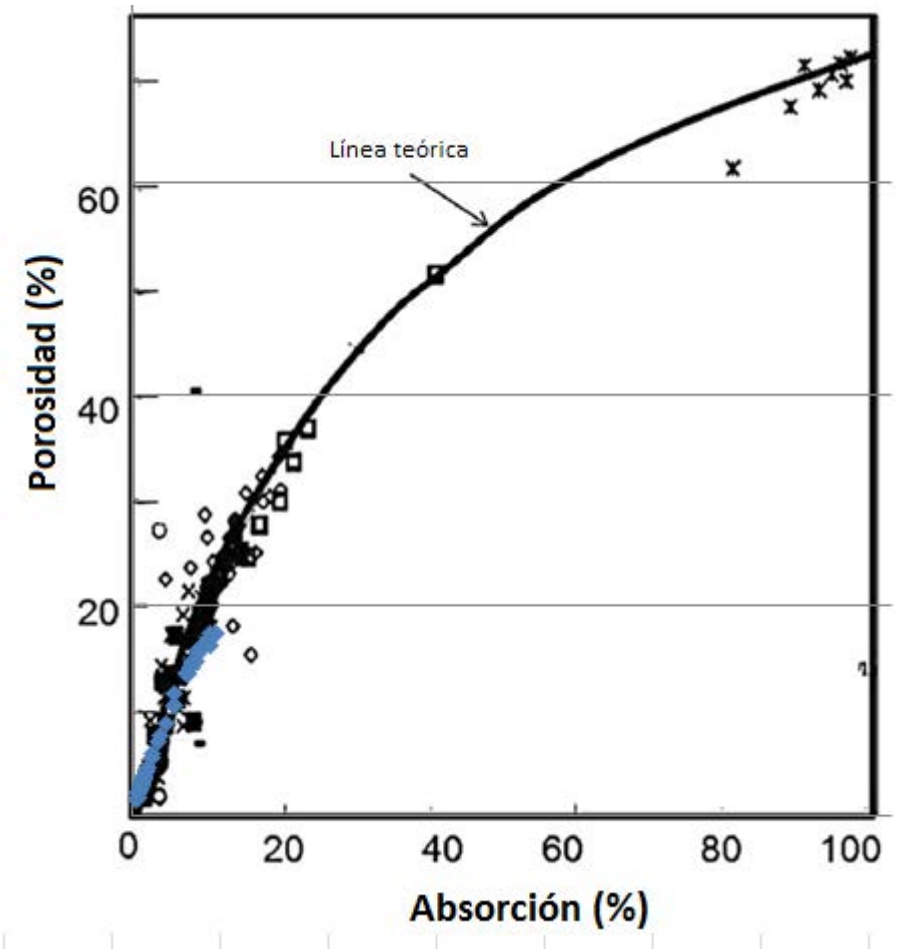


Figura 4. 5. Gráfico de relación entre absorción y porosidad para diferentes tipos de roca con los datos obtenidos de los resultados.

Modificado por Peralta (2014) tomado de Kanji (2014)

4.2.5. Comparación entre porosidad y densidad seca

Al comparar los resultados de la porosidad y la densidad seca se obtiene una línea recta de mejor ajuste decreciente con un coeficiente de correlación de 0,83. Este es un resultado esperado e importante, ya que permite una estimación adecuada de la densidad por medio de la porosidad. El coeficiente de correlación es muy bueno y demuestra una relación fuerte.

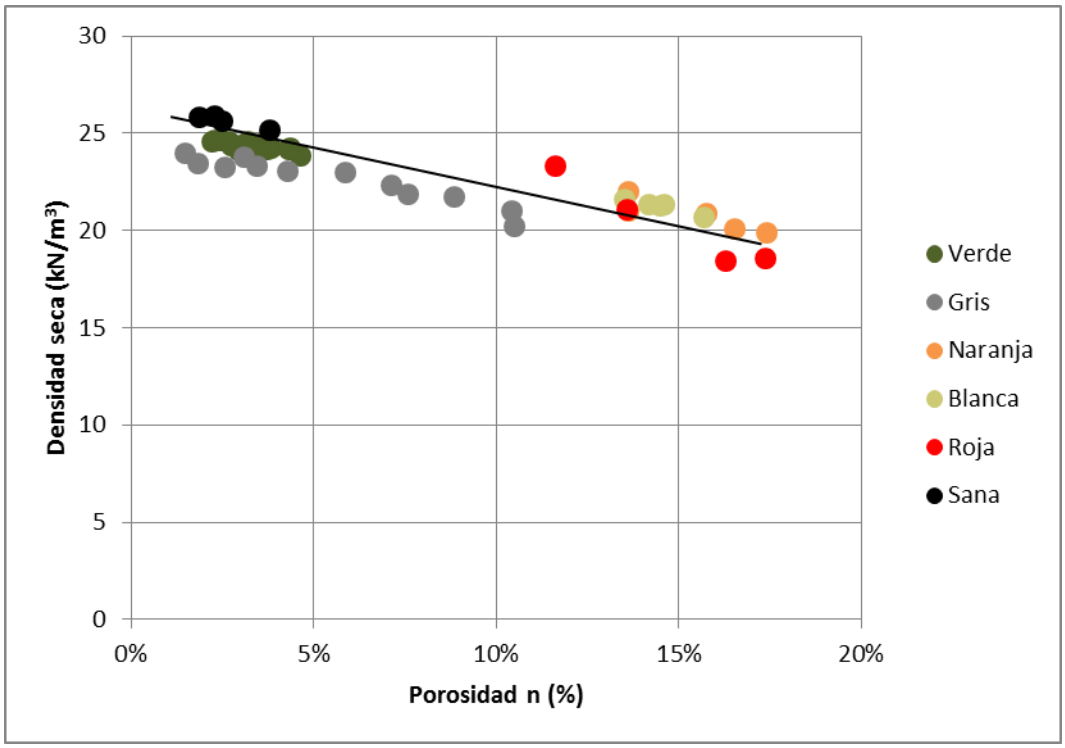


Figura 4. 6. Gráfico de correlación entre resultados densidad seca y porosidad.

En la Figura 4.6. se puede observar que los datos obtenidos de densidad seca y los de porosidad obedecen a la relación teórica entre densidad seca y porosidad sin importar el grado de alteración.

Se puede apreciar en la figura 4.7. que la relación que muestra Kanji (2014) se mantiene para los datos obtenidos experimentalmente en esta investigación, y que los resultados resultan normales para los de rocas duras y rocas suaves. Es decir que se cumple que tener porosidades más altas corresponde con densidades más bajas, esto a su vez es un indicador de una menor resistencia.

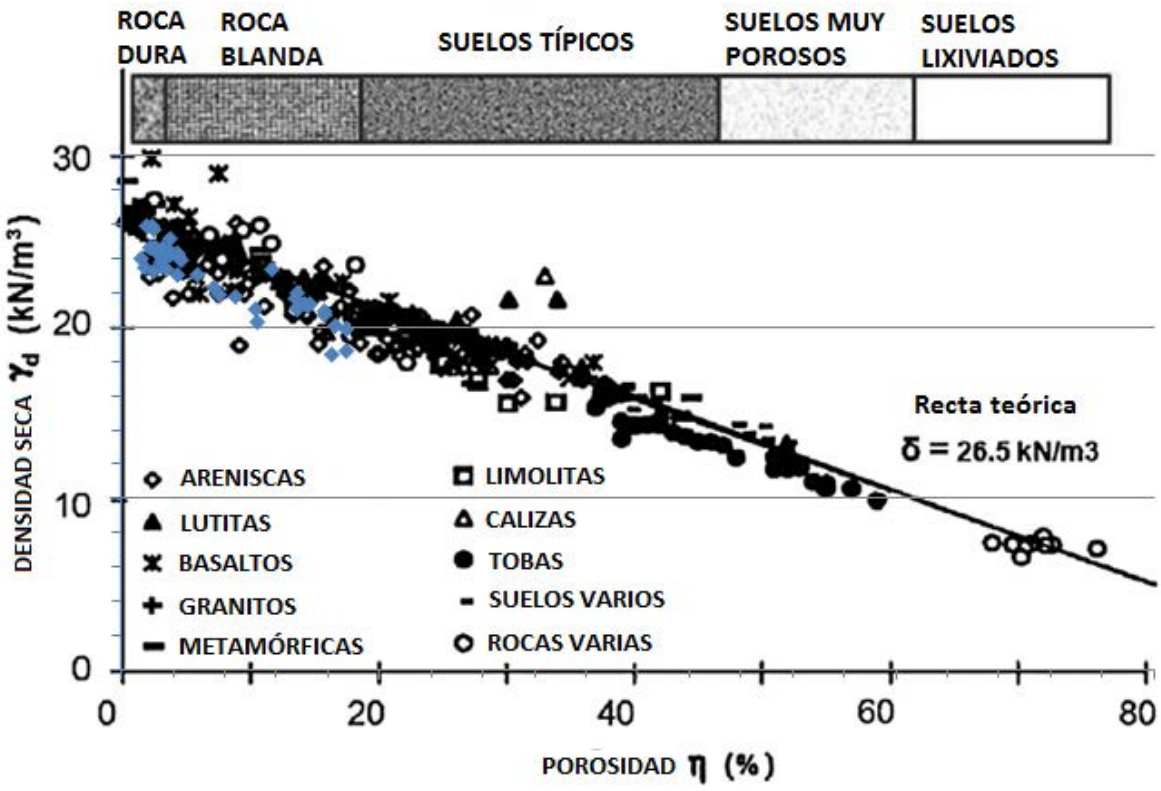


Figura 4. 7. Gráfico de correlación entre resultados de densidad seca y porosidad modificado para mostrar los resultados obtenidos.

Modificado por Peralta (2014) tomado de Kanji (2014)

4.3. Comparación de propiedades mecánicas

En este apartado se hace una comparación de las propiedades mecánicas ensayadas. Es decir la abrasión, la resistencia a carga puntual y la resistencia a la compresión uniaxial.

4.3.1. Comparación entre valores de porcentaje de abrasión

La prueba de abrasión permite tener un indicador de la dureza del tipo de roca y cuánto resiste a esfuerzos abrasivos. En el tema de agregados para construcción de carreteras el valor del porcentaje de pérdida por abrasión es importante. Se puede observar en la figura 4.7. que de las rocas sanas a la gris aumenta paulatinamente el porcentaje de pérdida por

abrasión. Luego hace un aumento brusco al pasar a las tres muestras de rocas más alteradas. Sin embargo, no es como con la absorción y la porosidad que la naranja y la roja son menos resistentes a la abrasión que la blanca. Esto puede estar causado por la mayor presencia de cuarzo secundario en la naranja y la roja como consecuencia de una alteración hidrotermal más intensa.

Un mayor porcentaje de pérdida por abrasión también indica una mayor fragilidad. Debido a que solamente se tienen curvas de esfuerzo deformación para los tipos de roca R27-7 (sana) y R27-1 (verde) no se puede comparar directamente con los otros tipos de roca analizados. Ahora bien, sí se puede notar que al ser fallados los cilindros de los tipos de roca R27-3 (naranja) y R27-5 (roja), así como en las pruebas de resistencia a carga puntual del tipo de roca R27-4 (blanca), se observa falla frágil.

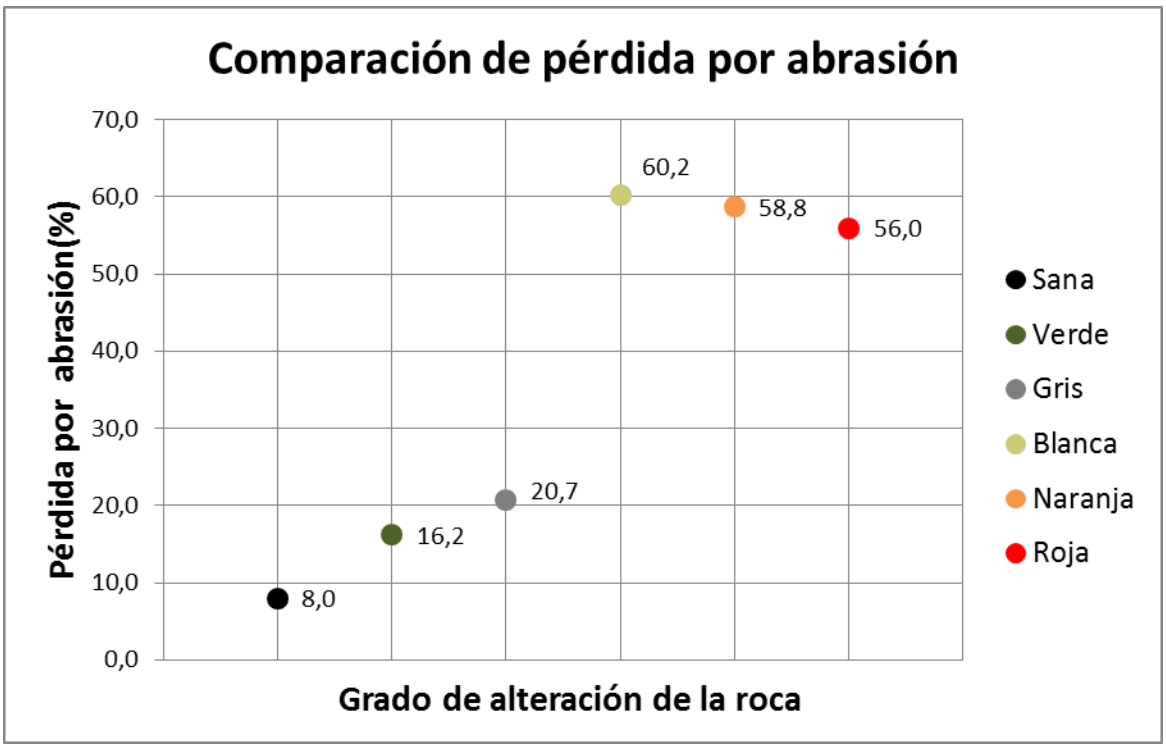


Figura 4. 8. Comparación entre valores de porcentaje de pérdida de abrasión entre grados de alteración de la roca.

En todo caso queda patente que las muestra de roca más alteradas (R27-3, R27-4, R27-5) tienen porcentajes de pérdidas de abrasión muy altos para ser utilizados como agregados para obras civiles.

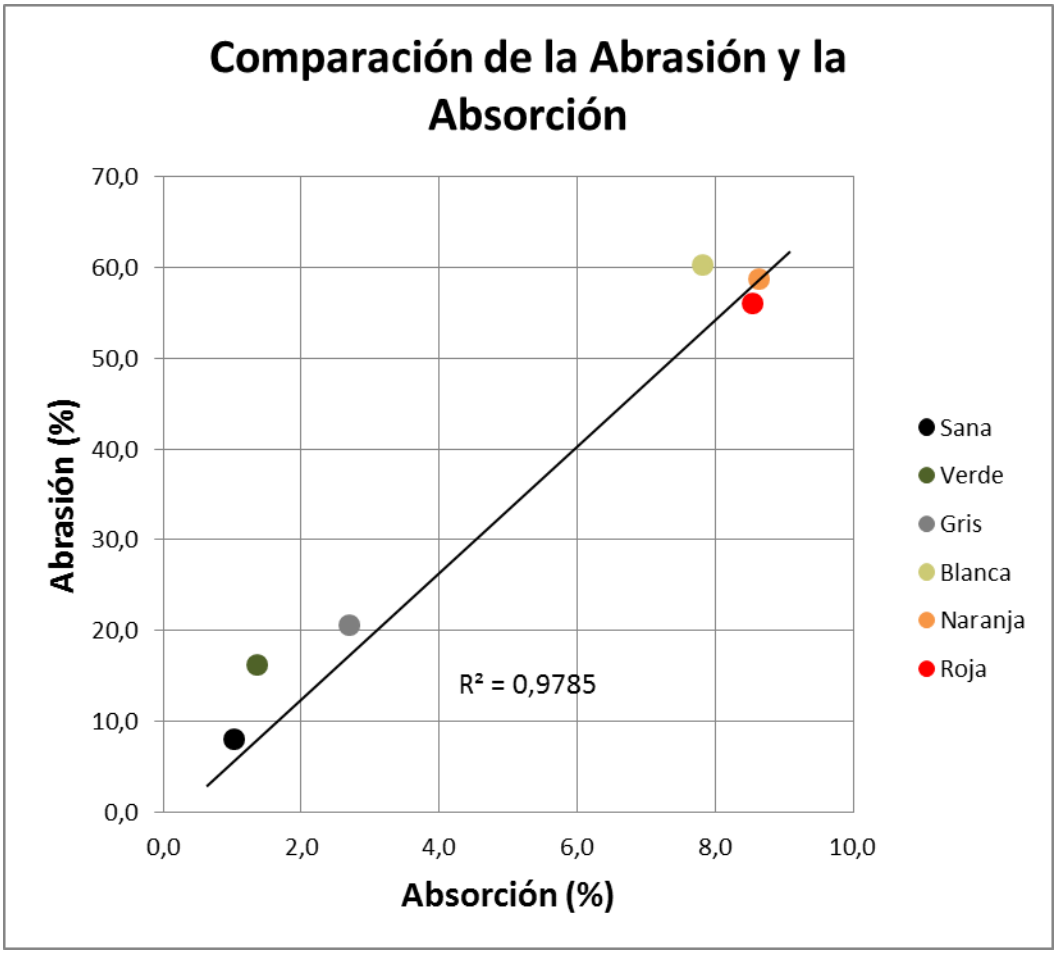


Figura 4. 9. Comparación entre valores de porcentaje de pérdida de abrasión y valores promedio de absorción.

