



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Trabajo de Grado

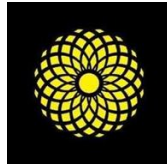
**ESTUDIO MINERALÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DEL
PERFIL DE METEORIZACIÓN QUÍMICA DE LA CANTERA
CONTEC DEPARTAMENTO DE PARAGUARÍ, PARAGUAY
ORIENTAL**

JASON ANDRY LÓPEZ MENDEZ

**Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para aprobar la
asignatura**

SAN LORENZO – PARAGUAY

JULIO – 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Trabajo de Grado

**ESTUDIO MINERALÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DEL PERFIL DE
METEORIZACIÓN QUÍMICA DE LA CANTERA CONTEC
DEPARTAMENTO DE PARAGUARÍ, PARAGUAY ORIENTAL**

JASON ANDRY LÓPEZ MÉNDEZ

Orientador: LIC. CHRISTIAN FERNANDO COLMAN

Co-Orientador: DR. DIEGO FRANCISCO BLOCK

Profesora: MSC. SONIA MABEL MOLINAS RUIZ DÍAZ

**Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para aprobar la asignatura**

SAN LORENZO – PARAGUAY

JULIO – 2026

**ESTUDIO MINERALÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DEL PERFIL DE
METEORIZACIÓN QUÍMICA DE LA CANTERA CONTEC
DEPARTAMENTO DE PARAGUARÍ, PARAGUAY ORIENTAL, AÑO 2026**

Autor: JASON ANDRY LÓPEZ MENDEZ

Profesora: PROF. MSC. SONIA MABEL MOLINAS RUÍZ DÍAZ

Orientador: LIC. CHRISTIAN FERNANDO COLMAN

Co-Orientador: DR. DIEGO FRANCISCO BLOCK

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para aprobar la asignatura.

Aprobado en fecha 17 de julio de 2026.

MESA EXAMINADORA DE TRABAJO DE GRADO

MIEMBROS:

Prof. MSc. Higinio Moreno Resquín

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Narciso Cubas Villalba

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruíz Díaz

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

DEDICATORIA

A mis padres, Aníbal López Giménez y Delia Méndez de López; y a mi esposa,
Nadia Nahir Mendoza de López.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Jesucristo que es la piedra angular, el cimiento en mi vida. Gracias a Él sigo adelante, sin la fe en Dios la culminación de este trabajo habría sido imposible. Por proveerme de fuerzas y valentía durante todo este trayecto recordando siempre que *“si puedes creer, al que cree todo le es posible”* (Marcos 9:23).

Agradezco a mis padres, Aníbal y Delia López, por su apoyo incondicional desde el primer día, brindando siempre su cariño, aliento, oraciones y paciencia. Por no permitirme rendirme, por sus abrazos y palabras de fe que me levantaron y afirmaron por buenos caminos. Por siempre confiar en mí, los amo.

Agradezco a mi mejor amiga, mi esposa Nahir Mendoza por creer en mí y su apoyo incondicional. Sus palabras de afirmación, oraciones, abrazos que me conmovieron y me llenaron de valentía para seguir adelante. Su presencia en mi vida fue fundamental en la culminación de la carrera. Gracias amada mía, te amo.

Agradezco a mi mejor amigo y compañero académico Benjamín Castro por sus palabras de aliento y fe que me acompañaron durante la carrera.

Agradezco a mis orientadores, Lic. Christian Colman y al Dr. Diego Block, por su guía, paciencia, tiempo y consejo durante la elaboración de este trabajo.

Agradezco a la Lic. Yennifer Sarubbi por la ayuda en la preparación de las láminas delgadas, al Dr. Edher Herrera y al Lic. Alex Matos por la obtención de las microfotografías y los análisis elementales mediante MEB-EDS, a la Prof. MSc. Sonia Molinas por su predisposición y orientaciones durante la elaboración de este trabajo y al encargado de la cantera CONTEC Daniel Bogado por permitirnos el paso a las instalaciones.

Finalmente, a los profesores de la carrera de geología por sus instrucciones y guía, mención especial al Lic. Darío Gómez y Lic. Mirian Almada por su apoyo en el ámbito laboral y al Lic. Moisés Gadea por sus palabras de motivación.

Resumen

Se analiza un perfil de meteorización química desarrollado en la cantera CONTEC, ubicada en la localidad de Capilla Tuya, distrito de Caapucú, departamento de Paraguarí, Paraguay Oriental. El perfil de meteorización se desarrolló sobre rocas de la Suite Magmática Caapucú, unidad geológica del Ediacárico (565 ± 11 Ma), compuesta por granitos, microgranitos alcalinos, riolitas e ignimbritas de composición ácida. En el frente de cantera se identificó las principales partes del perfil: frente de meteorización, zona de *saprock* y zona de saprolito, partes que fueron muestreadas para caracterizar la mineralogía por DRX, la micromorfología por MEB y la química semicuantitativa, siguiendo una secuencia progresiva desde un equivalente menos alterado (M1 y M2), hasta la muestra con mayor grado de alteración (Cant 5). Se determinó la mineralogía primaria de los equivalentes menos alterados a partir de cortes delgados y difracción de rayos x, con minerales de cuarzo, sanidina, plagioclasa y biotita. En las muestras de las zonas de *saprock* (Cant 1, Cant 2 y Cant 3) se identificó minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, que disminuyen progresivamente desde Cant 1 hasta Cant 3, mientras que el neomineral caolinita, aumenta progresivamente de forma inversa. En las muestras de la zona de saprolito (Cant 4 y Cant 5), se observó un comportamiento similar, los minerales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa disminuyen a medida que se acentúa la presencia de caolinita, finalizando la muestra Cant 5 únicamente con cuarzo y caolinita. El aumento progresivo de la caolinita y la disminución progresiva de los minerales primarios, son el resultado de la meteorización química de la ignimbrita. La meteorización química como agente geomórfico adquiere relevancia para explicar la morfogénesis del perfil en la cantera, al considerar el gran número de *etchforms* desarrollados sobre un *bornhardt* exhumado.

Palabras Claves: Meteorización química, Suite Magmática Caapucú, *corestone*, *saprock*, caolinita.