Una comparación interesante que se puede hacer es la de los valores de porcentaje de pérdida de abrasión y los valores promedio de absorción. Se puede observar una tendencia clara linealmente creciente (con un coeficiente de correlación de 0,98). Esto es

explicable en el sentido que una mayor cantidad de arcilla conlleva tanto una mayor superficie específica que implica una mayor absorción, así como una mayor fragilidad, lo que conlleva un mayor porcentaje de abrasión.

4.3.2. Comparación entre resultados de resistencia a la compresión uniaxial inconfinada

Debido a las diferencias entre los diferentes métodos utilizados para calcular o estimar la resistencia a la compresión uniaxial, se tienen resultados que difieren entre sí. En el Cuadro 4.2. se resumen los resultados de diferentes ensayos que se refieren a la resistencia a la compresión uniaxial.

Cuadro 4. 2. Resumen comparativo de resultados que se relacionan con la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada.

		$\sigma_{c\ prom}$	PLT	Schmidt
		MPa	MPa	MPa
R27-7	Sana	146		74
R27-1	Verde	95	21	64
R27-2	Gris		33	
R27-4	Blanca		8	
R27-3	Naranja	23	30	54
R27-5	Roja	25		

Como se puede observar el ensayo de carga puntual tiende a subestimar en algunos casos la resistencia en comparación con el ensayo de compresión uniaxial inconfinada. Esto puede ser porque se llevó a cabo con bloques pequeños de roca en forma de bulto irregular y no con núcleos extraídos de un bloque mayor. En particular llama la atención la diferencia entre los resultados del tipo de roca verde (R27-1) ya que hay una disminución considerable del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial inconfinada en

comparación con el de carga puntual. Algo parecido pasa con el Martillo de Schmidt al ensayar la roca sana (R27-7)

Al ubicar los resultados del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial inconfinada en los esquemas de clasificación de rocas más conocidos se puede observar que la resistencia de las rocas con diferentes grados de alteración varía mucho. Va desde la roca "sana" identificada como de resistencia alta a mediana hasta la roca "blanca" que cae dentro de la clasificación de roca blanda a muy blanda. Esto demuestra cómo se puede degradar la competencia de una roca que ha llevado un proceso de alteración hidrotermal. Esto se aprecia bien en la Figura 4.9. Según la clasificación de la ISRM (1981) los tres tipos de roca más alteradas, blanca (R27-4), naranja (R27-3) y roja (R27-5) clasifican como rocas blandas (5-25 MPa). El tipo de roca gris (R27-2) estaría clasificada como moderadamente dura (25-50 MPa), mientras que el tipo de roca verde (R27-1) se denominaría dura (50-100 MPa) y el tipo de roca sana (R27-7) sería un tipo de roca muy dura (100-250 MPa).

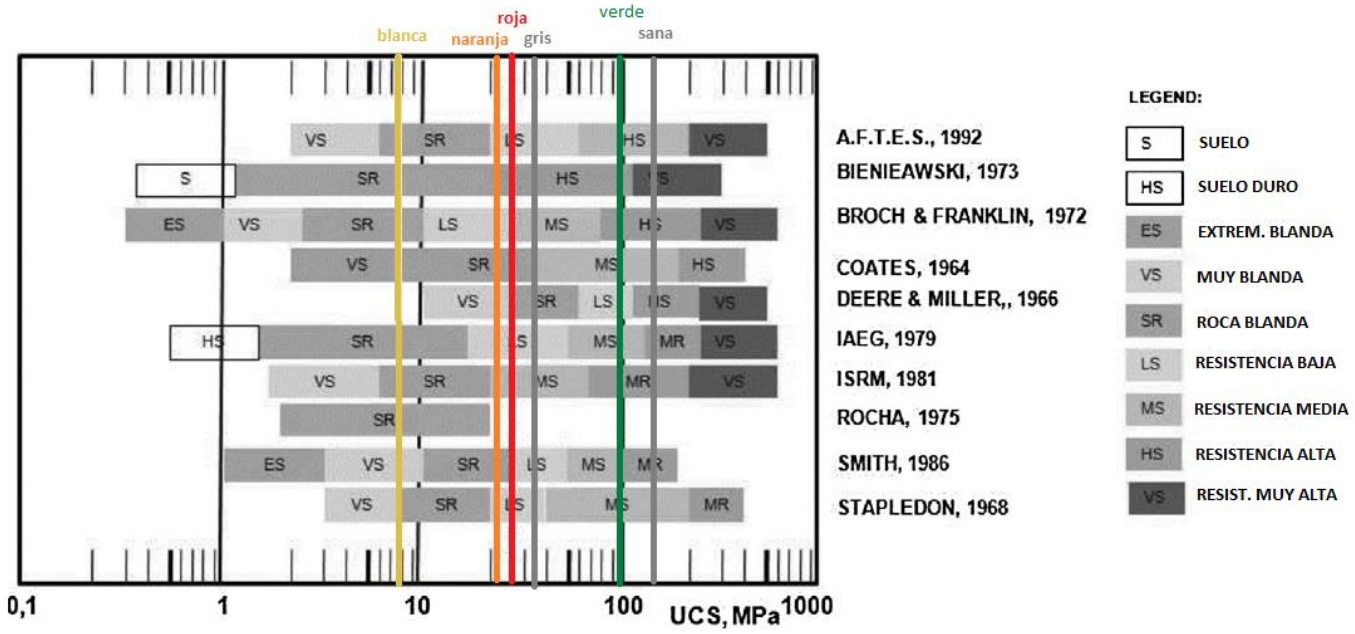


Figura 4. 10. Clasificación de rocas según resistencia según varios autores.

Modificado por Peralta (2014) tomado de Kanji (2014)

Los valores obtenidos para la roca sana están dentro del rango de valores que recomienda el Cuadro 2.4. que son entre 1000 – 5000 kg/cm^2. Incluso los valores para la roca verde (R27-1, andesita propilitizada) están apenas en el límite. Sin embargo las otras muestras de roca identificadas ya han perdido mucho la resistencia para entrar en estos rangos típicos.

Por otra parte, en la Figura 4.10. se muestra una correlación entre la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada y el módulo de Young. Se graficaron los resultados obtenidos experimentalmente en esta investigación. Se puede observar que la mayoría de los puntos están dentro de la franja de una relación mediana entre resistencia y módulo y correctamente corresponde a la zona de rocas ígneas.

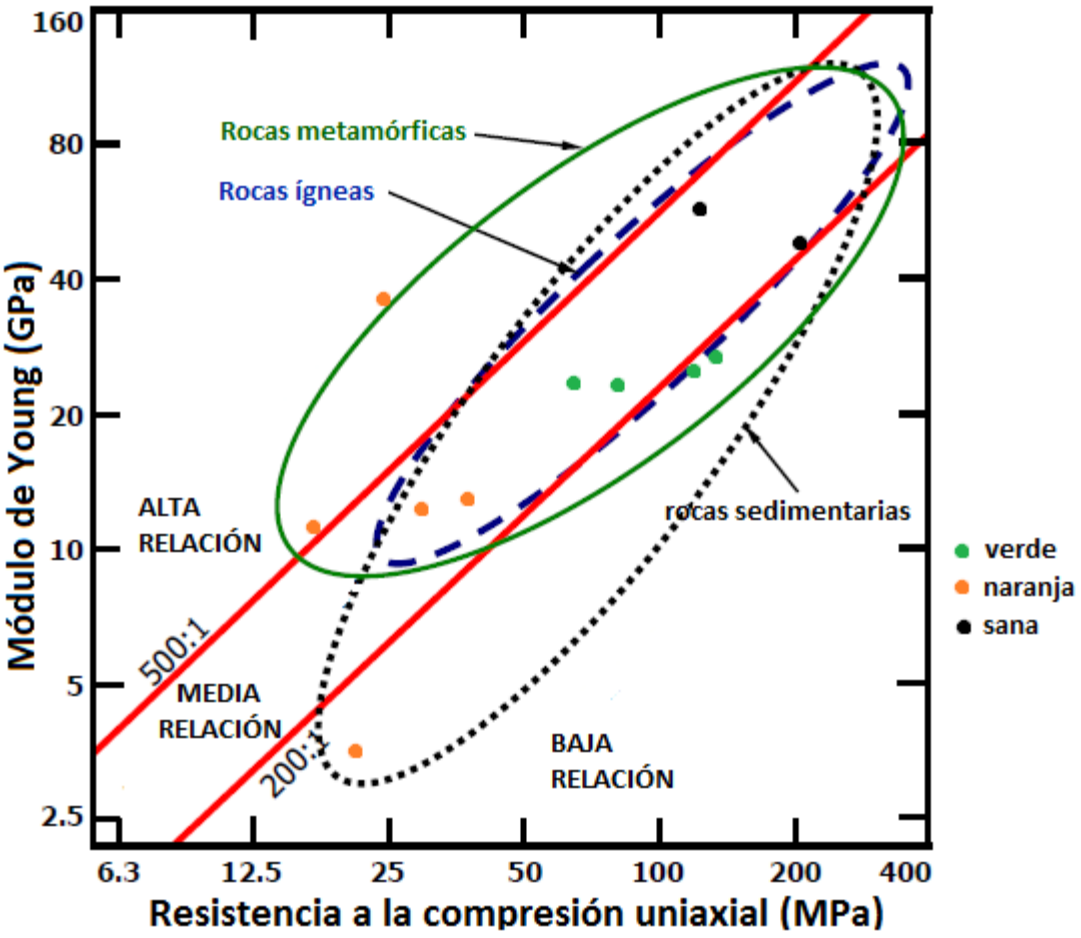


Figura 4. 11. Correlación entre resistencia y módulo de Young con resultados de experimentos

Modificado por Peralta (2014) tomado de
http://lmrwww.epfl.ch/en/ensei/Rock_Mechanics/ENS_080312_EN_JZ_Notes_Chapter_4.pdf

El valor promedio del módulo de Young para la roca sana obtenido experimentalmente es de 5,8 x10^5 kg/cm^2 lo cual es mayor al típico que se cita en el Cuadro 2.4. que es entre 3,0 – 4,0 x10^5 kg/cm^2. Por otro lado los valores promedios del módulo Young obtenidos

experimentalmente para la rocas verdes (R27-1) y naranjas (R27-3) son 2,4 x10^5 kg/cm^2 y 1,58 x10^5 kg/cm^2 respectivamente, lo cual es menor que el rango citado para la andesita. Esto es esperable debido a los efectos de la sustitución de minerales causados por la alteración hidrotermal.

Algo análogo ocurre con el valor del módulo de Poisson que pudo ser calculado para la roca sana y para la verde (R27-1), los valores promedio obtenidos experimentalmente son ambos de 0,19. Este valor es menor que el límite inferior del rango citado como típico en el Cuadro 2.4. que es de 0,23 - 0,32.

Se han realizado recientemente ciertos trabajos de investigación que también buscan caracterizar tipos de rocas en Costa Rica. Se pueden comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de A. Morice (2010) sobre clasificación de agregados y K. Cruz (2005) sobre rocas volcánicas blandas en el Gran Área Metropolitana.

En el trabajo de A. Morice (2010) los valores de absorción van de 4,7% a 1,75% mientras que los resultados de esta investigación 8,6% a 1%, esto demuestra que los valores son más extremos en esta investigación debido a los tipos de rocas tan alterados que se ensayaron. En la investigación de A. Morice (2010) los resultados de porcentaje de pérdida por abrasión van del 31% a 17,8%, mientras que en el presente trabajo van del 60,2% al 8% de nuevo se puede observar que el rango es más amplio en esta investigación, aunque se trate de un estudio de materiales de una localización muy puntual y la de A. Morice (2010) sea de tajo en el sitio de préstamo Cerro Minas, Quebrador Santa Ana. Los resultados de resistencia a la compresión uniaxial inconfinada van de 10 MPa a 21 MPa. En este trabajo se dan resultados de materiales con menor resistencia en el tipo de roca R27-4 (blanca) alterada fuertemente, mientras que los

resultados de roca sana y medianamente sana son mucho mayores variando de 95 a 146 MPa. En cuanto a la gravedad específica bruta los valores tienden en torno a 2,5, los resultados de esta investigación varían de 2,1 a 2,6 por lo que el rango de esta investigación es mucho más amplio. Esto se explica debido a que se estudiaron rocas con mucha variabilidad debido a los diferentes grados de alteración. Ambos juegos de resultados cumplen las relaciones entre absorción y porosidad y densidad seca con porosidad propuestas por Kanji (2014). Las rocas analizadas por Morice son también andesitas porfiríticas, en algunos casos con silicificación, presencia de sericita y calcita.

En la investigación de K. Cruz (2005) que estudia muestras de rocas piroclásticas de diferentes sitios de la Gran Área Metropolitana (GAM) los valores de la porosidad varían entre 4,1% y 43,6%. Este segundo valor es mucho mayor al máximo calculado en esta investigación que es de 8,6%, esto tiene sentido en cuanto que el trabajo de K. Cruz (2005) es enfocado en rocas blandas y estas tienen usualmente porosidades muy altas. Los valores de la resistencia la compresión uniaxial inconfinada varían en la investigación de K. Cruz (2005) entre 2,64 MPa y 49,98 MPa. Como se puede ver, al enfocarse en rocas blandas, se obtiene resultados de resistencia muy bajos y el límite superior queda muy por debajo de las rocas sanas de esta investigación (146 MPa). Algunas de las rocas analizadas en este trabajo son andesitas piroxénicas por lo que coinciden en características geológicas con las analizadas del 48 km de la Ruta 27.

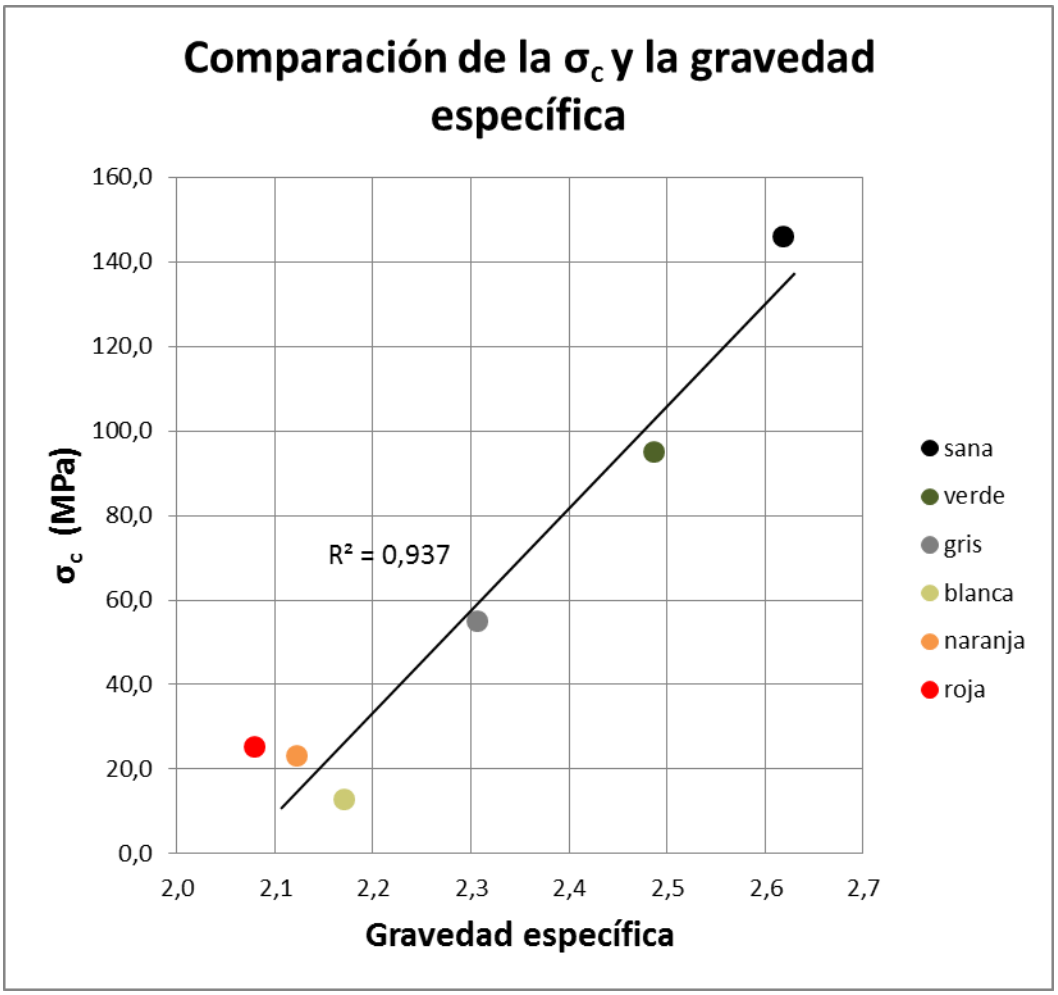


Figura 4. 12. Comparación de la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada y la gravedad específica.

La Figura 4.12. es la comparación entre la resistencia a la compresión uniaxial inconfinada y los valores promedio de la gravedad específica. Se puede observar una relación lineal fuerte (R2 = 0,937) entre el valor de la gravedad específica y la resistencia a la compresión uniaxial.