Summary

A weathering profile developed in the CONTEC quarry is analyzed, it is located in Capilla Tuya of the Caapucú City, Paraguari Department, Eastern Paraguay. The weathering profile developed over the rocks of the Caapucú Magmatic Suite, an Ediacaran geological unit (565 ± 11 Ma) composed of granites, alkaline microgranites, rhyolites and ignimbrites of acidic composition. In the quarry face, the main parts of the profile were identified: weathering front, saprock zone and saprolite zone, parts that were sampled to characterize the mineralogy by XRD, the micromorphology by SEM and the semiquantitative chemistry, following a progressive sequence from a less altered equivalent (M1 and M2) to the sample with the highest degree of alteration (Cant 5). The primary mineralogy of the less altered equivalents was determined from thin sections and x-ray diffractometry, with minerals of quartz, sanidine, plagioclase and biotite. In the samples from the saprock zones (Cant 1, Cant 2 and Cant 3), minerals of quartz, plagioclase, potassium feldspar and biotite were identified, which decrease progressively from Cant 1 to Cant 3, whereas the neomineral kaolinite increases progressively in an inverse manner. In the samples from the saprolite zone (Cant 4 and Cant 5), a similar behavior was observed, the minerals quartz, potassium feldspar and plagioclase decrease as the presence of kaolinite becomes more pronounced, with sample Cant 5 ending with only quartz and kaolinite. The progressive increase in kaolinite and the progressive decrease in primary minerals are the result of the chemical weathering of the ignimbrite. Chemical weathering as a geomorphic agent becomes relevant for explaining the morphogenesis of the profile in the quarry, considering the large number of etchforms developed on an exhumed bornhardt.

Keywords: Chemical weathering, Caapucú Magmatic Suite, corestone, saprock, kaolinite.

ÍNDICE

Páginas

1.	1
1.2.	2
1.2.1.	2
1.2.2.	2
1.2.3.	3
1.2.4.	3
1.3.	4
1.4.	4
2.	5
3.	6
3.1.	6
3.1.1.	6
3.1.2.	8
3.2.	9
3.2.1.	9
3.3.	10
3.4.	11
3.4.1.	11
3.4.2.	12
3.4.3.	13
4.	15
4.1.	15
4.1.1.	15
4.1.2.	16
4.1.3.	16
4.2.	17
5.	18
5.1.	20
5.2.	23
5.2.1.	23
5.2.2.	29
5.2.3.	34
5.2.4.	39

5.2.5. 41

5.3. 44

6. 47

7. 51

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

52

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
1. Mapa de ubicación de la cantera CONTEC	5
2. Mapa de ubicación de los cratones regionales.	7
3. Mapa geológico del área de estudio, mostrando la posición de la cantera CONTEC.	8
4. Diagrama de perfil de meteorización profunda.	13
5. Aerofotografía general de la cantera CONTEC.	18
6. Aerofotografía del perfil de meteorización.	19
7. Perfil de meteorización de la cantera CONTEC.	19
8. Fotomicrografías de la muestra M1 en sección delgada. Aumento: 40×.	21
9. Fotomicrografías de la muestra M2 en sección delgada. Aumento: 40×.	22
10. Zona de muestreo de la Cant 1.	23
11. Difractograma de la muestra Cant 1, señalando la posición de los minerales primarios.	24
12. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 1.	26
13. Mapa elemental de la muestra Cant 1.	27
15. Espectrograma del EDS Cant.	27
16. Mapas por elementos de Cant 1	28
17. Zona de muestreo de la Cant 2.	29
18. Fotografía de <i>corestones</i> .	30
19. Difractograma de la muestra Cant 2.	31
20. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 2.	32
21. Mapa elemental de la muestra Cant 2.	33
22. Espectrograma del EDS Cant 2.	33
23. Mapas por elementos de Cant 2	34
25. Zona de muestreo de la Cant 3.	35
26. <i>Corestones</i> con costras de alteración ferruginosa.	35
27. Difractograma de la muestra Cant 3 señalando la posición de los minerales primarios.	36

28. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 3.	37
29. Mapa elemental de la muestra Cant 3.	38
30. Mapas por elementos de Cant 3	38
31. Espectrograma del EDS Cant 3.	39
32. Zona de muestreo de la muestra Cant 4	40
33. Difractograma de la muestra Cant 4 señalando la posición de los minerales primarios.	41
34. Zona de muestreo de la muestra Cant 5.	42
35. Vista general del Caolín identificado en Cant 5.	42
36. Caolín junto con <i>corestones</i> subangulosos poco desarrollados, bordeados por fracturas ortogonales formando paralelepípedos a su vez, <i>corestones</i> subredondeados redondeados en la parte superior derecha.	43
37. Fracturas ortogonales formando paralelepípedos en la roca madre	43
38. Difractograma de la muestra Cant 5.	44
39. Fracturas subhorizontales (D4) y subverticales.	46
40. Diagrama de rosa de las orientaciones de las fracturas principales.	46
41. Aerofotografía del perfil de meteorización.	48
42. Diagrama de formación del proceso de formación de Bornhardts.	49

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

AM:	Cratón de la Amazonia
DRX:	Difracción de rayos X
EDS:	Espectroscopía de energía dispersiva de rayos X
INE:	Instituto Nacional de Estadística
LA:	Cratón Luís Alves
MEB:	Microscopía electrónica de barrido
MEB-EDS:	Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X
MO:	Microscopía óptica
MOLE:	Laboratorio de Análisis Molecular y Elemental
QGIS:	Sistema de Información Geográfica de código abierto
RA:	Cratón Río Apa
RDP:	Cratón Río de la Plata
SF:	Cratón São Francisco
SIG:	Sistema de Información Geográfica
TBL:	Lineamiento Trans Brasileiro
U-Pb:	Uranio-plomo
UTM:	<i>Universal Transversal de Mercator</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

B:	Biotita
Cant.:	Código utilizado para las muestras Cant 1, Cant 2, Cant 3, Cant 4 y Cant 5
D1, D2 y D3:	Familias principales de fracturas
F:	Feldespatos potásicos
IF:	Facies de ignimbrita
K:	Caolinita en difractogramas y microfotografías; potasio en análisis químicos y mapas elementales
LPP:	Luz polarizada plana
M1 y M2:	Muestras correspondientes a la roca menos alterada del perfil
MAMF:	Facies de monzogranito a microgranito de feldespato alcalino
NE:	Noreste
NO:	Noroeste
NNE-SSW:	Norte-noreste–sur-suroeste
NW-SE:	Noroeste-sureste
NX:	Nicoles cruzados
P:	Plagioclasa
Q:	Cuarzo
RF:	Facies de riolita
RPSF:	Facies de sienogranito porfirítico rapakivi
S:	Sanidina en fotomicrografías; superposición de picos cuando aparece entre paréntesis en difractogramas
SO:	Suroeste
W-E:	Oeste-este
WNW-ESE:	Oeste-noroeste–este-sureste

LISTA DE SÍMBOLOS

%:	Porcentaje
°:	Grado
±:	Más/menos
×	Aumento o magnificación
μm:	Micrómetro
nm:	Nanómetro
m:	Metro
km:	Kilómetro
g:	Gramo
m E:	Metros Este
m N:	Metros Norte
Ma:	Millones de años
2θ:	Ángulo de difracción expresado en grados dos theta
θ:	Theta
°θ/s:	Grados theta por segundo
Al:	Aluminio
Al₂O₃:	Óxido de aluminio
C:	Carbono
CO₂:	Dióxido de carbono
Cu:	Cobre
Fe:	Hierro
Fe₂O₃:	Óxido de hierro
H₂O:	Agua
K:	Potasio
Mg:	Magnesio
Na:	Sodio
O:	Oxígeno
Si:	Silicio
SiO₂:	Dióxido de silicio
Ti:	Titanio

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado aborda el estudio de un perfil de meteorización química ubicado en la localidad de Capilla Tuja, ciudad de Caapucú, departamento de Paraguarí, Paraguay Oriental. El perfil se desarrolla sobre rocas pertenecientes a la Suite Magmática Caapucú, específicamente sobre una ignimbrita afectada por procesos de alteración vinculados a factores geomorfológicos, geoquímicos, estructurales y posiblemente paleoclimáticos, asociados a condiciones cálidas y húmedas favorables para la meteorización química.

Los trabajos extractivos realizados en la cantera CONTEC dejaron expuesto un perfil de aproximadamente 6 m de espesor y 53 m de longitud, donde se reconocen materiales intensamente alterados *in situ*. En dicho perfil se observan sectores con abundancia relativa de neominerales del grupo de las arcillas, además de una aparente distribución vertical de los materiales alterados. Esta disposición estaría condicionada, en parte, por un control estructural asociado a un sistema de diaclasas con direcciones preferenciales, las cuales habrían favorecido la circulación de agua meteórica, principal agente de alteración en este contexto.

En este sentido, surge la necesidad de analizar la evolución del perfil de meteorización química profunda y su posible relación con la transformación progresiva de los minerales primarios hacia neominerales arcillosos, así como con las características geomorfológicas observadas en el área de estudio. Para ello, la investigación integra observaciones de campo, descripción macroscópica, análisis petrográfico en lámina delgada, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS). Estos métodos permiten evaluar el avance de la alteración química desde la roca menos alterada hasta los materiales más meteorizados, considerando cinco puntos de muestreo diferenciados por su color, cohesión, grado de alteración y geoformas asociadas.

1.1. Planteamiento del problema

Un perfil de meteorización química desarrollado en terrenos graníticos suele presentar una evolución bien definida, que progresa desde la roca inalterada hacia zonas progresivamente más alteradas, como saprock, saprolito, duricostras y la faja móvil (Eswaran y Bin, 1978; Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998, Vidal Romaní y Twidale, 2005; Migoñ, 2013). Este modelo morfogenético conceptual permite evaluar la transformación progresiva de los minerales primarios desde la roca inalterada y la formación de neominerales en las zonas más alteradas del perfil. La identificación de estos componentes minerales mediante distintos métodos analíticos, es fundamental para comprender su evolución mineralógica, el grado de madurez y los factores geomorfológicos que controlan su desarrollo.

En el área de estudio no se encuentra un análisis detallado tanto desde el punto de vista mineralógico y geomorfológico, en ese sentido esta falta de información nos impide establecer una secuencia de alteración coherente, lo que limita la interpretación sobre la evolución del proceso. La ausencia de información sobre la característica mineral detallada del perfil restringe la posibilidad de identificar neominerales tradicionalmente utilizados como materia en la industria cerámica y porcelanato.

1.2. Preguntas de investigación

1.2.1. Pregunta general

¿Cómo es el desarrollo del perfil de meteorización química en función de la transformación de minerales primarios, la formación de neominerales y los factores geomorfológicos?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuál es la composición mineralógica de la roca menos alterada y de las alteritas que conforman el perfil de meteorización química?

- ¿Cuáles son las características micromorfológicas de los neominerales formados como resultado de la meteorización química de la roca?
- ¿Qué geoformas se asocian al perfil de meteorización química en el área de estudio y cómo se relacionan con las distintas partes del perfil?

1.2.3. Objetivo General

Analizar el desarrollo del perfil de meteorización química en función de la transformación de minerales primarios, la formación de neominerales y los factores geomorfológicos asociados.

1.2.4. Objetivos específicos

- Determinar la composición mineralógica de la roca menos alterada y de las alteritas que conforman el perfil de meteorización química.
- Describir las características micromorfológicas de los neominerales formados como resultado de la meteorización química de la roca.
- Relacionar las geoformas asociadas al perfil de meteorización química en el área de estudio con las distintas partes del perfil.

1.3. Justificación

En los alrededores de la ciudad de Caapucú, se ubica en la cantera del Consorcio CONTEC, un perfil de meteorización con sectores de menor y mayor grado de alteración, representando la singularidad del área de estudio. Este perfil presenta al menos unos 6 metros de espesor y tiene secciones de roca muy alterada *in situ*, secciones que presumiblemente representan a una abundancia relativa de neominerales del grupo de las arcillas, frente a los minerales primarios de la roca original.