4.3. Recomendación de metodología para identificar alteración hidrotermal en una obra

Como se ha demostrado en esta investigación el fenómeno de la alteración hidrotermal puede llevar a una modificación importante de algunas de las propiedades de los materiales más importantes para una obra civil. Por esta razón resulta importante tener en cuenta la posibilidad de que exista este fenómeno en el sitio de una obra, sobre todo si se encuentra en zonas geológicas propensas a presentar este fenómeno. No es fácil determinar con seguridad si se da este fenómeno, ya que algunas de las características más comunes también pueden darse por otras razones como la simple meteorización. Sin embargo sí se pueden identificar ciertas "alarmas" y recomendar algunos ensayos y que ayuden a reconocer el fenómeno. En la figura 4.12. se muestra una recomendación de metodología.

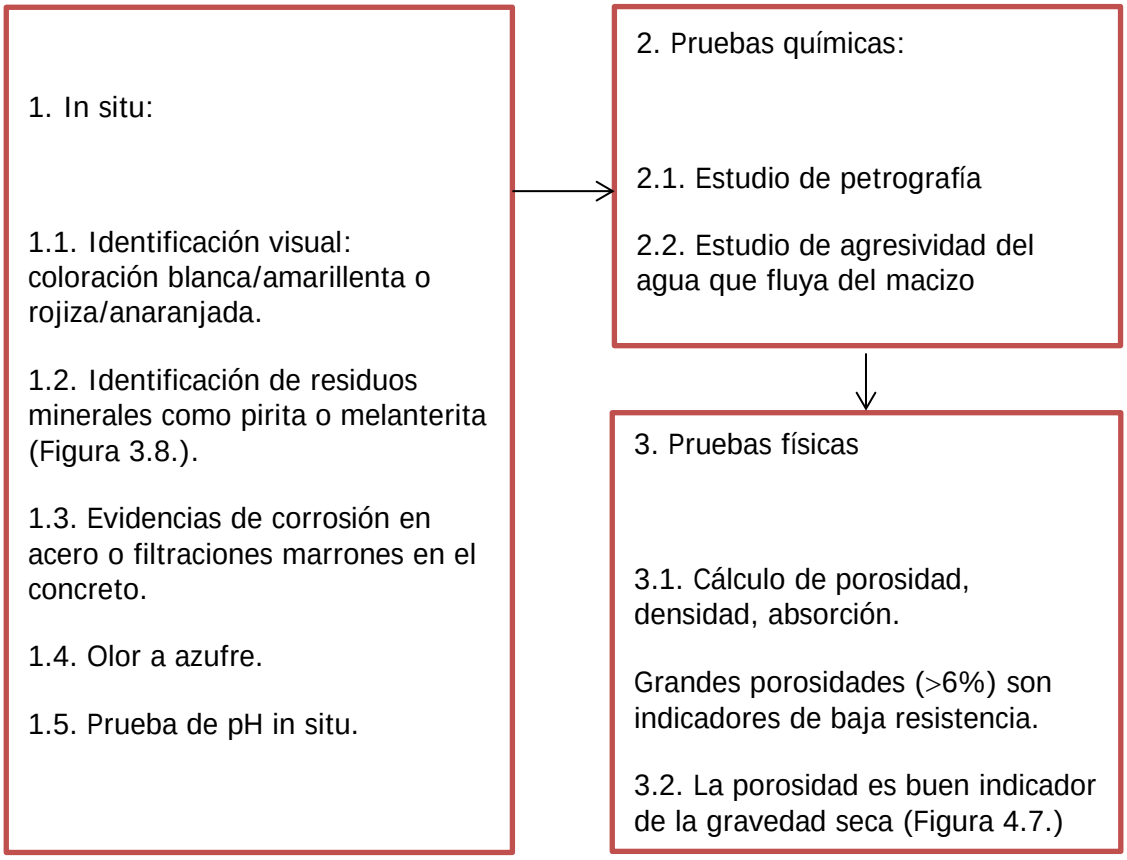


Figura 4. 13. Metodología para identificación de alteración hidrotermal en un sitio.

De primera entrada in situ se pueden identificar varias características. Por ejemplo, una fuerte coloración blanca/amarillenta o rojiza/anaranjada puede ser indicador de los minerales productos de la alteración hidrotermal. De la misma forma la identificación de presencia de pirita o melanterita es una buena señal de que se trata del fenómeno en cuestión. El olor a azufre y un pH ácido indican la presencia de químicos probablemente productos de la alteración hidrotermal. Ya en el laboratorio químico se pueden hacer pruebas de la agresividad del agua que fluye desde el macizo. El trabajo de Vargas A. y Fernández J. F. (2002) es una referencia para verificar los límites recomendados para estructuras de concreto. Con un ensayo de petrografía es la mejor forma de identificar los

minerales presentes y unido con el estudio in situ puede determinar con seguridad la presencia de la alteración hidrotermal. Por otro lado en cuanto a pruebas físicas es fácil determinar la absorción que se relaciona directamente con la porosidad como se demuestra en la Figura 4.5. Por otro lado, la porosidad se relaciona directamente con la densidad seca y a su vez esta con la resistencia a la compresión uniaxial.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La alteración hidrotermal implica modificaciones complejas de una roca, que abarcan cambios mineralógicos, texturales y de composición. Por lo tanto, su adecuada comprensión depende de un enfoque multidisciplinario (vulcanología, geología, petrología, geoquímica y mecánica de rocas). Los estudios petrográficos y mineralógicos de los bloques de roca analizados sugieren que la alteración hidrotermal en el sitio consistió principalmente en propilitización, sericitación y alteración argilítica.
- En las muestras tomadas directamente del talud y en la más sana se trata de una alteración propilítica que se caracteriza por la presencia de epidota, clorita, albita, calcita y pirita
- La presencia de caolinita, sericita y cuarzo en algunas de las muestras apunta a una alteración argilítica o sericítica.
- Se registraron valores sumamente ácidos probablemente debido a la reacción de pirita que produce ácido sulfúrico. Esto explica el daño a las estructuras de concreto y los elementos de acero (mallas, refuerzo) a lo largo de la ruta.
- Conforme se da una alteración más intensa tienden a aumentar exponencialmente los valores de la porosidad y la absorción. Mientras que la gravedad específica tiende a disminuir linealmente conforme aumenta la intensidad de la alteración.
- El valor de absorción de las rocas alteradas hidrotermalmente es proporcional según una relación exponencialmente decreciente al de la porosidad.
- El grado de alteración hidrotermal afecta desigualmente las propiedades geomecánicas importantes para el diseño geotécnico. Es decir dependiendo del

tipo y grado de alteración, puede incrementarse o disminuirse la resistencia a compresión uniaxial considerablemente, pasando de ser roca sana clasificada como de alta resistencia a una roca blanda o muy blanda.

- Según la clasificación de la ISRM (1981) los tres las rocas analizadas con diferentes grados de alteración van desde rocas "muy blandas" a rocas "muy duras", esto resalta la variabilidad de la competencia mecánicas en distancias relativamente cortas.
- Resulta evidente que el cambio de las propiedades geomecánicas como la resitencia a la compresión incofinada afectará la estabilidad de taludes y obras subterráneas. Si bien un análisis de macizos concretos implica una investigación aparte, sí se puede inferir a partir de los resultados obtenidos en la disminución de la resistencia a la compresión inconfinada que los resultados de aplicar los sistemas de clasificación de rocas se obtendrá un resultado que infiera una baja competencia y por lo tanto valores inferiores de ángulo de rozamiento interior y cohesión. Además el hecho de que los diferentes estadios de la alteración se manifiesten en cortas distancias también lleva a que las situaciones sean más difíciles de controlar y a la presencia de planos de debilidad en los macizos. A la vez estas conclusiones se ven confirmadas por la experiencia de deslizamientos en la zona geológica y en la Ruta 27.
- Se concluye de forma general que los materiales alterados hidrotermalmente estudiados en esta investigación no deben se utilizados como agregados en una obra civil, debido a su alta acidez y malas características geomecánicas.

5.2. Recomendaciones

- Usar el valor fácilmente obtenible de absorción para correlacionar con la resistencia a compresión uniaxial inconfinada, es un manera de identificar en campo si se sospecha que hay presencia de alteración hidrotermal.
- Si se detecta olor a azufre o coloraciones fuertes rojizas, anaranjadas o amarillentas, tener en cuenta la posibilidad de que se encuentra en una litología afectada por la alteración hidrotermal.
- Debido a que la alteración se da en forma de aureolas y en cuestión de pocos metros se dan cambios fuertes en las características de la roca, es importante tomarlo en cuenta en el diseño geotécnico. Sobre todo en el caso que se estudió en el tema de los taludes, que ya han sido causa de accidentes en la zona.
- Se recomienda investigar sobre la interacción de los minerales de las rocas alteradas hidrotermalmente con el concreto y el acero de las diferentes soluciones geotécnicas como concreto lanzado y anclajes, debido a que se pueden haber interacciones fuertes que pongan en peligro la seguridad de estas soluciones, debido a la presencia de minerales como la pirita que puede generar ácido sulfúrico.
- Hacer un estudio variado de casos de alteración hidrotermal en el país, para ir formando una base de datos accesible para dar orientaciones a los ingenieros residentes de proyecto sobre cómo proceder en los diferentes ambientes geológicos del país.
- Se recomienda realizar estudios de agresividad del agua cuando se trabaje en este tipo de ambientes geológicos.

- Se recomienda instalar un sistema de protección contra el agua de escorrentía en taludes que si bien debe ser una práctica común, debe intensificarse en ambientes alterados hidrotermalmente, donde se espera que la degradación sea más acelerada por la inestabilidad de los minerales.
- Sería de un gran beneficio para el país definir una metodología general para el tratamiento de taludes en ambientes hidrotermales, que también tome en cuenta una adecuada inspección especializada para estos casos. Dentro del grupo de especialistas resulta fundamental la participación de geólogos con experiencia en medios volcánicos e ingeniería geotécnica que puedan brindar recomendaciones específicas para taludes que involucran ajustes de pendientes, control de aguas, tratamientos con vegetación y sobre todo tener en cuenta que en estos medios los imprevistos serán mayores.

Capítulo 6. Referencias

Ale, J. D., Clariá J.J., Rocca R.J. & Bonalumi A.A. Influencia de alteración hidrotermal en el diseño geotécnico de macizos rocosos. *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2012 CAMSIG XXI, Rosario, Santa Fé, Argentina.*

Alvarado G. E., Gans P. B. (2012) Síntesis Geocronológica del Magmatismo, Metamorfismo y Metalogenia de Costa Rica, América Central, *Revista Geológica de América Central,* I (1984), pp. 7-122, San José, Costa Rica.

Aragonés, E. (1984) *Geología y alteración hidrotermal en el campo geotérmico Miravalles, provincia de Guanacaste, Costa Rica.*(Tésis de licenciatura). San José: Escuela Centroamericana de Geología.

ASTM International. (2008) *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.* Conshohocken, USA.

ASTM International. (2013) *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method.* Conshohocken, USA.

Bois, L. (2011) *Potential for Use of Methylene Blue Index testing to Enhance Geotechnical Characterization of Oil Sands Ores and Tailings*, SRK Consulting, Vancouver, Canada.

Cruz, K. (2005) *Caracterización geotécnica de rocas volcánicas blandas existentes en el Gran Área Metropolitana, usando el criterio de roca intacta.* Universidad Latina de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Kanji, M. A. (2014). *Critical issues in soft rock, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014).*

Gonzáles de la Cotera, M. (1991). *Ataque químico al concreto.* Capítulo Peruano del ACI sobre corrosión en estructuras de concreto.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid: Pearson Educación.

Laguna Morales, J. (1983). *Petrologie, Geochemie und Tonmineralogie der Vulcanite der Aguacate Formation (Miozön-Pliozön), Costa Rica, Xentralamerika*. Marburg: Philipps Universität.

Laguna Morales, J. (1984). Efectos de alteración hidrotermal y metorización en vulcanitas del grupo Aguacate, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central,* I (1984), pp. 1-17, San José, Costa Rica.

Laguna Morales, J. (1985). *Posición geotectónica y origen de los magmas productores de las vulcanitas del Grupo Aguacate (Costa Rica) por utilización de elementos traza.* Brenesia, Vol. 24.

Maksaev, V. (1991). *Curso de Metalogénesis.* Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Morice, A. (2010). *Caracterización geotécnica de Rocas, para establecer una clasificación de agregados para construcción.* Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Meyer, C. y Hemley, J. J. (1967). *Wall Rock Alteration, en Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits.* Holt, Rinehart and Winston Inc. Publication.

Ortega, L., Oyarzun, R., Gallego, M. & Lillo, J. (1994) *Geoquímica de los procesos de alteración hidrotermal en la mineralización de Sb de Mari Rosa (Zona Centro Ibérica).* National Institute of Rourkela, India.

Palmström, A. (1995). *RMi-A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes,* Departmento de Geología, Universidad de Oslo, Oslo, Noruega.

PITRA, Programa de Infraestructura del Transporte. (2011) *Evaluación de las condiciones hidrotermales entre los kilómetros 38 y 48 de la Ruta Nacional 27,* Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional, San José, Costa Rica.

Pola, A., Crosta, R., Agliardi, F., Fusi, N., Barberini, V. & Galimberti, L. (2012). *Characterization and comparison of pore distribution in weathered volcanic rocks by different techniques.* Taylor & Francis Group, London.

Pola, A., Crosta, G.B., Castellanza, R., Agliardi, F., Fusi, N., Barberini, V., Norini, G. & Villa, A. (2012). *Relationships between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks.* Taylor & Francis Group, London.

Porras, H., Cascante, M., Granados, R., Alvarado, G. E. (2012) *Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central Occidental y las estribaciones de Los Montes del Aguacate a lo largo de la Ruta 27, Costa Rica.* Revista Geológica de América Central, Número 47.

Shanks, W. C. Pat III. (2010), *Hydrothermal Alteration*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Swain, C. (2010) *Determination of Rock Strength from Slake Durability Tests, Protodyakonov Impact Tests and Los Angeles Abrasion Resistance Tests.* National Institute of Rourkela, India.

Vargas A., Fernández J. F. (2002) *Aplicación de una metodología para evaluar la agresividad del agua hacia estructuras del concreto.* Revista Geológica de América Central, Vol. 27, pp. 125-132.

Viterbo Phelps Dodge, VC, McLemore, V.T. & Aimone-Martin, C.T. Geotechnical and Geomechanical Characterisation of the Goathill North Rock Pile at the Questa Molybdenum Mine, New Mexico, USA. L.A.F. Gutierrez Golder Associates Inc, United States

Žáček, V. (2012) Geología y estratigrafía de la hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, Vol. 47, pp. 7-54.

http://www.imcyc.com/revistacyt/sep11/arttecnologia.html, acceso 29 de diciembre del 2014.

http://www.upct.es/sait/_sit/html/recursos_difractometria.htm, acceso 3 de enero del 2015.