Los ejemplos de perfiles de alteración observados en las bibliografías muestran una distribución vertical, pudiendo estos alcanzar decenas de metros de profundidad y se componen del frente de meteorización en profundidad, seguido del saprock, el saprolito y las duricostras. En el área de estudio de este trabajo de grado, el perfil presenta una aparente distribución lateral, condición que podría estar controlada por la configuración estructural del área (sistema de diaclasa e intensidad) o bien, podría estar respondiendo a procesos incipientes en la alteración de la roca, ya que teóricamente, el modelo conceptual (Vidal Romaní y Twidale, 1998) menciona que el proceso morfogenético se inicia, a partir del sistema de diaclasa instaurado previamente por tectonismo, generalmente ortogonal, condición que posteriormente es aprovechada por el agua que se infiltra a partir de las fracturas, resultando en la alteración de la roca.

El estudio propuesto surge a partir de la necesidad de avanzar en el conocimiento de estos yacimientos minerales que presenta interés científico, ambiental y económico para lo cual se combinan los métodos de caracterización de materiales (MO, DRX y MEB), permitirá comprender el avance de la alteración química en la roca, desde una perspectiva mineral, micromorfológica y geomorfológica. La caracterización geomorfológica aporta información importante para determinar la génesis de estos materiales para compararla.

1.4. Hipótesis

El perfil de meteorización química de la cantera CONTEC no presenta una distribución vertical típica, sino que se desarrolla lateralmente debido al control ejercido por el sistema de fracturas y los factores geomorfológicos.

2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en las proximidades de la ciudad de Caapucú, Departamento de Paraguari, en la región sur-occidental del Paraguay Oriental (Figura 1). La investigación se desarrolló específicamente en la cantera del Consorcio CONTEC, situada en la localidad de Capilla Tuya, a unos 3.7 km del centro de la ciudad, cuyas coordenadas UTM son (483402 m E y 7101801 m N).

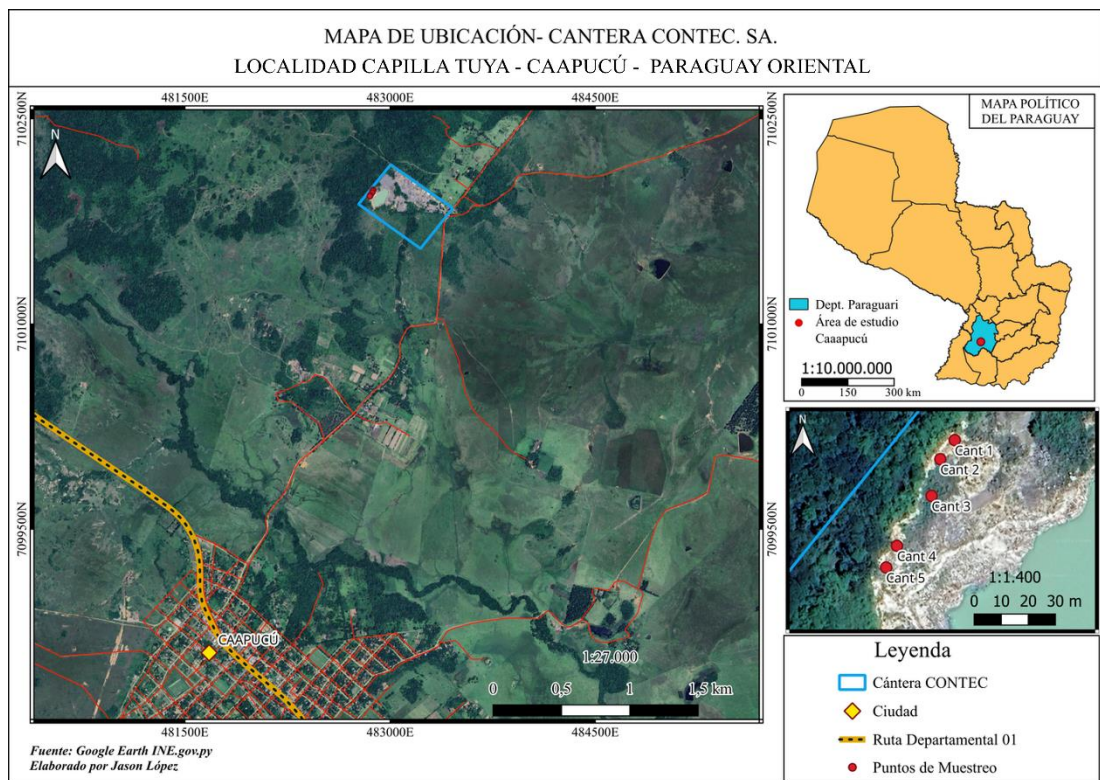


Figura 1. Mapa de ubicación de la cantera CONTEC.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE, 2012.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Configuración Geológica

3.1.1. Geología y tectónica

El Cratón Río de la Plata constituye una de las unidades precámbricas más antiguas de Sudamérica y es interpretado como un terreno paleoproterozoico autóctono dentro del contexto de Gondwana sudoccidental. Por su parte, el Bloque Paranapanema representa un dominio cortical compuesto por fragmentos cratónicos amalgamados y estabilizados durante la formación de Gondwana, actualmente cubierto en gran medida por los sedimentos de la Cuenca del Paraná y delimitado por cinturones neoproterozoicos (Cordani *et al.*, 1984; Milani y Ramos, 1998; Padilha *et al.*, 2015).

En el sector sur de Paraguay Oriental se reconoce el Bloque Alto Caapucú, ubicado en el borde norte del Cratón Río de la Plata. Este bloque constituye una exposición precámbrica importante en Paraguay Oriental y se localiza entre el Cratón Río de la Plata y el Bloque Paranapanema, al sur del Bloque Río Apa y al oeste de los cinturones móviles de la Provincia Mantiqueira (Figura 2) (Fúlfaro, 1996; Rapela *et al.*, 2007; Favetto *et al.*, 2015; Leite *et al.*, 2018).

Desde el punto de vista estructural, el Bloque Alto Caapucú se encuentra parcialmente separado del Bloque Paranapanema por lineamientos de rumbo NW, mientras que en la región de Villa Florida se reconocen zonas de cizalla de orientación NE. Estas estructuras habrían tenido origen durante el Proterozoico y fueron posteriormente reactivadas durante el Ciclo Brasileño y el Mesozoico (Kanzler, 1987; Mantovani y Brito Neves, 2005).

La evolución geológica del Bloque Alto Caapucú estuvo controlada por dos grandes eventos tectonomagmáticos: el Ciclo Transamazónico, vinculado con la formación del Complejo Río Tebicuary, y el Ciclo Brasiliano, relacionado con el magmatismo ácido de la Suite Magmática Caapucú (Cordani *et al.*, 2001; Leite *et al.*, 2018).

El magmatismo de la Suite Magmática Caapucú ha sido interpretado como post tectónico a post colisional, desarrollado durante la etapa final del Ciclo Brasiliano/Panafricano. Su origen estaría vinculado con la evolución del Cinturón Paraguairí, generado por la aglutinación o colisión entre los cratones Paranapanema y Río de la Plata durante la amalgamación de Gondwana Occidental (Leite *et al.*, 2018).

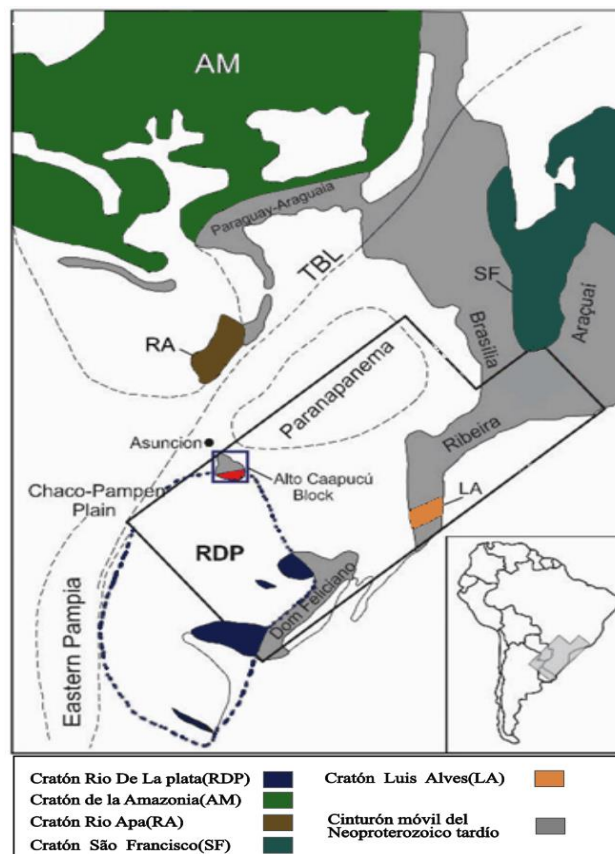


Figura 2. Mapa de ubicación de los cratones regionales. Las líneas punteadas indican límites inferidos de las principales unidades corticales precámbricas TBL: Lineamiento Transbrasiliense.

Fuente: Adaptado de (Leite *et al.*, 2018; Rapela *et al.*, 2007).

La Provincia Mantiqueira corresponde a un cinturón orogénico de orientación NE–SW, desarrollado durante la convergencia brasiliana–panafricana de distintos

bloques continentales en el Neoproterozoico. En este marco, la Suite Magmática Caapucú presenta una posible correlación tectonomagmática con los eventos ígneos postectónicos de los cinturones Ribeira y/o Dom Feliciano, pertenecientes a dicha provincia (Leite *et al.*, 2018).

3.1.2. Suite Magmática Caapucú

La Suite Magmática Caapucú fue datada mediante el método U-Pb en circón, la cual obtuvo edades de cristalización de aproximadamente $563 \pm 7,9$ Ma y 565 ± 11 Ma. Estos resultados ubican a la suite dentro del Neoproterozoico (Ediacariano), lo que la vincula con los procesos post-colisionales del Ciclo Brasileiro (Leite *et al.*, 2018).

Esta unidad (Figura 3) presenta cuatro variaciones de facies, clasificadas de acuerdo a las variaciones de color, textura, tamaño de cristal y composición mineralógica: facies de sienogranito porfirítico rapakivi (RPSF), facies de monzogranito a microgranito de feldespato alcalino (MAMF), facies de riolita (RF) y facies de ignimbrita (IF) (Cubas *et al.*, 1998; Leite *et al.*, 2018).