Anexo 1 Resultados de ensayos físicos

	Tipo de muestra: R27-1 (verde)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
CP2-1	744,4	753,1	454	8,7	3,00E-04	8,72E-06	3,09E-04	2,49	2482,6	24,4	1,17%	2,83%	1,17%
CP2-2	1176	1186,6	717,8	10,6	4,70E-04	1,06E-05	4,81E-04	2,51	2502,3	24,5	0,90%	2,21%	0,90%
CP2-3	881,8	893,1	536,9	11,3	3,57E-04	1,13E-05	3,68E-04	2,48	2469,4	24,2	1,28%	3,07%	1,28%
CP2-5	1456,5	1474,4	883,6	17,9	5,92E-04	1,79E-05	6,10E-04	2,47	2459,1	24,1	1,23%	2,94%	1,23%
CP2-6	1026,7	1037,0	629,3	10,3	4,09E-04	1,03E-05	4,19E-04	2,52	2512,0	24,6	1,00%	2,46%	1,00%
CP2-7	1250,8	1262,4	765,6	11,6	4,98E-04	1,16E-05	5,10E-04	2,52	2511,4	24,6	0,93%	2,28%	0,93%
CP2-8	636,8	649,5	388,4	12,7	2,62E-04	1,27E-05	2,74E-04	2,44	2432,8	23,9	1,99%	4,64%	1,99%
CP2-9	695,5	706,7	426,2	11,2	2,81E-04	1,12E-05	2,92E-04	2,48	2473,3	24,3	1,61%	3,84%	1,61%
CP2-10	464,9	473,4	285,1	8,5	1,89E-04	8,52E-06	1,97E-04	2,47	2462,8	24,2	1,83%	4,32%	1,83%
CP2-11	1192,4	1211,1	729,7	18,7	4,83E-04	1,87E-05	5,01E-04	2,48	2470,7	24,2	1,57%	3,74%	1,57%
CP2-12	584,6	593,1	359,0	8,5	2,35E-04	8,52E-06	2,43E-04	2,50	2491,0	24,4	1,45%	3,50%	1,45%
CP2-13	1019,5	1031,1	621,2	11,6	4,11E-04	1,16E-05	4,23E-04	2,49	2481,0	24,3	1,14%	2,75%	1,14%
CP2-14	932,1	943,6	569,4	11,5	3,75E-04	1,15E-05	3,87E-04	2,49	2484,7	24,4	1,23%	2,98%	1,23%
CP2-15	947,1	964,5	582,3	17,4	3,83E-04	1,74E-05	4,01E-04	2,48	2471,8	24,2	1,84%	4,35%	1,84%
CP2-16	1182,4	1199,4	722,2	17,0	4,78E-04	1,71E-05	4,95E-04	2,48	2471,5	24,2	1,44%	3,44%	1,44%
CP2-17	1177,8	1194,7	720,5	16,9	4,75E-04	1,70E-05	4,92E-04	2,48	2477,1	24,3	1,44%	3,45%	1,44%
CP2-18	1179,2	1192,1	722,7	12,9	4,71E-04	1,29E-05	4,84E-04	2,51	2505,9	24,6	1,09%	2,67%	1,09%
CP2-19	874,9	886,4	538,2	11,5	3,49E-04	1,15E-05	3,61E-04	2,51	2506,4	24,6	1,31%	3,20%	1,31%
CP2-20	918,6	933,0	561,0	14,4	3,73E-04	1,44E-05	3,87E-04	2,47	2463,2	24,2	1,57%	3,73%	1,57%

	Tipo de muestra: R27-2 (gris)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
CP4-1	673,1	695,8	400,8	22,7	2,96E-04	2,28E-05	3,18E-04	2,28	2276,0	22,3	3,37%	7,15%	3,37%
CP4-2	1335,5	1355,4	795,3	19,9	5,62E-04	1,99E-05	5,81E-04	2,38	2378,4	23,3	1,49%	3,43%	1,49%
CP4-3	288,7	291,9	170,4	3,2	1,22E-04	3,21E-06	1,25E-04	2,38	2370,2	23,3	1,11%	2,57%	1,11%
CP4-4	1337,0	1395,4	793,3	58,4	6,04E-04	5,85E-05	6,62E-04	2,22	2215,0	21,7	4,37%	8,84%	4,37%
CP4-5	1056,7	1063,2	631,9	6,5	4,32E-04	6,52E-06	4,39E-04	2,45	2443,9	24,0	0,62%	1,48%	0,62%
CP4-6	548,5	563,1	329,5	14,6	2,34E-04	1,46E-05	2,49E-04	2,35	2342,2	23,0	2,66%	5,88%	2,66%
CP4-7	1110,4	1125,0	667,7	14,6	4,58E-04	1,46E-05	4,73E-04	2,43	2422,1	23,8	1,31%	3,09%	1,31%
CP4-8	1321,7	1370,2	778,3	48,5	5,93E-04	4,86E-05	6,42E-04	2,23	2227,4	21,9	3,67%	7,57%	3,67%
CP4-9	2217,4	2234,7	1308,3	17,3	9,29E-04	1,73E-05	9,46E-04	2,39	2387,6	23,4	0,78%	1,83%	0,78%
CP4-10	598,0	609,4	355,6	11,4	2,54E-04	1,14E-05	2,66E-04	2,36	2350,3	23,1	1,91%	4,30%	1,91%
CP4-11	1077,5	1138,7	617,4	61,2	5,23E-04	6,14E-05	5,84E-04	2,07	2061,8	20,2	5,68%	10,51%	5,68%
CP4-12	503,0	530,3	295,9	27,3	2,35E-04	2,74E-05	2,62E-04	2,15	2140,5	21,0	5,43%	10,43%	5,43%

	Tipo de muestra: R27-3 (naranja)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
CP5-1	538,1	575,8	336,5	37,7	2,40E-04	3,78E-05	2,78E-04	2,25	2243,0	22,0	7,01%	13,61%	7,01%
CP5-2	172,6	185,3	104,8	12,7	8,07E-05	1,27E-05	9,34E-05	2,14	2138,7	21,0	7,36%	13,63%	7,36%
CP5-3	516,1	569,6	315,6	53,5	2,55E-04	5,36E-05	3,08E-04	2,03	2026,8	19,9	10,37%	17,40%	10,37%
CP5-4	868,7	944,9	537,9	76,2	4,08E-04	7,64E-05	4,84E-04	2,13	2129,1	20,9	8,77%	15,77%	8,77%
CP5-5	587,1	643,7	358,0	56,6	2,86E-04	5,67E-05	3,43E-04	2,05	2049,8	20,1	9,64%	16,54%	9,64%

	Tipo de muestra: R27-4 (blanca)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
1	334,5	360,7	207,3	26,2	1,54E-04	2,63E-05	1,80E-04	2,18	2175,1	21,3	7,83%	14,59%	7,83%
2	236,7	257,5	145,6	20,8	1,12E-04	2,09E-05	1,33E-04	2,12	2110,0	20,7	8,79%	15,67%	8,79%
3	198,1	213,1	122,2	15	9,11E-05	1,50E-05	1,06E-04	2,18	2173,9	21,3	7,57%	14,16%	7,57%
4	295,5	318,6	182,5	23,1	1,36E-04	2,32E-05	1,60E-04	2,17	2165,8	21,2	7,82%	14,51%	7,82%
5	260,1	278,5	160,8	18,4	1,18E-04	1,84E-05	1,36E-04	2,21	2204,3	21,6	7,07%	13,52%	7,07%

	Tipo de muestra: R27-5 (roja)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
1	225,0	237,4	143,0	12,4	9,46E-05	1,24E-05	1,07E-04	2,38	2377,5	23,3	5,51%	11,61%	5,51%
2	75,9	84,3	44,3	8,4	4,01E-05	8,42E-06	4,85E-05	1,90	1892,8	18,6	11,07%	17,36%	11,07%
3	87,2	96,2	49,9	9	4,64E-05	9,02E-06	5,54E-05	1,88	1878,7	18,4	10,32%	16,27%	10,32%
4	415,5	445,8	252,8	30,3	1,93E-04	3,04E-05	2,24E-04	2,15	2147,5	21,1	7,29%	13,57%	7,29%

	Tipo de muestra: R27-7 (sana)												
	Masa				Volumen								
	seco	sss	sum	w	sólidos	agua	total	Gbs	Densidad	Densidad	w(%)	n(%)	%D
	(g)	(g)	(g)	(g)	m3	m3	m3		kg/m^3	kN/m^3			
1	417,0	420,0	262,0	3	1,58E-04	3,01E-06	1,61E-04	2,64	2632,6	25,8	0,72%	1,86%	0,72%
2	667,2	673,7	419,2	6,5	2,55E-04	6,52E-06	2,62E-04	2,62	2615,1	25,7	0,97%	2,49%	0,97%
3	1090,9	1100,6	688,1	9,7	4,14E-04	9,72E-06	4,23E-04	2,64	2638,0	25,9	0,89%	2,30%	0,89%
4	897,2	911,0	561,7	13,8	3,50E-04	1,38E-05	3,64E-04	2,57	2562,1	25,1	1,54%	3,80%	1,54%

Anexo 2 Resultados de ensayos mecánicos

Anexo 2b Resultados de ensayo de abrasión

	# de Prueba							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre	R27-4	R27-4	R27-1	R27-1	R27-2	R27-3	R27-7	R27-5
Descripción	blanca	blanca	verde	verde	gris	naranja	sana	roja
Pasando 2" y retenido en 1 1/2" (g)	5026,5	5004,5	5009,3	5006,4	5002,1	5000,9	5005,9	5006,3
Pasando 1 1/2" y retenido en 1" (g)	5013,7	5003,0	5006,6	5002,4	5008,8	5004,9	5003,4	4997,4
Masa total (g)	10040,2	10007,5	10015,9	10008,8	10010,9	10005,8	10009,3	10003,7
Bandeja (g)	561,5	505,2	430,8	510,0	511,0	785,3	765,3	508,0
Material + bandeja (g)	4771,4	4486,5	8808,3	8917,0	8453,5	4912,5	9973,4	4913,3
Pérdida (g)	5830,3	6026,2	1638,4	1601,8	2068,4	5878,6	801,2	5598,4
Porcentaje de pérdida %	**58,1%**	**60,2%**	**16,4%**	**16,0%**	**20,7%**	**58,8%**	**8,0%**	**56,0%**

Anexo 2c Resultados de ensayo de carga puntual

Tipo de muestra: R27-1 (verde seca)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP1-1	117,1	65,0	62,1	63,5	42	5,49	5,42		2669	3398	1,62
CP1-2	145,2	67,3	51,2	59,2	41	2,70	2,66		2429	3092	0,87
CP1-3	152,8	60,4	39,2	49,8	44	3,96	3,90		2192	2791	1,42
CP1-4	141,1	94,3	97,0	95,7	65,0	11,92	11,82		6218	7917	1,51
CP1-5	86,0	60,7	89,4	75,1	56,5	9,80	9,70		4241	5400	1,81

Tipo de muestra: R27-1 (verde, saturada)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP2-1	82,4	68,1	73,6	70,9	55	2,78	2,74		3898	4963	0,56
CP2-2	112,5	70,7	71,4	71,0	62	9,92	9,82		4403	5606	1,77
CP2-3	85,3	74,3	74,3	74,3	61	13,47	13,36		4534	5773	2,33
CP2-5	111,1	77,7	90,4	84,0	57	5,80	5,73		4790	6098	0,95
CP2-6	80,5	75,1	86,4	80,7	71	19,11	19,00		5731	7297	2,62
CP2-7	94,8	91,4	91,9	91,7	99	14,92	14,81		9074	11554	1,29
CP2-8	85,5	65,2	65,8	65,5	55,5	3,33	3,28		3635	4628	0,72
CP2-9	85,9	60,5	64,7	62,6	56	9,16	9,07		3505	4462	2,05
CP2-10	92,3	66,8	73,2	70,0	36,5	5,71	5,64		2555	3253	1,76
CP2-11	136,9	72,0	70,2	71,1	55,5	10,47	10,37		3947	5025	2,08
CP2-12	111,8	61,2	63,1	62,2	38,2	3,79	3,74		2375	3024	1,25
CP2-13	106,5	75,5	75,8	75,6	56	2,41	2,37		4236	5394	0,45
CP2-14	98,6	86,5	58,3	72,4	59,75	2,59	4,56		4326	5508	0,47
CP2-15	127,3	73,3	77,3	75,3	42	5,32	5,25		3163	4027	1,32
CP2-16	125,4	75,3	73,7	74,5	54,87	11,27	11,17		4087	5204	2,17
CP2-17	123,1	60,7	51,1	55,9	77,5	7,32	7,24		4330	5513	1,33
CP2-18	96,9	58,9	63,1	61,0	76,69	4,66	4,60		4678	5957	0,78
CP2-19	100,4	71,4	72,0	71,7	51,1	5,05	4,98		3662	4663	1,08
CP2-20	103,7	41,9	49,9	45,9	48	8,14	8,05		2203	2805	2,90

Tipo de muestra: R27-2 (gris, saturada)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP4-1	84,0	72,4	83,3	77,8	44	5,11	5,04		3425	4360	1,17
CP4-2	90,4	87,9	89,7	88,8	75	5,33	5,26		6659	8478	0,63
CP4-3	73,1	65,9	44,2	55,1	28	3,03	2,98		1542	1963	1,54
CP4-4	132,0	101,0	87,6	94,3	51	22,93	22,82		4808	6122	3,75
CP4-5	109,8	88,6	87,7	88,2	42	16,99	16,88		3703	4715	3,60
CP4-6	94,1	70,0	92,1	81,1	31	6,29	6,22		2513	3200	1,97
CP4-7	121,7	79,3	87,4	83,4	48	2,26	2,22	*	4002	5095	0,44
CP4-8	109,4	71,5	87,3	79,4	85	8,52	8,43	*	6749	8593	0,99
CP4-9	146,2	102,2	68,9	85,5	89	5,33	5,26		7613	9693	0,55
CP4-10	132,0	88,9	87,6	88,2	26	7,19	7,11		2294	2921	2,46
CP4-11	113,3	62,6	78,3	70,4	71	4,94	4,88	*	5000	6366	0,78
CP4-12	128,2	71,3	69,8	70,6	45	6,54	6,46		3175	4042	1,62

Tipo de muestra: R27-2 (gris, seca)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP5-1	138,6	82,3	102,8	92,5	72	8,23	8,14	*	6662	8482	0,97
CP5-2	163,7	73,6	81,9	77,8	74	13,53	13,42		5756	7329	1,85
CP5-3	123,8	80,3	98,8	89,5	45	3,27	3,22		4028	5129	0,64
CP5-4	136,0	106,2	88,6	97,4	35	13,90	13,79		3408	4340	3,20
CP5-5	107,1	97,2	98,4	97,8	50	14,71	14,60		4890	6226	2,36
CP5-6	97,4	56,5	57,6	57,1	33	5,70	5,63		1884	2398	2,38
CP5-7	112,9	62,1	59,9	61,0	47	5,20	5,13		2869	3653	1,42
CP5-8	130,6	53,0	72,1	62,5	48	12,84	12,73		3000	3820	3,36
CP5-9	144,6	62,2	62,6	62,4	23	4,81	4,75		1435	1827	2,63
CP5-10	94,8	43,4	45,2	44,3	45	8,85	8,76		1993	2537	3,49
CP5-11	72,3	73,9	49,1	61,5	43	3,81	3,76		2645	3367	1,13
CP5-12	149,2	53,1	72,0	62,5	31	6,89	6,81		1938	2468	2,79
CP5-13	110,8	54,0	77,6	65,8	57	11,00	10,90		3749	4773	2,30
CP5-14	61,7	54,6	56,3	55,4	34	1,38	1,35		1885	2400	0,57
CP5-15	148,9	93,2	82,7	88,0	39	7,20	7,12		3431	4369	1,65
CP5-16	145,6	92,0	94,7	93,4	55	7,80	7,72		5135	6537	1,19
CP5-17	114,8	67,2	94,3	80,7	52	9,49	9,40		4197	5344	1,78
CP5-18	95,4	60,5	65,2	62,9	45	5,42	5,35		2829	3602	1,50
CP5-19	84,0	74,4	59,0	66,7	35	4,00	3,94		2335	2973	1,35
CP5-20	111,0	71,2	61,5	66,3	45	8,34	8,25		2985	3800	2,19
CP5-21	116,8	99,0	86,3	92,6	67	10,23	10,13		6206	7902	1,29

Tipo de muestra: R27-4 (blanca, seca)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP3-1	136,6	85,5	83,7	84,6	72	1,98	1,94		6090	7755	0,26
CP3-2	87,4	79,7	70,2	75,0	54	1,28	1,25		4048	5155	0,25
CP3-3	113,9	86,2	92,2	89,2	36	2,09	2,05		3211	4089	0,51
CP3-4	84,6	82,7	85,4	84,1	45	3,85	3,80		3782	4816	0,80
CP3-5	96,6	68,3	72,7	70,5	57	1,41	1,38		4019	5117	0,28
CP3-6	93,0	66,4	75,8	71,1	46	1,52	1,49		3270	4163	0,37
CP3-7	92,0	61,1	51,4	56,2	40	1,20	1,17		2249	2863	0,42
CP3-8	130,6	83,1	93,1	88,1	88	3,55	3,50		7754	9873	0,36
CP3-9	111,7	74,9	93,7	84,3	66	1,85	1,82		5565	7085	0,26
CP3-10	88,2	74,2	73,9	74,0	35	1,85	1,82		2591	3299	0,56
CP3-11	110,1	76,8	95,7	86,2	42	1,65	1,62	*	3621	4610	0,36

Tipo de muestra: R27-3 (naranja, seca)											
		Wn		W	D	P	P'		A	De2	Is
	L (mm)	mm	mm	mm	mm	KN	KN		mm^2	mm^2	
CP6-1	52,6	60,5	60,2	60,3	33	7,21	7,13		1991	2534	2,84
CP6-2	49,3	86,5	70,6	78,6	31	5,13	5,06		2436	3101	1,65
CP6-3	45,3	73,0	56,6	64,8	48	3,60	3,55		3111	3962	0,91
CP6-4	46,1	102,3	85,6	93,9	46	7,44	7,36		4320	5501	1,35
CP6-5	43,0	50,1	57,9	54,0	38	3,44	3,39		2052	2612	1,32
CP6-6	30,0	106,1	103,1	104,6	59	14,86	14,75		6170	7856	1,89
CP6-7	37,4	75,9	68,8	72,3	44	5,25	5,18		3183	4053	1,30
CP6-8	54,8	42,2	47,2	44,7	46	7,83	7,74		2055	2617	2,99
CP6-9	30,1	54,3	64,8	59,6	40	3,93	3,87		2383	3034	1,30
CP6-10	27,8	29,3	36,0	32,6	34	3,81	3,76		1110	1413	2,70
CP6-11	36,4	29,7	40,9	35,3	54	4,57	4,51		1906	2426	1,88
CP6-12	37,2	80,0	88,1	84,0	43	4,31	4,25		3614	4601	0,94
CP6-13	44,0	82,2	76,0	79,1	38	7,15	7,07		3007	3828	1,87
CP6-14	43,3	64,8	72,0	68,4	51	10,48	10,38		3489	4442	2,36
CP6-15	40,1	77,4	95,3	86,3	39,5	7,61	7,53		3410	4342	1,75
CP6-16	25,0	55,1	53,6	54,4	36	9,35	9,26		1957	2492	3,75
CP6-17	63,0	63,6	82,0	72,8	33	5,85	5,78		2403	3060	1,91
CP6-18	63,0	70,7	80,0	75,4	51	12,56	12,45		3843	4893	2,57
CP6-19	75,7	77,0	74,9	76,0	53	11,67	11,57		4026	5126	2,28
CP6-20	55,0	94,3	99,8	97,1	63	8,42	8,33		6114	7785	1,08