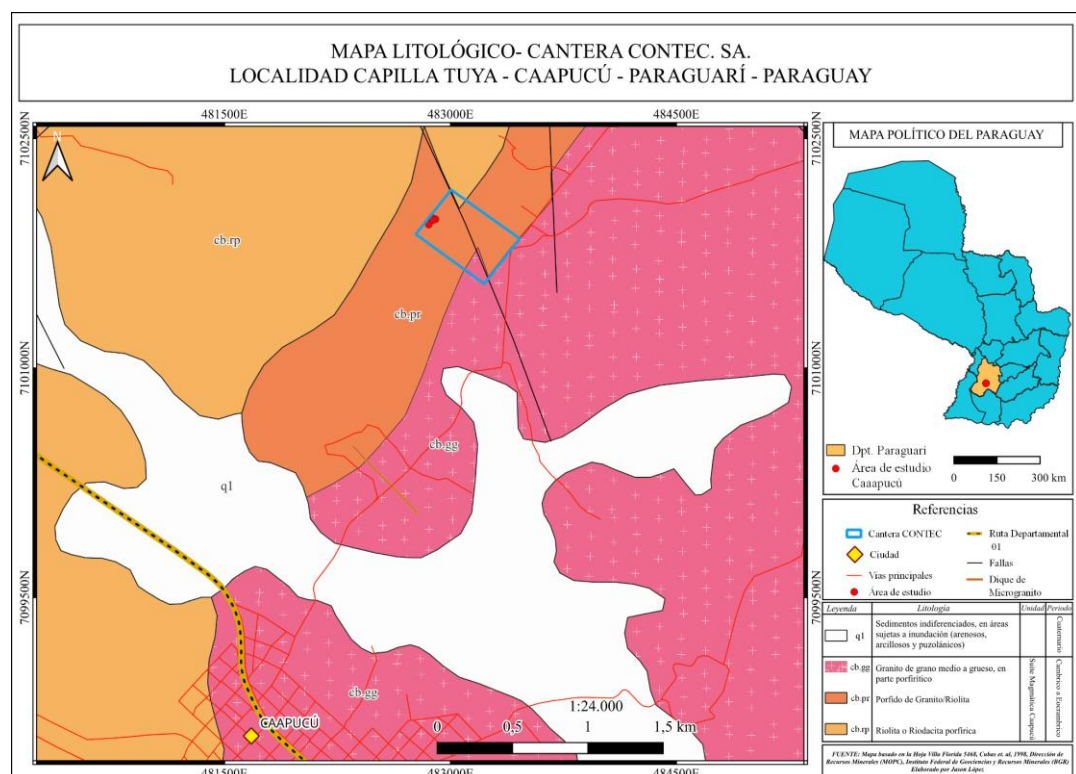


Figura 3. Mapa geológico del área de estudio, mostrando la posición de la cantera CONTEC.

Fuente: Elaboración propia, extraída y modificada (Cubas *et al.*, 1998).

3.2. Geología de las arcillas

Las arcillas son materiales geológicos naturales de grano muy fino, generalmente asociados con la fracción menor de 2 μm . Están constituidas principalmente por minerales arcillosos, los cuales, en ambientes naturales, suelen presentar una estructura laminar de tipo filosilicato. No obstante, dentro de la fracción arcillosa también pueden encontrarse otros minerales de tamaño fino, como cuarzo, óxidos, zeolitas y otros componentes accesorios presentes en el ambiente geológico. Debido a su reducido tamaño de partícula y a su hábito cristalográfico laminar, estos minerales poseen una elevada superficie específica, lo que favorece su interacción con el agua y les confiere propiedades como adsorción, retención de humedad y facilidad de transporte en suspensión (Velde, 1992).

Los minerales arcillosos pueden formarse en diversos ambientes geológicos y no responden a un único origen. Según Velde (1992), cerca de la superficie terrestre los minerales arcillosos se originan principalmente por la inestabilidad y alteración de otros minerales silicatados. Este proceso ocurre generalmente mediante una disolución incongruente, durante la cual los componentes más solubles son liberados, mientras que la fracción menos soluble permanece o se reorganiza para formar minerales arcillosos. Sin embargo, las arcillas también pueden originarse o transformarse durante la sedimentación, la diagénesis de enterramiento, el metamorfismo de bajo grado y la alteración hidrotermal. En este sentido, su presencia en una roca o perfil de alteración debe interpretarse considerando el ambiente de formación, la composición del material parental, la interacción agua-roca, la temperatura, el tiempo de reacción y las condiciones fisicoquímicas del sistema (Velde, 1992; Tardy y Roquin, 1992).

3.2.1. Caolín y caolinita

La etimología de las palabras caolín y caolinita provienen del término “Ka O Ling”, de una localidad de China de la Provincia de *Kiangsi*, cuyo significado es alta montaña. La caolinita es un mineral perteneciente al grupo de las arcillas, silicato aluminico hidratado con un característico color blanquecino. Mientras que el caolín se define como una roca masiva constituida por un contenido variable de minerales arcillosos, cuya composición es igual o cercana a la de la caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), caracterizada por un bajo contenido de hierro y una coloración

generalmente blanquecina. Mineralógicamente, la caolinita constituye la fase predominante, aunque pueden presentarse otros minerales del grupo en proporciones variables (Bartolomé, 1997).

3.2.2. Propiedades químicas

Las arcillas han sido empleadas desde tiempos antiguos en diversas aplicaciones gracias a su capacidad para interactuar con compuestos orgánicos. Inicialmente se utilizaron en la fabricación de cerámica y posteriormente, en procesos como la eliminación de grasas, la clarificación de aceites y el transporte de sustancias químicas. Estas propiedades se deben a su elevada capacidad de adsorción, especialmente en arcillas expansivas y minerales fibrosos, que pueden retener moléculas en sus superficies activas o espacios interlaminares. Este comportamiento está asociado a la presencia de cargas negativas en su estructura, las cuales favorecen la interacción con moléculas polares y condicionan la incorporación de compuestos orgánicos según sus características químicas (Velde, 1992).

3.3. Condiciones paleoclimáticas en Gondwana

Durante el Jurásico y el Cretácico Gondwana estuvo sometido a condiciones paleoclimáticas extremadamente cálidas y húmedas, con altas concentraciones de CO₂, elevadas precipitaciones y gran estabilidad tectónica. Estos ambientes hiper-tropicales favorecieron una intensa meteorización química profunda y el desarrollo de espesos perfiles de alteración (Rabassa, 2014).

Posteriormente, durante el Eoceno tardío y Oligoceno temprano, el sur de Sudamérica mantuvo condiciones cálidas y húmedas que favorecen el desarrollo de paleofloras densas y diversos procesos de alteración química. Sin embargo, hacia el Oligoceno tardío y Mioceno temprano se produjo una transición hacia climas más fríos y secos, vinculada a la glaciación antártica y la apertura del Pasaje de Drake, modificando tanto la vegetación como la dinámica de meteorización regional (Vento *et al.*, 2021).

La meteorización química profunda, como proceso morfogénico, no se restringe exclusivamente a ambientes tropicales cálidos y húmedos, ya que también puede desarrollarse bajo condiciones templadas, siempre que exista circulación de aguas subterráneas y suficiente tiempo geológico para que ocurran reacciones

químicas como la hidrólisis. En este sentido, Cravero *et al.* (1991) reconocen procesos de alteración asociados a condiciones húmedas templado-moderadas en yacimientos residuales desarrollados sobre rocas volcánicas-piroclásticas de la Patagonia. Por lo tanto, la presencia de perfiles profundos de alteración responde no solo a las condiciones climáticas superficiales, sino también a la disponibilidad de agua en profundidad, al drenaje, a la litología y a la duración de los procesos geológicos (Ollier *et al.*, 1988; Cravero *et al.*, 1991).

3.4. Geomorfología de los paisajes graníticos

Los paisajes graníticos evolucionan gracias a la meteorización química profunda y este proceso ocurre debido a la alteración química en la subsuperficie, favorecida por la acción prolongada del agua subterránea y el desarrollo de procesos de hidrólisis, disolución y lixiviación sobre materiales fracturados. Este tipo de meteorización produce espesos perfiles de meteorización, donde la estructura original de la roca puede conservarse parcialmente a pesar de la transformación mineralógica. Su desarrollo depende de factores como la litología, el grado de fracturamiento, la circulación de agua y la estabilidad tectónica a largo plazo (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Vidal Romaní y Twidale *et al.*, 2005; Migoñ, 2006).

3.4.1. Sistema de fracturas

Un sistema de fracturas corresponde a un conjunto de discontinuidades dispuestas de forma ordenada y repetitiva. En cuerpos graníticos son frecuentes los sistemas ortogonales o romboidales, constituidos por tres conjuntos que se interceptan aproximadamente en ángulo recto. Cuando estos sistemas están relacionados con esfuerzos de cizalla, se denominan juntas o diaclasas conjugadas, cuyos conjuntos pueden disponerse alrededor de 45° respecto a la dirección del esfuerzo principal; si a lo largo de estas discontinuidades se reconoce movimiento relativo, se interpretan como planos de cizalla o fallas (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Vidal Romaní y Twidale *et al.*, 2005).

3.4.2. Perfil de meteorización química profunda

Un perfil de meteorización química (Figura 3) es el producto vertical de la meteorización química, presenta distintas zonas y niveles de alteración. Desde la zona más profunda, el frente de meteorización, la saprolita, el saprock, duricostra y la faja móvil o suelo transportado, cuya disposición refleja la intensidad progresiva de la descomposición química desde la roca fresca en profundidad, hacia los materiales más alterados cerca de la superficie. Asimismo, estos perfiles suelen diferenciarse en una zona oxidada superior y una zona saturada o reductora inferior, asociadas a la dinámica del agua subterránea y al nivel freático (Vidal Romaní y Twidale, 1998; Vidal Romaní y Twidale *et al.*, 2005; Ollier, 1988; Migoñ y Lidmar-Bergström, 2001; Migoñ, 2006).

3.4.2.1. Frente de meteorización

El frente de meteorización es la superficie de transición que separa la roca fresca ubicada en profundidad, de la roca alterada dentro de un perfil de meteorización. Se caracteriza por presentar un contacto generalmente abrupto e irregular, controlado por fracturas, diaclasas y la circulación de agua subterránea, donde actúan procesos de alteración química como la hidrólisis. Su desarrollo depende de factores litológicos, estructurales e hidrológicos, y cumple un papel fundamental en la formación de saprolitos y en la evolución del relieve granítico, ya que la erosión posterior del material meteorizado puede exponer geoformas residuales como tors, domos e inselbergs (Ollier, 1988; Migoñ y Lidmar-Bergström, 2001).

3.4.2.2. Saprock

El *saprock* representa una etapa intermedia dentro de los perfiles de meteorización profunda, ubicada entre la roca fresca y los materiales más alterados. Aunque conserva la estructura original de la roca, ya evidencia procesos de alteración química y física, por lo que constituye un elemento importante en la evolución de los paisajes graníticos y en la formación de diversas geoformas asociadas a la meteorización profunda (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Vidal Romaní y Twidale, 2005; Migoñ, 2006).

3.4.2.3. Saprolita

La saprolita corresponde al material meteorizado que conserva parcialmente la estructura y textura original de la roca madre, aunque sus minerales ya hayan sido

alterados por procesos de meteorización química. El término suele utilizarse para describir la zona ubicada entre el suelo y la roca fresca dentro de un perfil de meteorización (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Vidal Romaní y Twidale, 2005; Ehlen, 2005; Migoñ, 2006).

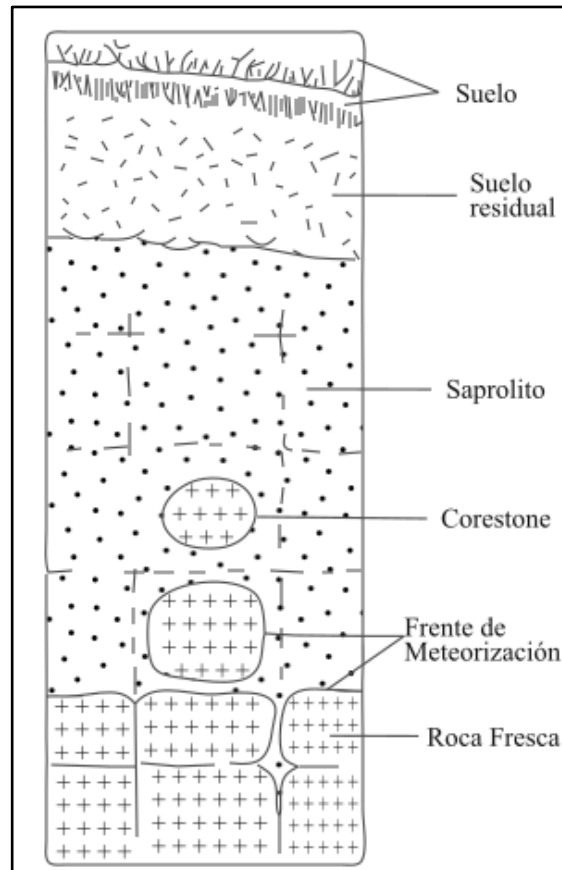


Figura 4. Diagrama de perfil de meteorización profunda.

Fuente: Extraído y modificado de (Ollier, 2010).

3.4.3. Formas grabadas

Las formas grabadas son geoformas originadas por la acción de la meteorización diferencial en profundidad y la posterior remoción del material alterado por erosión. Estas formas se desarrollan inicialmente bajo la superficie, principalmente en el frente de alteración y dentro del perfil de meteorización, donde el agua aprovecha fracturas, diaclasas y otras discontinuidades estructurales para producir una alteración selectiva de la roca. De acuerdo con su escala y morfología, las formas grabadas pueden clasificarse en formas mayores (*bornharts*, *castle koppies*, *nubbins* e *inselbergs*) y menores (*corestones*, *boulders*, *tors*, *gnamma*, *tafoni*, grietas poligonales, superficies escalonadas, entre muchas otras). Estas geoformas pueden desarrollarse

tanto en la base del saprolito o frente de alteración como dentro del propio saprolito, quedando posteriormente expuestas por la erosión. Su distribución y características reflejan la influencia de la estructura de la roca y de los procesos de meteorización que actuaron durante la evolución del paisaje granítico (Linton, 1955; Twidale, 1980; Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Ehlen, 2005; Hejl, 2005; Vidal Romaní y Twidale, 2005; Migoñ, 2006; Uña-Álvarez, 2008; Paradise, 2015; Timms, 2021, entre muchos otros).