Anexo 2d Resultados de martillo de Schmidt

	R27-1	R27-3	R27-7
	verde	naranja	sana
1	44	43	61
2	48	37,5	56
3	47	38	58
4	50	35	50
5	51	44	62
6	53	35	55
7	47	40	57
8	51	40	56
9	46	37	49
10	55	40	58
11	52	40	64
12	46	41	59
13	46	39	57
14	50	39	59
15	52	45	58
16		43	
17		35	
18		46	
19		51	
20		51	
21		49	
22		47	
23		37	
24		41	
25		41	

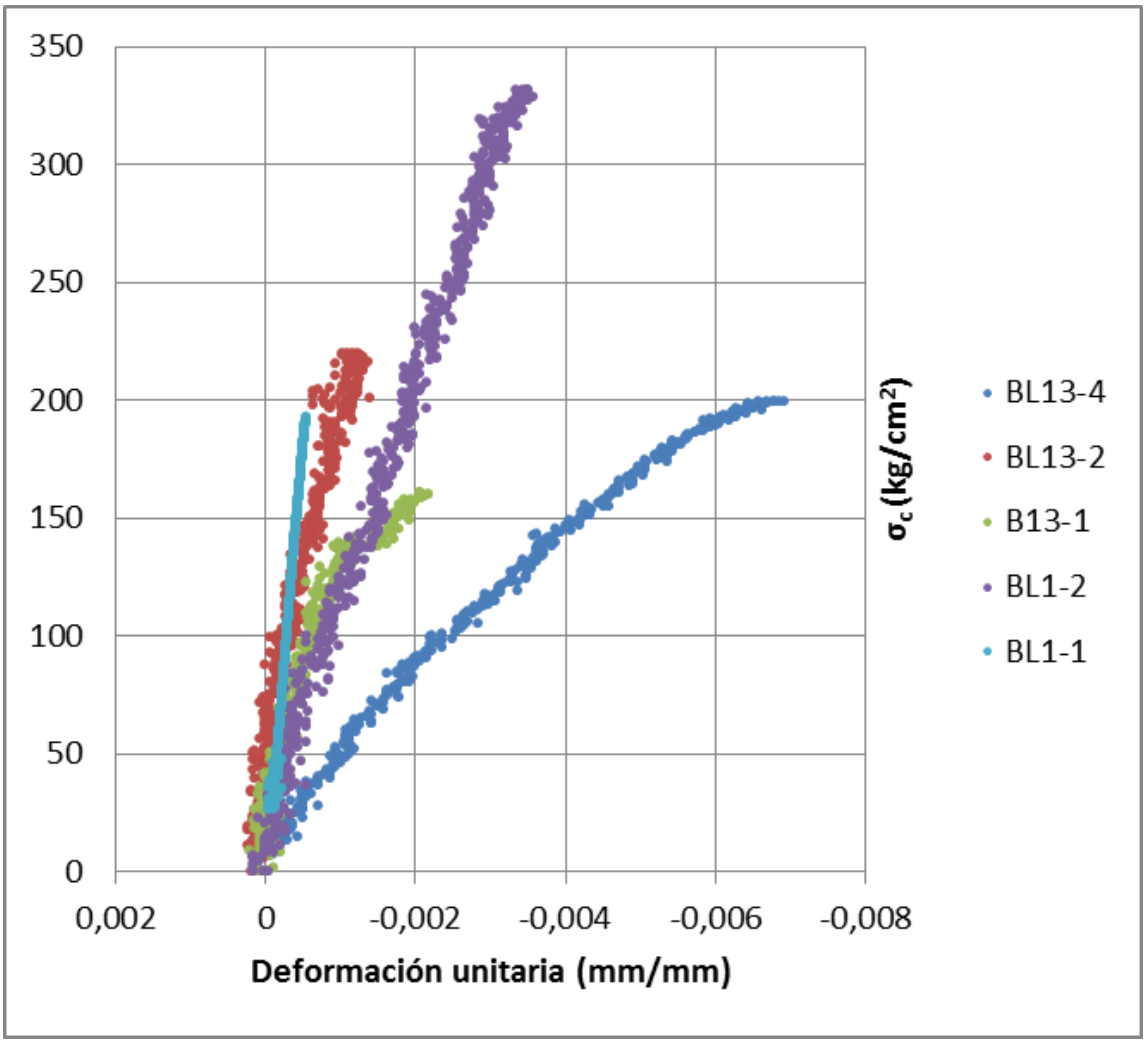
Datos tomados con martillo SC-001 del laboratorio de Geotecnia del Lanamme UCR.

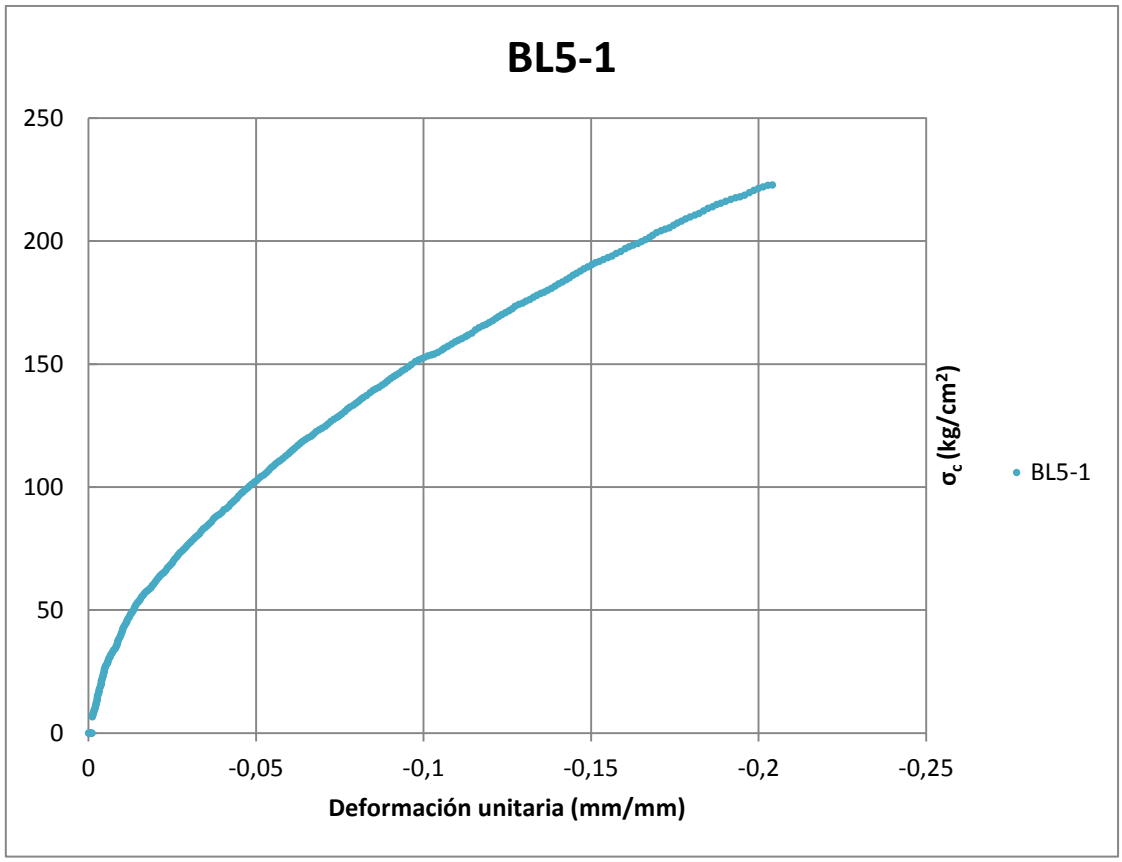
Anexo 2e Resultados de compresión uniaxial inconfinada

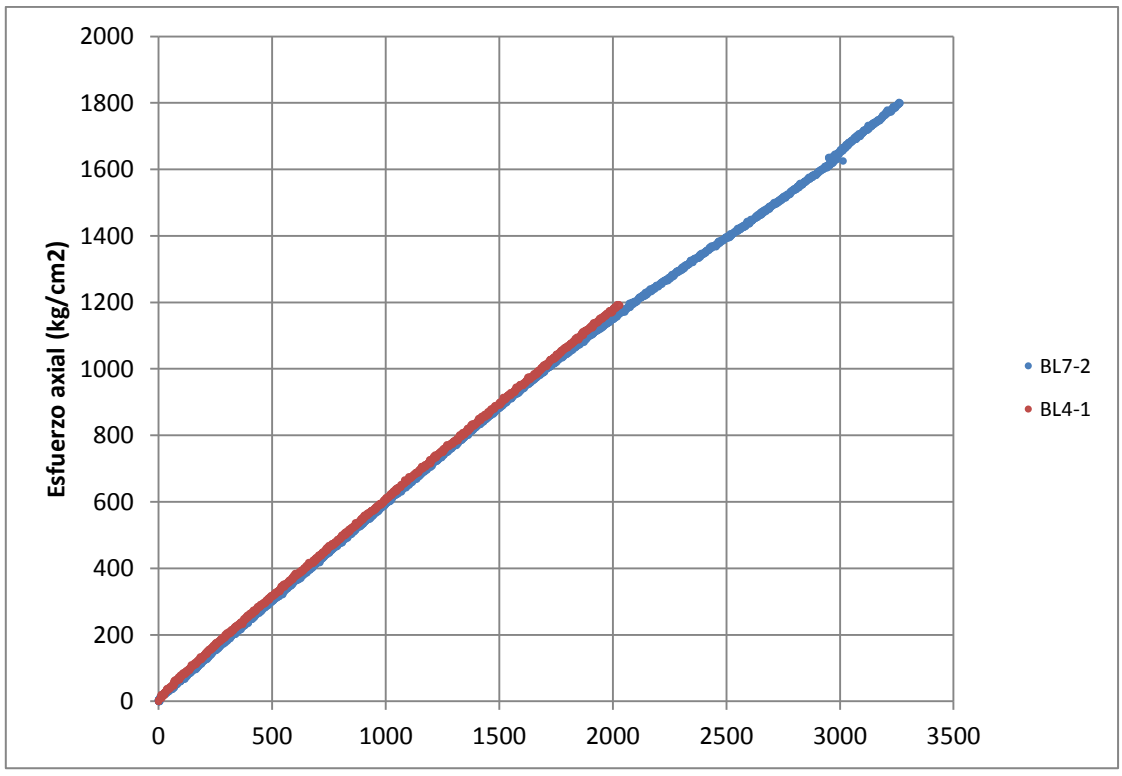
Tipo	Desc.	Nombre	Máquina	L	D	L/D	P		Area	Esfuerzo	Prom	E	Poisson
				mm	mm		kN	kg	cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2 (x10^5)	
R27-1	Verde	Prueba		83,97	51,14	1,64	59,29	6043,8	20,54	294			
		BL3-1	MTS (galgas)	128,97	51,27	2,52	126,41	12885,6	20,65	624		2,52	0,19
		BL3-2	SATEC (galgas)	128,86	51,30	2,51	265,43	27057,1	20,67	1.309		2,70	0,24
		BL14-2	MTS (galgas)	102,86	51,15	2,01	166,01	16922,4	20,55	824		2,29	0,18
		BL20	MTS (galgas)	103,48	51,27	2,02	227,11	23151,1	20,64	1.122	970	2,10	0,15
R27-3	Naranja	Prueba		125,85	51,00	2,47	58,53	5966,4	20,43	292			
		BL1-1	MTS (láser)	150,44	51,41	2,93	43,02	4385,6	20,76	211		3,88	
		BL1-2	MTS (láser)	150,44	51,69	2,91	68,25	6956,8	20,98	332		1,33	
		BL13-1	MTS (láser)	151,92	51,39	2,96	32,63	3326,6	20,74	160		1,12	
		BL13-2	MTS (láser)	144,43	51,38	2,81	44,72	4558,7	20,73	220		1,24	
		BL13-4	MTS (láser)	146,53	51,20	2,86	40,15	4092,8	20,59	199	236	0,32	
R27-5	Roja	BL5-1	MTS (láser)	150,90	51,29	2,94	52,10	5311,2	20,66	257	257	0,01	
R27-7	Sana	Prueba	MTS	127,65	49,83	2,56	371,02	37820,6	19,50	1.940			
		Prueba	MTS	91,17	51,43	1,77	153,37	15634,0	20,77	753			
		BL4-1	SATEC (galgas)	120,53	51,21	2,35	241,10	24577,0	20,59	1.193		5,87	0,20
		BL7-2	SATEC (galgas)	149,44	51,33	2,91	419,53	42765,3	20,69	2.067	1.488	5,66	0,18

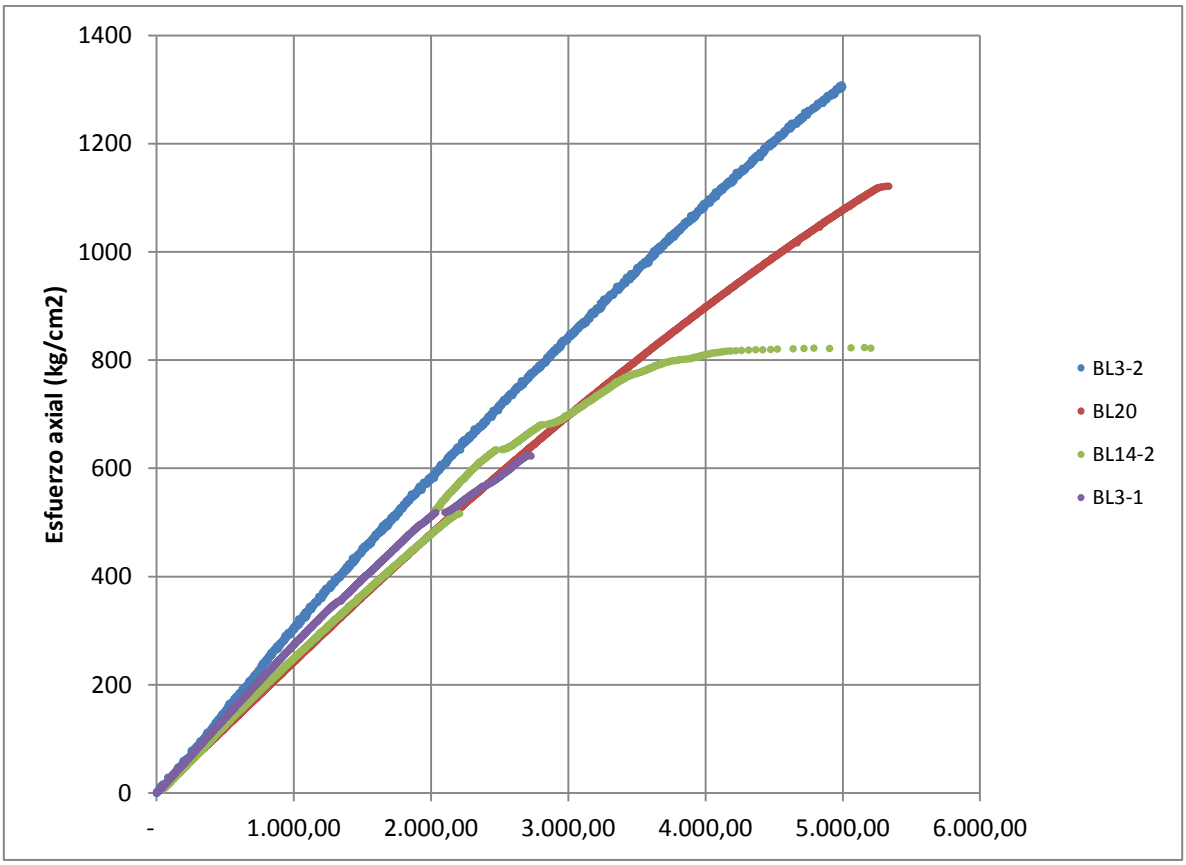
		L	D	L/D	Rectitud	Planicidad	Paralelismo	Perpendicularidad
		mm	mm					
1	BL1-1	150,55	51,41	2,93	si	no	no	no
2	BL1-2	150,51	51,69	2,91	si	no	no	no
3	BL1-4	151,57	51,23	2,96	no	no	no	no
4	BL3-1	128,41	51,27	2,50	si	no	no	no
5	BL3-2	127	51,30	2,48	si	si	si	si
6	BL4-1	119,83	51,21	2,34	si	no	no	no
7	BL5-1	150,83	51,29	2,94	no	no	no	no
8	BL7-1	148,28	51,44	2,88	si	si	si	si
9	BL7-2	146,28	51,33	2,85	si	si	si	no
10	BL13-1	152,11	51,39	2,96	si	no	no	no
11	BL13-2	144,87	51,38	2,82	no	no	no	no
12	BL13-4	146,39	51,21	2,86	si	no	no	no
13	BL14-2	102,86	51,15	2,01	si	no	si	no
14	BL20	103,48	51,27	2,02	sí	si	si	no

			L	D1	D2	D3	Dprom	L/D	Peso	Densidad
		Tipo	mm	mm	mm	mm	mm		g	ton/m3
1	BL1-1	R27-1	150,4	51,4	51,4	51,5	51,4	2,9	709,9	2,27
2	BL1-2	R27-1	150,4	51,3	51,3	52,4	51,7	2,9	695,7	2,20
3	BL1-3	R27-1	147,6	51,3	51,4	51,4	51,4	2,9	665,7	2,18
4	BL1-4	R27-1	151,5	51,3	51,2	51,2	51,2	3,0	653,5	2,09
5	BL3-1	R27-3	129,0	51,3	51,3	51,3	51,3	2,5	682	2,56
6	BL3-2	R27-3	128,9	51,3	51,3	51,3	51,3	2,5	681	2,56
7	BL4-1	R27-7	120,5	51,2	51,2	51,2	51,2	2,4	664,4	2,68
8	BL4-2	R27-7	130,9	50,9	51,0	51,1	51,0	2,6	693,6	2,60
9	BL5-1	R27-6	150,9	51,3	51,3	51,3	51,3	2,9	722,5	2,32
10	Bl7-1	R27-7	151,3	51,5	51,5	51,4	51,4	2,3	850,1	2,70
11	BL7-2	R27-7	149,4	51,3	51,4	51,3	51,3	2,9	837,6	2,71
12	BL9-1	R27-5	126,3	51,0	51,2	51,2	51,2	2,5	589,4	2,27
13	BL13-1	R27-5	151,9	51,5	51,4	51,3	51,4	3,0	677,5	2,15
14	BL13-2	R27-5	144,4	51,4	51,4	51,4	51,4	2,8	683,6	2,28
15	BL13-3	R27-5	152,5	51,0	51,1	51,2	51,1	3,0	718,8	2,30
16	BL13-4	R27-5	146,5	51,2	51,2	51,2	51,2	2,9	627,3	2,08
17	BL14-2	R27-2	102,9	51,2	51,2	51,1	51,2	2,0	537,6	2,54
18	BL20-1	R27-2	103,5	51,3	51,3	51,3	51,3	2,0	547,5	2,56


350
300
250
200
150
100
50
0
0,002
0
-0,002
-0,004
-0,006
-0,008
Deformación unitaria (mm/mm)
σc (kg/cm2)
BL13-4
BL13-2
B13-1
BL1-2
BL1-1


BL5-1
250
200
150
100
50
0
0
-0,05
-0,1
-0,15
-0,2
-0,25
Deformación unitaria (mm/mm)
σc (kg/cm2)
BL5-1


2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Esfuerzo axial (kg/cm2)
BL7-2
BL4-1


1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Esfuerzo axial (kg/cm2)
-
1.000,00
2.000,00
3.000,00
4.000,00
5.000,00
6.000,00
BL3-2
BL20
BL14-2
BL3-1

Anexo 3 Resultados de ensayos mineralógicos

Anexo 3a Informe de petrografía de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geología@ucr.ac.cr

DESCRIPCIONES PETROGRÁFICAS SEMICUANTITATIVAS
Escuela Centroamericana de Geología
Laboratorio de Petrografía

Petrografía realizada por: Geól. Vanessa Solano
Revisada por: M.Sc. Stephanie Murillo Maikut

Escuela Centroamericana de Geología
Fecha: 28 de mayo, 2014

Muestra: R27-1
Procedencia: Ruta 27 (Roberto Peralta)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Nombre de la roca: "Andesita recristalizada"

Debido al alto grado de alteración presente en la muestra, se dificulta la identificación de la totalidad de los componentes primarios, sin embargo se realizó una determinación semi-cuantitativa de los componentes identificados y de los minerales de alteración.
Textura: holocristalina porfirítica con fantasmas de plagioclasa y minerales ferromagnesianos en una matriz recristalizada silícea.

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
FENOCRISTALES (23%)
-Plagioclasas alteradas: aproximadamente 13 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 2,25 x 1,75 mm. Se encuentran sustituidos por sericita, filosilicatos (arcillas) y zeolitas.
-Opacos: aproximadamente 5%, xenomórficos, con tamaño máximo de 1,12 x 0,50 mm. Diseminados, en vetillas discontinuas y rellenando vesículas.
-Minerales ferromagnesianos alterados (anfíboles): aproximadamente 5 %, con tamaño máximo de 1 x 0,50 mm. Completamente alterados a filosilicatos (arcillas).

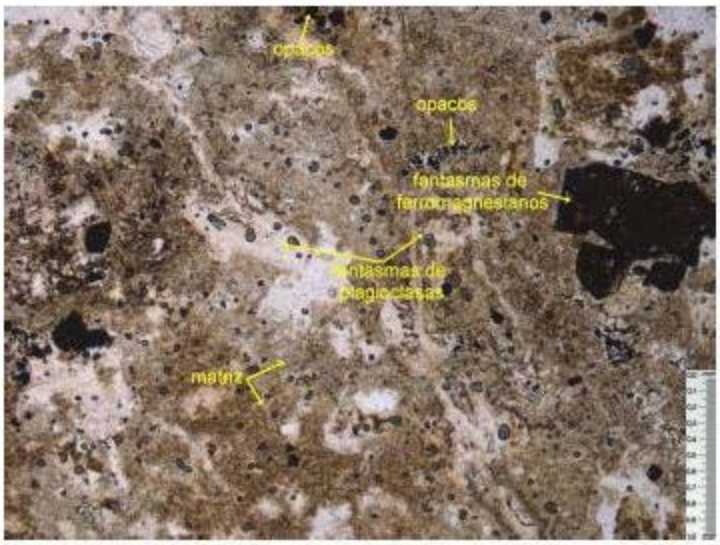
MATRIZ (72%)
De color café, recristalizada, compuesta principalmente por cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Además se observan en menor cantidad, zeolitas, sericita y epidota.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geología@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geologia@ucr.ac.cr

Minerales de alteración: presentes alterando minerales y en la matriz.
-Cuarzo secundario: Diseminado en la matriz, además rellenando cavidades.
-Arcillas: Alterando feldespatos, minerales ferromagnesianos y diseminadas en la matriz.
-Óxidos de hierro: Alterando posibles minerales ferromagnesianos y diseminados en la matriz.
-Sericita: Alterando plagioclasas y en la matriz.
-Zeolitas: Alterando plagioclasas y en la matriz.
-Epidota: en cantidades traza (<1%), diseminada.

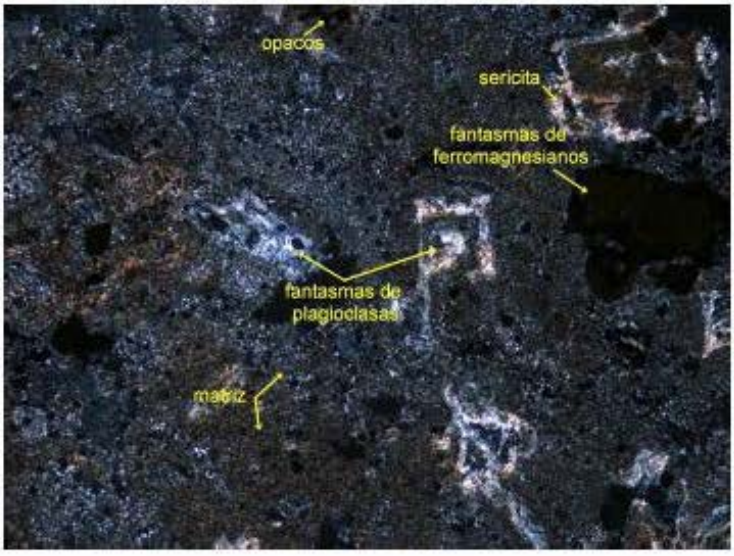
OTROS RASGOS
-Vesículas: aproximadamente 2 %, con diámetro máximo de 7,69 mm.
-Amígdalas: aproximadamente 3 %, con diámetro máximo 1,56 mm. Rellenas con cuarzo secundario y minerales opacos.
-Vetillas de arcillas.
-Microfracturas de 0,03 mm de espesor promedio.



Muestra: **R27-1**
Aspecto general de la roca.
Nicoles paralelos.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geologia@ucr.ac.cr

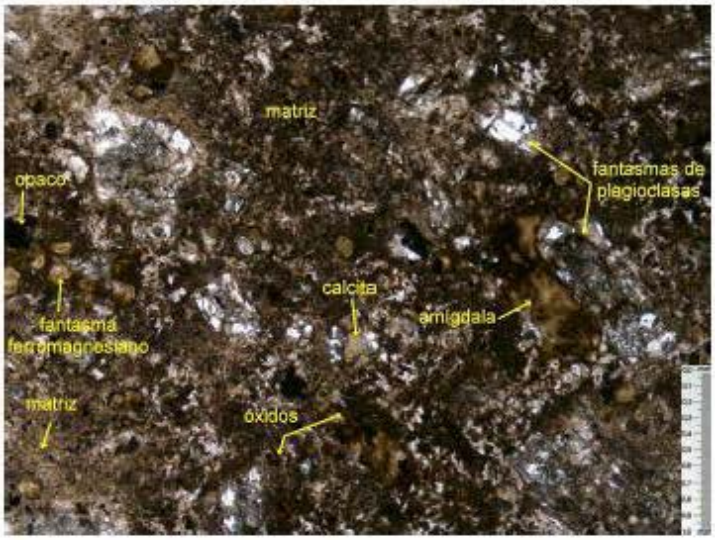


Muestra: **R27-1**
Aspecto general de la roca.
Nicoles cruzados.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

Minerales de alteración: alterando minerales y diseminados en la matriz.
-Calcita: Alterando feldespatos y en la matriz.
-Sericita: Alterando feldespatos y en la matriz.
-Cuarzo secundario: Diseminado en la matriz, además rellenando cavidades.
-Zeolitas: Alterando feldespatos y diseminadas en la matriz.
-Óxidos de hierro: Impregnaciones en la matriz.
-Arcillas: Alterando feldespatos, minerales ferromagnesianos y diseminadas en la matriz.
-Serpentina: Alterando olivinos.
-Titanita?: Alterando feldespatos y diseminado en la matriz. Se presenta en cantidades traza.

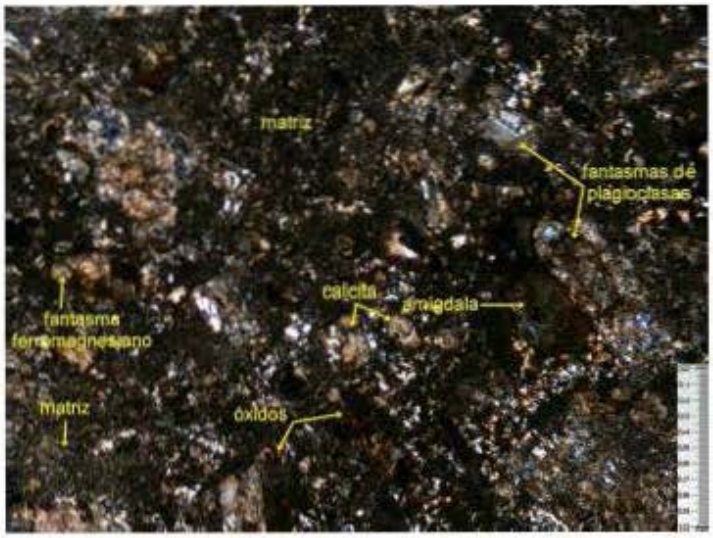
OTROS RASGOS
-Amígdalas: aproximadamente 2 %, con diámetro máximo 0,50 mm. Algunas rellenas con una mezcla de filosilicatos (arcillas) o calcita.



Muestra: **R27-2**
Aspecto general de la roca.
Nicoles paralelos.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geologia@ucr.ac.cr



Muestra: **R27-2**
Aspecto general de la roca.
Nicoles cruzados.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geología@ucr.ac.cr

DESCRIPCIONES PETROGRÁFICAS SEMICUANTITATIVAS
Escuela Centroamericana de Geología
Laboratorio de Petrografía

Petrografía realizada por: Geól. Vanessa Solano
Revisada por: M.Sc. Stephanie Murillo Maikut

Escuela Centroamericana de Geología
Fecha: 29 de mayo, 2014

Muestra: R27-5
Procedencia: Ruta 27 (Roberto Peralta)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Nombre de la roca: Debido al grado de alteración no se puede determinar el protolito.

Debido al alto grado de alteración presente en la muestra, se dificulta la identificación de la totalidad de los componentes primarios, sin embargo se realizó una determinación semi-cuantitativa de los componentes identificados y de los minerales de alteración.
Textura: granoblástica con granos equidimensionales de cuarzo con contactos suturados y con fuerte presencia de sericita y óxidos de hierro.

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
-Posibles minerales ferromagnesianos alterados: aproximadamente 3%. Cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 0,68 x 0,50 mm. Alterados completamente a una mezcla de óxidos de hierro.

-Cuarzo: Presente en la muestra en general, cristales xenomórficos con tamaño promedio de 0,02 x 0,01 mm diseminados y con contactos suturados. Se observa un cristal de mayor tamaño de 0,50 x 0,40 mm.

-Óxidos de hierro: Presente en la muestra en general diseminados, en forma de bandas, manchas y en vetillas, también se observan reemplazando cristales (minerales opacos) con tamaño máximo de 0,75 x 0,50 mm.

-Sericita: Diseminada entre los granos de cuarzo, con tamaño máximo de 0,15 x 0,075 mm.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

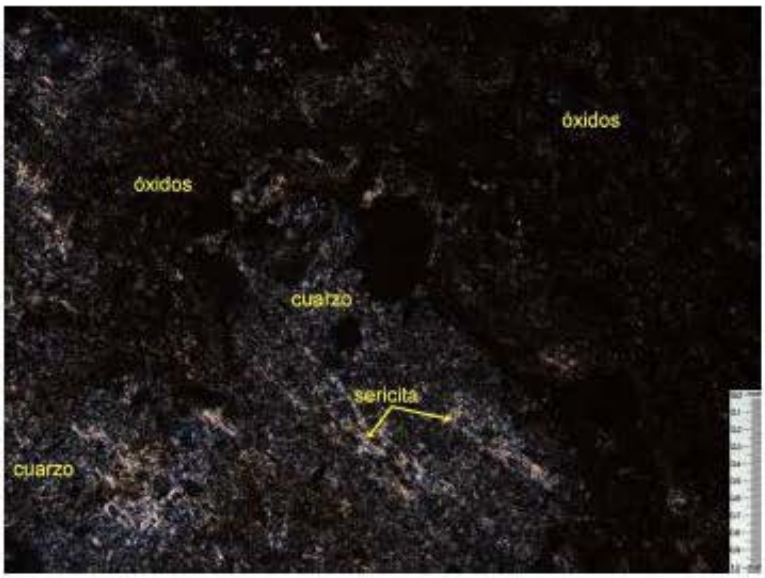
-Arcillas: Diseminadas.

OTROS RASGOS

-Vetilla de 0,15 mm de espesor de cuarzo secundario.
-Vetilas de 0,025 mm de espesor promedio, rellenas de óxidos de hierro.
-Vesículas: aproximadamente, con diámetro máximo de 0,90 mm.
-Amígdalas: aproximadamente, con diámetro máximo 1,0 mm. Rellenas con cuarzo secundario y sericita.
-No es posible determinar los porcentajes de cuarzo, sericita y óxidos de hierro debido a que se encuentran dispersos en toda la muestra.

Muestra: **R27-5**
Aspecto general de la roca.
Nicoles paralelos.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geología@ucr.ac.cr



Muestra: **R27-5**
Aspecto general de la roca.
Nicoles cruzados.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geologia@ucr.ac.cr

DESCRIPCIONES PETROGRÁFICAS SEMICUANTITATIVAS
Escuela Centroamericana de Geología
Laboratorio de Petrografía

Petrografía realizada por: Geól. Vanessa Solano
Revisada por: M.Sc. Stephanie Murillo Maikut

Escuela Centroamericana de Geología
Fecha: 29 de mayo, 2014

Muestra: R27-7
Procedencia: Ruta 27 (Roberto Peralta)

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Nombre de la roca: Andesita con augita y diópsido.

Debido al alto grado de alteración presente en la muestra, se dificulta la identificación de la totalidad de los componentes primarios, sin embargo se realizó una determinación semi-cuantitativa de los componentes identificados y de los minerales de alteración.
Textura: Hipocristalina glomeroporfirítica seriada con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y minerales opacos en una matriz intersertal.

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
FENOCRISTALES (48%)
-Plagioclasa: aproximadamente 30 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 3,38 x 1,75 mm. Se distinguen maclas polisintéticas, zonación continua y discontinua, localmente con textura cribosa, algunas con inclusiones de piroxenos y minerales opacos, inter crecimientos tipo BANAT. Se encuentran alteradas a calcita, sericita y epidota. Además algunas se hallan arcillitizadas. También presentan fracturillas rellenas de calcita.
-Augita aproximadamente 8 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 3,25 x 1,10 mm. Algunas presentan inclusiones de opacos y plagioclasa. Alteradas por arcillas, también presentan fracturillas rellenas de calcita.
-Diópsido aproximadamente 6 %, cristales hipidiomórficos, con tamaño máximo de 1,25 x 0,40 mm. Algunos presentan inclusiones de opacos y plagioclasa, localmente poseen bordes en corona. Alterados por arcillas, también presentan fracturillas rellenas de calcita.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

-Opacos aproximadamente 4 %, cristales hipidiomórficos a xenomórficos, con tamaño máximo de 1,40 x 1,25 mm. Se observan algunos cristales reabsorbidos o como impregnaciones (especialmente en el autolito).

MATRIZ (41%)
Intersertal, de color café, compuesta por feldespatos, piroxenos, opacos, filosilicatos (arcillas) y vidrio. Además epidota y calcita.

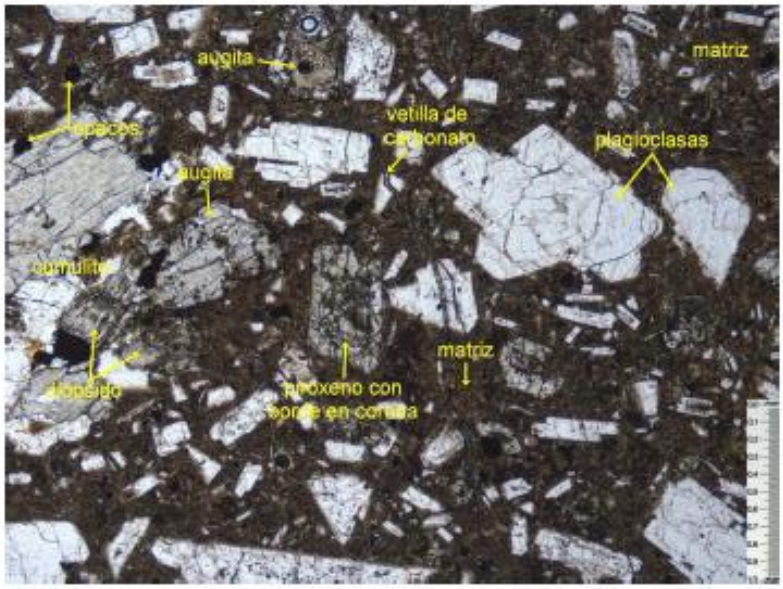
Minerales de alteración (10%)
-Sericita: Aproximadamente 2 %. Alterando plagioclasas y en la matriz.
-Arcillas: Alterando feldespatos y diseminadas en la matriz.
-Calcita: Alterando feldespatos aproximadamente 8 %, y mucha más diseminada en la matriz.
-Óxidos de hierro: Diseminados en la matriz.
-Epidota: Diseminada en la matriz.

Minerales accesorios (<1%): apatito diseminado en la matriz.

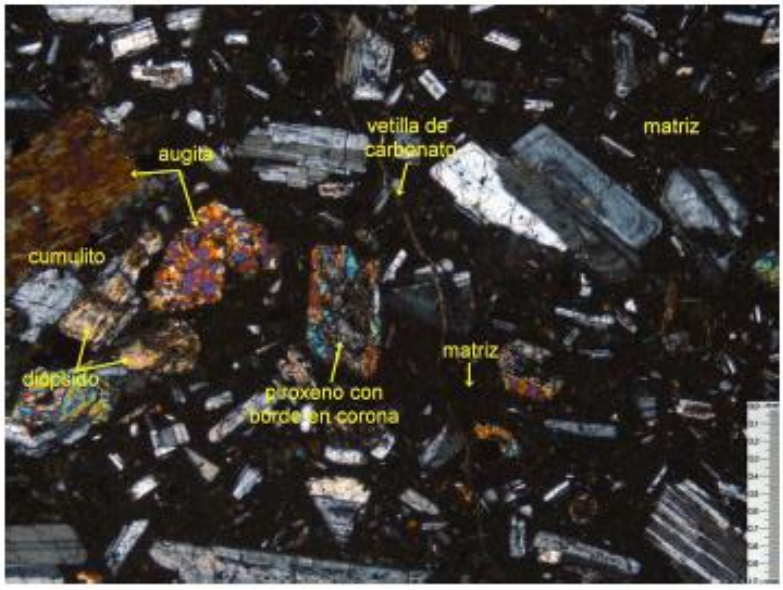
OTROS RASGOS
-Amígdalas: aproximadamente 1 %, con tamaño máximo de 0,22 x 0,10 mm. Algunas rellenas con arcillas verdes y cuarzo secundario.
-Vetillas de 0,03 mm de espesor promedio, rellenas con calcita, analcima? u óxidos de hierro.
-Autolito: de similar composición a la muestra en general, de granulometría un poco más gruesa y matriz de color más clara café verdoso, con mayor presencia de arcillas verdosas. Presenta el mismo tipo de alteración que muestra. Con tamaño máximo de 9,50 x 7,25 mm.
-Cumulitos con tamaño máximo de 2,88 x 2,25 mm. Compuestos por piroxenos, plagioclasas y opacos.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela Centroamericana de Geología
☎ (506) 2511-8128
Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 UCR
geología@ucr.ac.cr

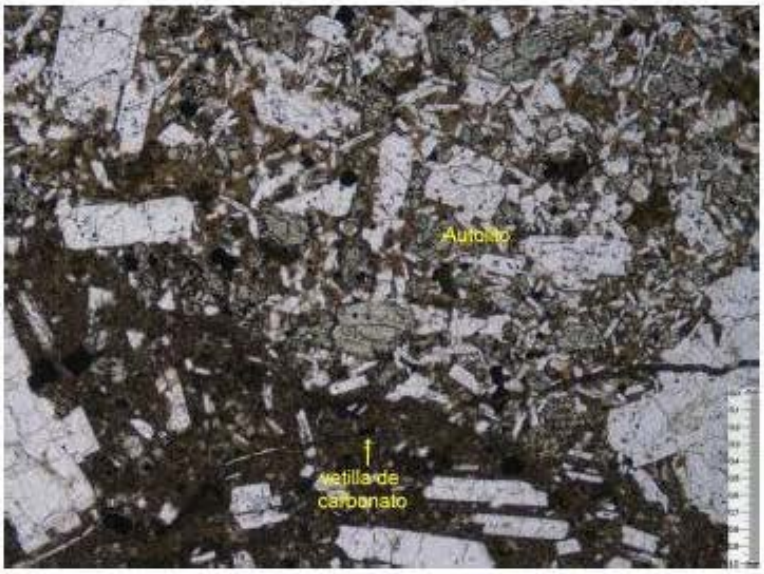


Muestra: **R27-7**
Aspecto general de la roca.
Nicoles paralelos.



Muestra: **R27-7**
Aspecto general de la roca.
Nicoles cruzados.

Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geologia.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geologia@ucr.ac.cr

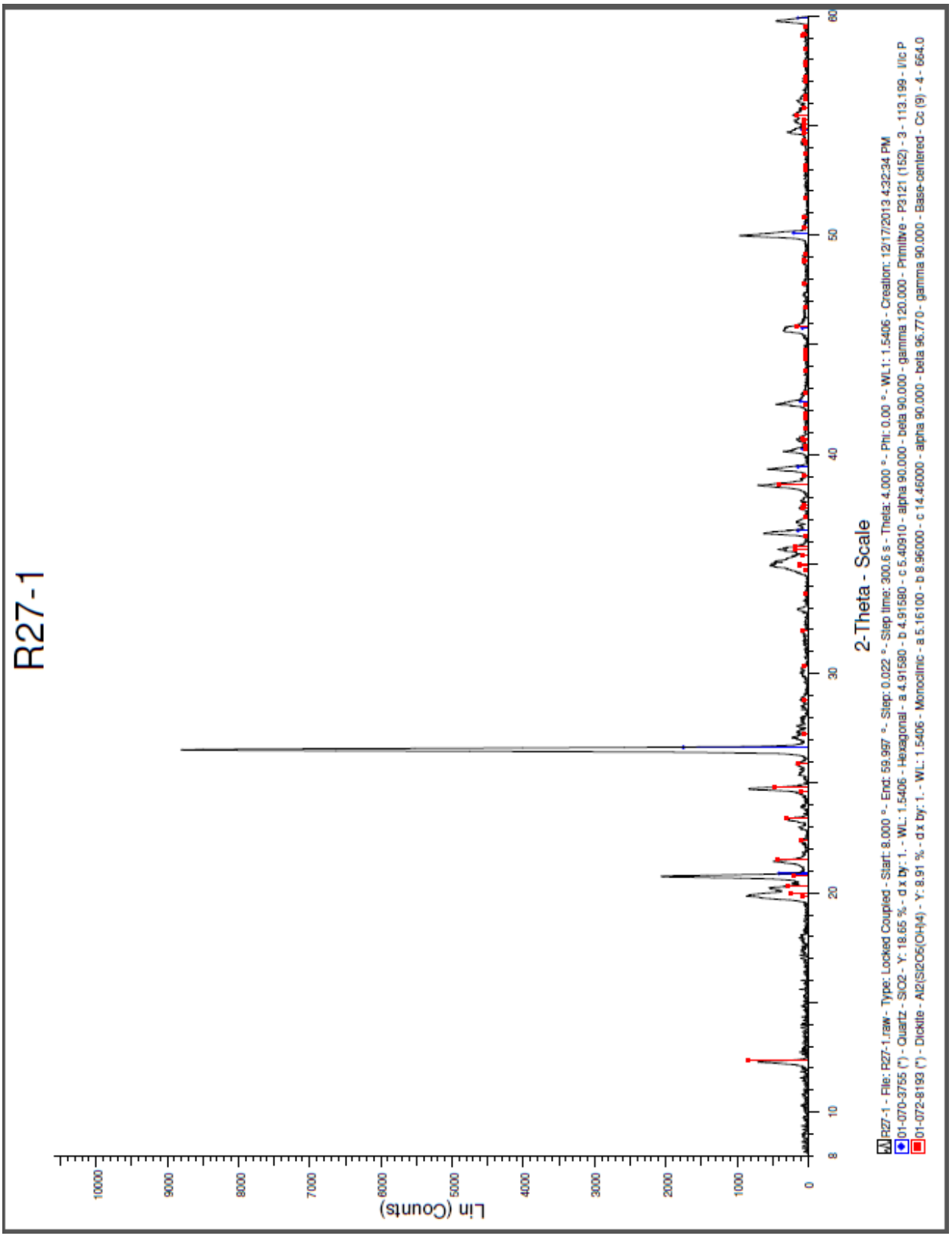


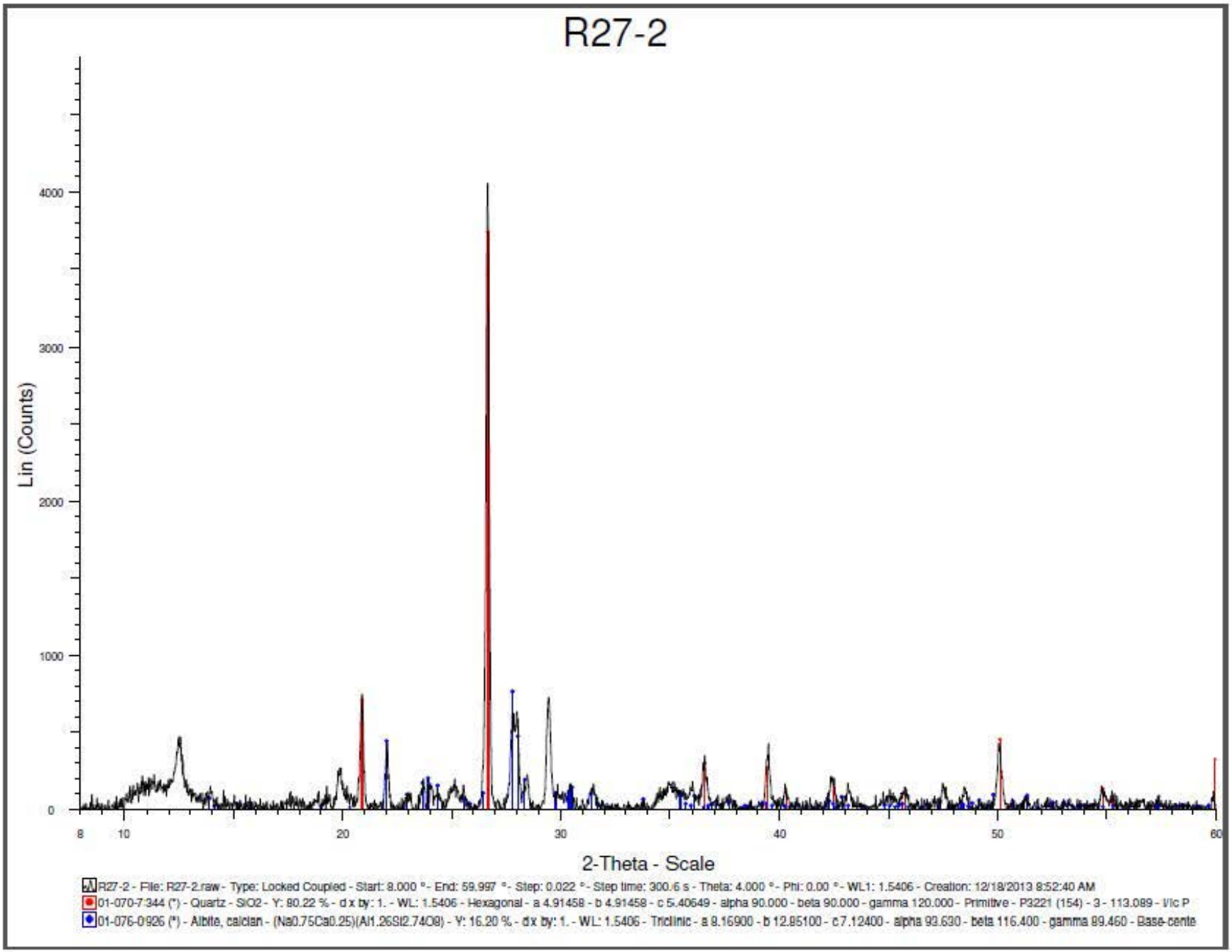
Muestra: **R27-7**
Detalle del autolito.
Nicoles paralelos.

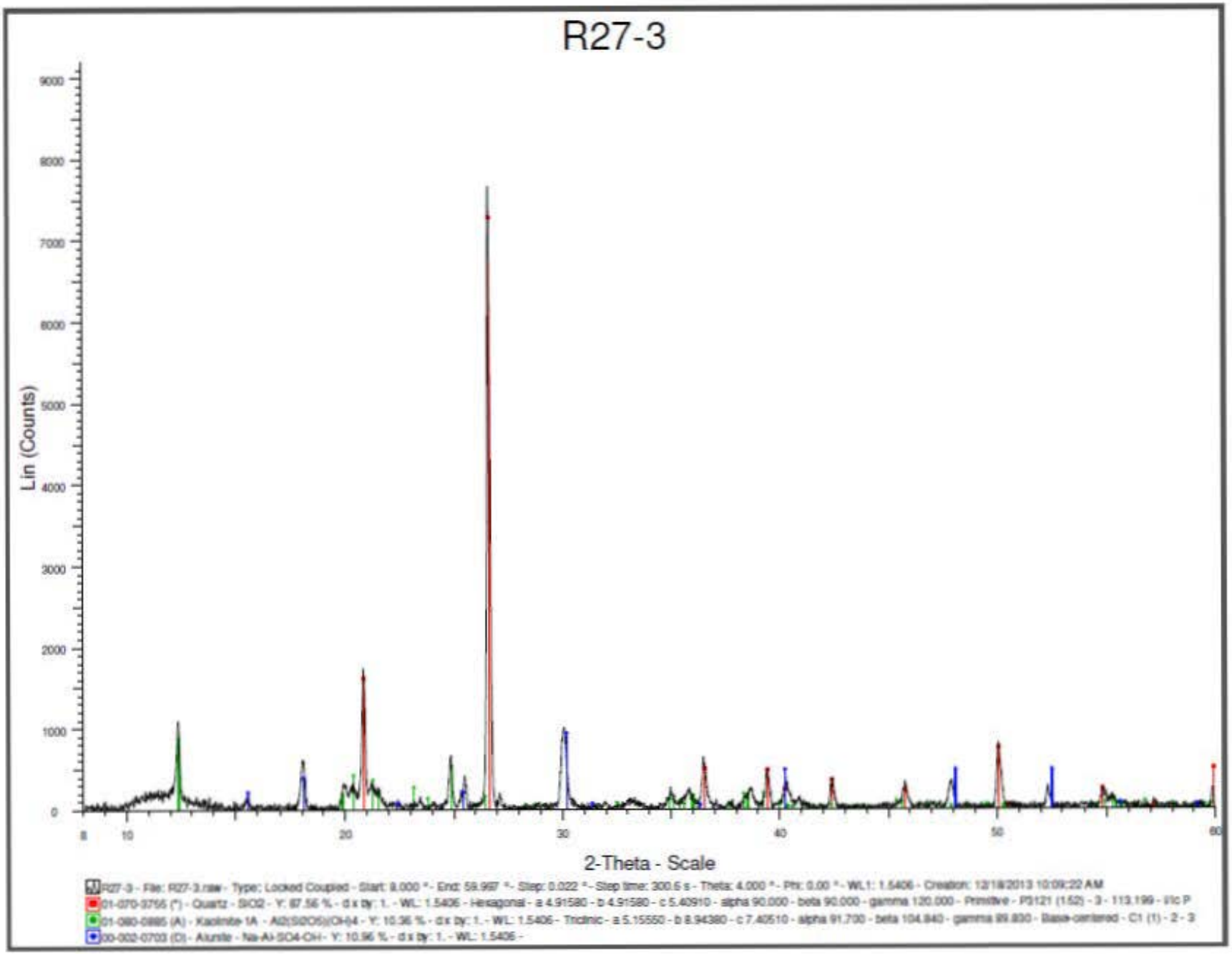
Muestra: **R27-7**
Detalle del autolito.
Nicoles cruzados.

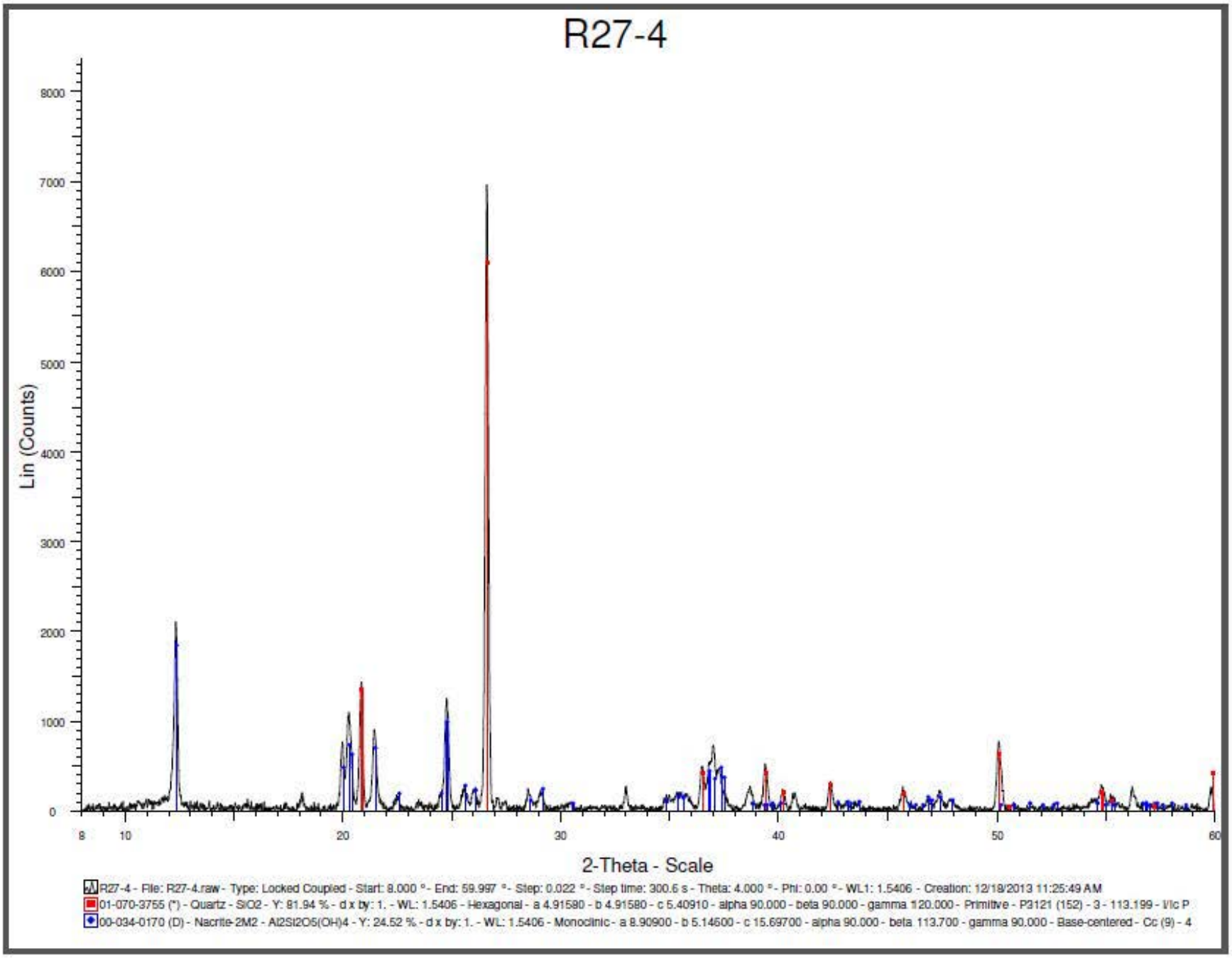
Teléfonos (506) 2511-5625 / 2225-7941 - Fax (506) 2234-2347
Apartado 214-2060 San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica
Sitio Web: www.geología.ucr.ac.cr. Correo electrónico: geología@ucr.ac.cr

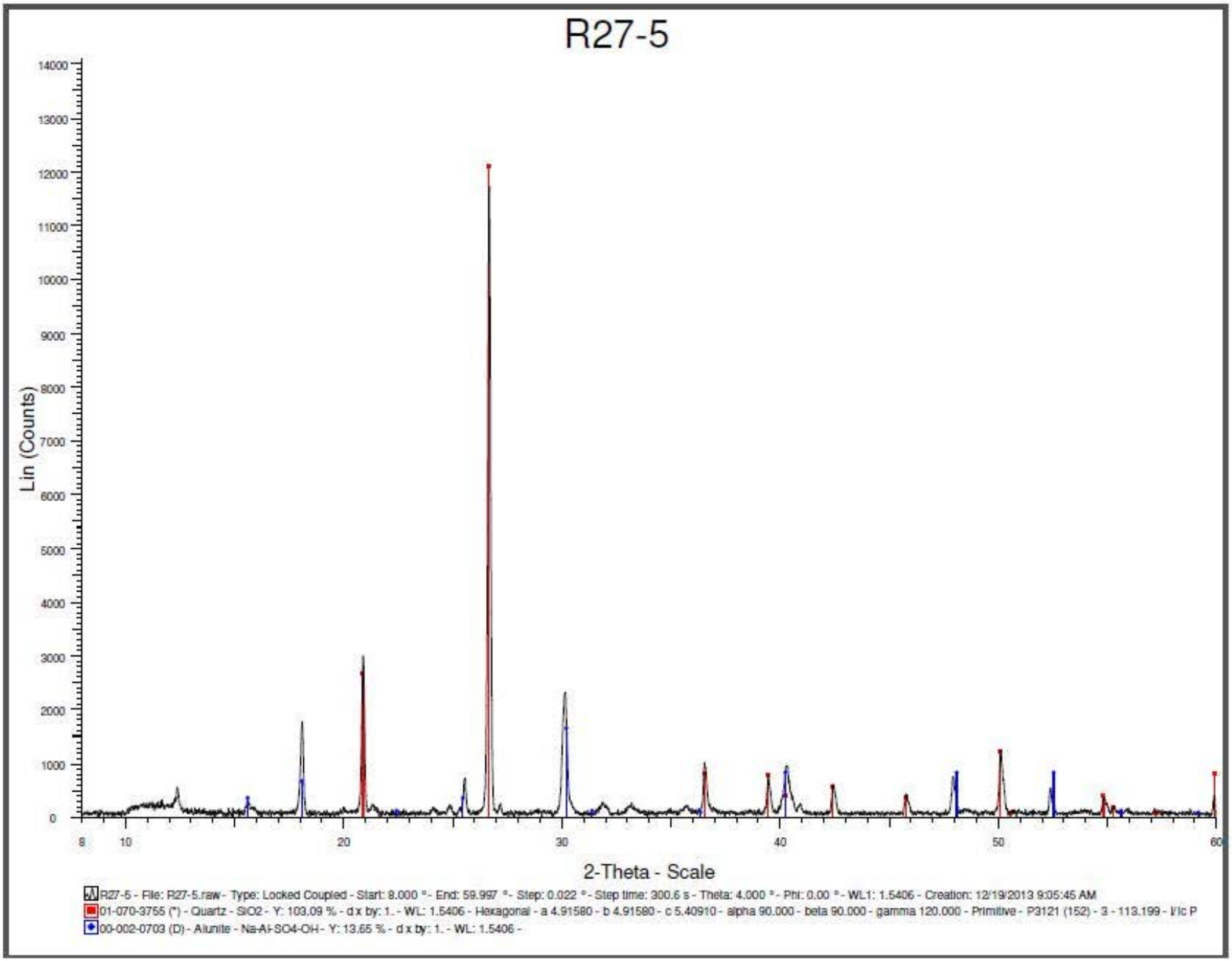
Anexo 3b Resultados de difracción de rayos-x

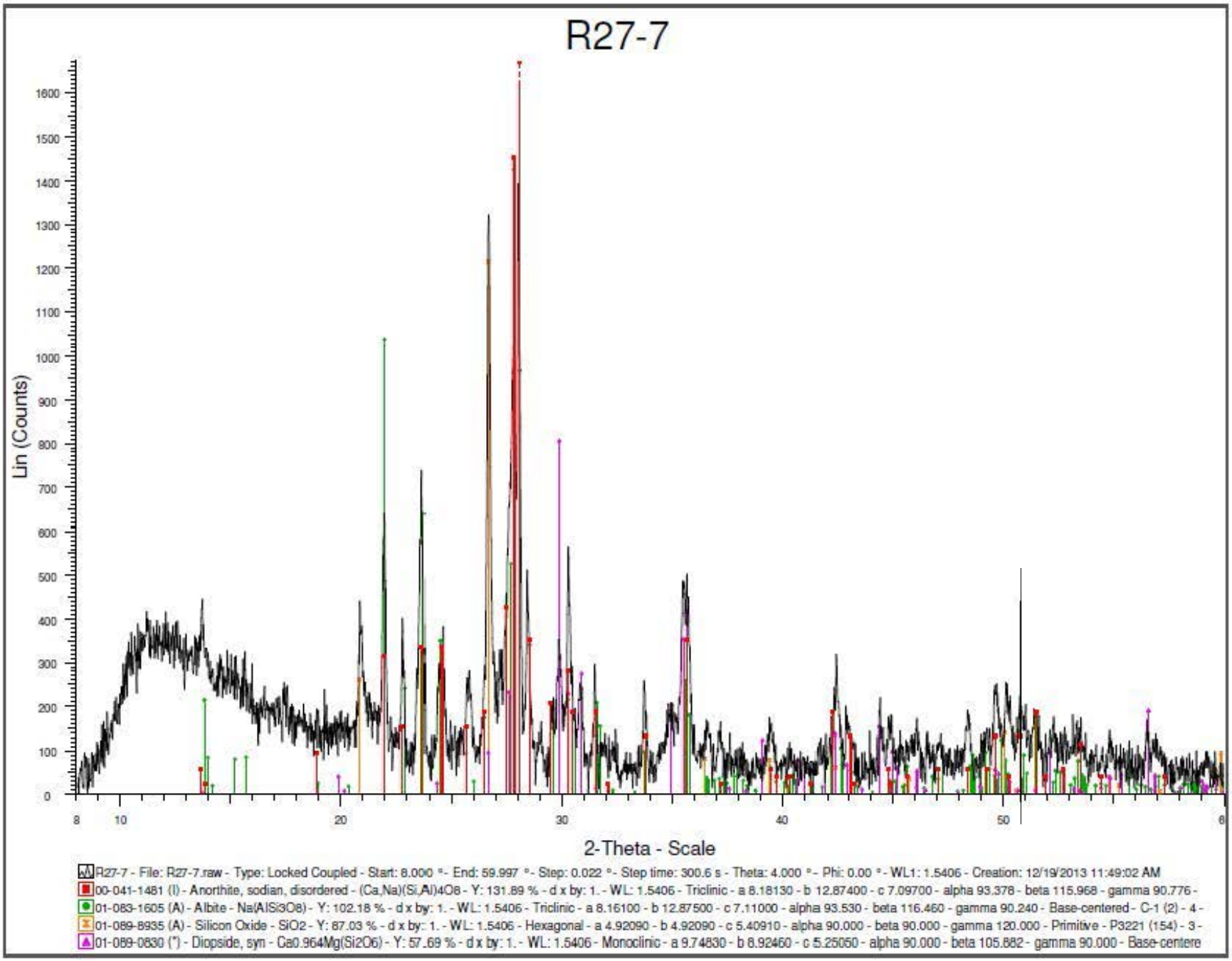



R27-2
Lin (Counts)
0
1000
2000
3000
4000
8
10
20
30
40
50
60
2-Theta - Scale
R27-2 - File: R27-2.raw - Type: Locked Coupled - Start: 8.000 ° - End: 59.997 ° - Step: 0.022 ° - Step time: 300.6 s - Theta: 4.000 ° - Phi: 0.00 ° - WL1: 1.5406 - Creation: 12/18/2013 8:52:40 AM
01-070-7344 (*) - Quartz - SiO2 - Y: 80.22 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91458 - b 4.91458 - c 5.40649 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3221 (154) - 3 - 113.089 - I/Ic P
01-076-0926 (*) - Albite, calcian - (Na0.75Ca0.25)(Al1.26Si2.74O8) - Y: 16.20 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.16900 - b 12.85100 - c 7.12400 - alpha 93.630 - beta 116.400 - gamma 89.460 - Base-cente


R27-3
Lin (Counts)
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
8
10
20
30
40
50
60
2-Theta - Scale
R27-3 - File: R27-3.raw - Type: Locked Coupled - Start: 8.000 ° - End: 59.997 ° - Step: 0.022 ° - Step time: 300.6 s - Theta: 4.000 ° - Phi: 0.00 ° - WL1: 1.5406 - Creation: 12/18/2013 10:09:22 AM
01-070-3755 (*) - Quartz - SiO2 - Y: 87.56 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91580 - b 4.91580 - c 5.40910 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 113.199 - I/Ic P
01-080-0885 (A) - Kaolinite 1A - Al2(Si2O5)(OH)4 - Y: 10.36 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 5.15550 - b 8.94380 - c 7.40510 - alpha 91.700 - beta 104.840 - gamma 89.830 - Base-centered - C1 (1) - 2 - 3
00-002-0703 (D) - Alunite - Na-Al-SO4-OH - Y: 10.96 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 -


R27-4
Lin (Counts)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
8
10
20
30
40
50
60
2-Theta - Scale
R27-4 - File: R27-4.raw - Type: Locked Coupled - Start: 8.000 ° - End: 59.997 ° - Step: 0.022 ° - Step time: 300.6 s - Theta: 4.000 ° - Phi: 0.00 ° - WL1: 1.5406 - Creation: 12/18/2013 11:25:49 AM
01-070-3755 (*) - Quartz - SiO2 - Y: 81.94 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91580 - b 4.91580 - c 5.40910 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 113.199 - I/Ic P
00-034-0170 (D) - Nacrite-2M2 - Al2Si2O5(OH)4 - Y: 24.52 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.90900 - b 5.14600 - c 15.69700 - alpha 90.000 - beta 113.700 - gamma 90.000 - Base-centered - Cc (9) - 4


R27-5
Lin (Counts)
14000
13000
12000
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
8
10
20
30
40
50
60
2-Theta - Scale
R27-5 - File: R27-5.raw - Type: Locked Coupled - Start: 8.000 ° - End: 59.997 ° - Step: 0.022 ° - Step time: 300.6 s - Theta: 4.000 ° - Phi: 0.00 ° - WL1: 1.5406 - Creation: 12/19/2013 9:05:45 AM
01-070-3755 (*) - Quartz - SiO2 - Y: 103.09 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91580 - b 4.91580 - c 5.40910 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 113.199 - I/Ic P
00-002-0703 (D) - Alunite - Na-Al-SO4-OH - Y: 13.65 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 -


R27-7
Lin (Counts)
2-Theta - Scale
R27-7 - File: R27-7.raw - Type: Locked Coupled - Start: 8.000 ° - End: 59.997 ° - Step: 0.022 ° - Step time: 300.6 s - Theta: 4.000 ° - Phi: 0.00 ° - WL1: 1.5406 - Creation: 12/19/2013 11:49:02 AM
00-041-1481 (I) - Anorthite, sodian, disordered - (Ca,Na)(Si,Al)4O8 - Y: 131.89 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.18130 - b 12.87400 - c 7.09700 - alpha 93.378 - beta 115.968 - gamma 90.776 -
01-083-1605 (A) - Albite - Na(AlSi3O8) - Y: 102.18 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.16100 - b 12.87500 - c 7.11000 - alpha 93.530 - beta 116.460 - gamma 90.240 - Base-centered - C-1 (2) - 4 -
01-089-8935 (A) - Silicon Oxide - SiO2 - Y: 87.03 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.92090 - b 4.92090 - c 5.40910 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3221 (154) - 3 -
01-089-0830 (*) - Diopside, syn - Ca0.964Mg(Si2O6) - Y: 57.69 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 9.74830 - b 8.92460 - c 5.25050 - alpha 90.000 - beta 105.882 - gamma 90.000 - Base-centere

Anexo 3c Resultados de prueba de azul de metileno

Prueba de Azul de metileno, Método de ensayo ASTM C837
Muestra identificación: R27-7, R27-4, R27-6, R27-5, R27-2, R27-3, R27-1

No Muestra	M (g)	Concentración de titulante miliequ/mL	Vol consumido de titulante (mL)	meq (0,2/mL)	MBI meq/100 g de arcilla
R27-7	2,0006	0,01	4	0,01	2,00
R27-4	2,0078	0,01	2,5	0,01	1,25
R27-6	2,002	0,01	--		
R27-5	2,0022	0,01	2,5	0,01	1,25
R27-6 (rep)	2,0023	0,01	1	0,01	0,50
R27-2	2,002	0,01	--		
R27-3	2,0017	0,01	2	0,01	1,00
R27-2 (rep)	2,0065	0,01	23	0,01	11,46
R27-1	2,002	0,01	13	0,01	6,49