4. METODOLOGÍA

4.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, con apoyo de análisis de laboratorio, ya que busca describir e interpretar las características mineralógicas y geomorfológicas del perfil de meteorización. De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2014), corresponde a un diseño no experimental, porque el fenómeno se estudia en su contexto natural, sin manipular variables. Asimismo, presenta un alcance descriptivo, debido a que se orienta a caracterizar el perfil y a relacionar las observaciones de campo con los resultados obtenidos en laboratorio.

El desarrollo metodológico de la investigación se organizó en tres etapas principales: trabajo de gabinete, trabajo de campo y análisis de laboratorio.

4.1.1. Etapa de Gabinete

En la etapa de gabinete, se utilizaron herramientas SIG y herramientas de edición de acceso libre, incluyendo Google Earth Pro (*Google LLC, 2022*), QGIS (*QGIS Development Team, 2022, versión 3.38.1*), para la generación de mapas vectoriales, contrastados en todo momento con la cartografía geológica disponible en la bibliografía del área de estudio y Inkscape, *versión 1.4.30.0*, para diseñar gráficos, edición de imágenes y modelos esquemáticos.

4.1.2. Trabajo de campo

En el trabajo de campo, se identificaron las partes del perfil de meteorización en la cantera y las geoformas asociadas. El perfil de meteorización de la cantera CONTEC se esquematizó a partir de un esquema hipotético (Migoñ, 2013; Ollier, 2010, 2014) (Figura 4), donde se planteó una subdivisión basada en las principales partes de un perfil (frente de meteorización, saprock y saprolito). Los trabajos de campo se orientaron en la identificación de cada una de las partes, generando esquemas gráficos y análisis de las fotos para discriminarlas y describir sus características macroscópicas entre las que se destacan textura, color y consistencia al tacto. El criterio para la selección de muestras se basó en la intención de comparar mineralógicamente las partes identificadas, por lo tanto, se tomaron 2 muestras del frente de meteorización (M1 y M2), 2 muestras de la zona del saprock (Cant 1 y Cant 2) y finalmente, 3 muestras de la zona saprolita (Cant 3, Cant 4 y Cant 5). Las muestras fueron posteriormente procesadas para su análisis mediante distintos métodos: secciones delgadas (MO), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido con espectroscopía por energía dispersiva (MEB-EDS).

4.1.3. Preparación y análisis de laboratorio

El proceso de elaboración de las secciones delgadas se llevó cabo en las instalaciones del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción y fueron preparadas impregnando inicialmente las muestras en una resina epóxica NOVARCHEM (DIPREG 87A) y endurecedor NOVARCHEM (DIPREG 87B) en una proporción 4:1. Este proceso facilitó el corte de secciones delgadas utilizando una cortadora de rocas LECO, modelo VC-50 y el pulido de las mismas con una pulidora LECO, modelo SPECTRUM SYSTEM 1000 (SS1000).

Las imágenes micromorfológicas fueron adquiridas en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Molecular y Elemental (MOLE) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción, utilizando un equipo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), modelo ZEISS EVO 15. Para prevenir la carga superficial que podría alterar la imagen, las muestras fueron recubiertas con una capa de carbono (C) del orden de unos 5 a 20 nanómetros de grosor.

Para los análisis químicos y mineralógicos, se realizaron análisis mediante difracción de rayos X (DRX) en roca total. Las muestras fueron disgregadas en porciones de aproximadamente 20 g y pulverizadas hasta obtener un polvo fino desorientado utilizando un mortero de ágata. Posteriormente, el material fue almacenado en tubos Eppendorf debidamente etiquetados y montado en porta muestras de acero inoxidable para su análisis. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Rayos X con el equipo Panalytical AERIS del Museo de la Universidad Nacional de La Plata, con el objetivo de identificar la composición mineralógica de las muestras. Las lecturas se realizaron en un intervalo de 5° a $85^\circ 2\theta$, con una velocidad de registro de $0,2^\circ/\text{s}$.

4.2. Limitaciones metodológicas

Una de las limitaciones metodológicas del estudio fue la imposibilidad de realizar análisis mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva en las muestras Cant 4 y Cant 5, debido al tiempo disponible para el desarrollo de la investigación. En consecuencia, la caracterización micromorfológica y química elemental mediante esta técnica se restringió a las muestras Cant 1, Cant 2 y Cant 3, lo que limitó la comparación micromorfológica entre la totalidad de los sectores estudiados. No obstante, la interpretación de Cant 4 y Cant 5 se sustentó en las observaciones realizadas en campo y en los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X. Estas evidencias permitieron reconocer sus características macroscópicas y mineralógicas, así como establecer su posición relativa dentro de la secuencia de alteración del perfil.

5. RESULTADOS

El perfil de meteorización identificado en la cantera CONTEC (Figura 5) presenta una coloración blanquecina a amarillenta y muestra un desarrollo *in situ*, evidenciado en los *corestones* dispuestos de forma superpuesta en el frente de cantera.

Este frente alcanza aproximadamente 6 m de espesor y 53 m de longitud, se dispone en forma de cuña convexa en los laterales (Figura 6).

Los resultados se organizan de acuerdo con los análisis realizados. Se describen las muestras M1 y M2 a través de microscopía óptica y difracción de rayos x, debido a que se corresponden con el equivalente menos alterado. Para caracterizar la saprolita se realizaron descripciones de campo, análisis por difracción de rayos x y microscopía electrónica de barrido en las muestras Cant 1, Cant 2, Cant 3, Cant 4 y Cant 5.



Figura 5. Aerofotografía general de la cantera CONTEC. Señalando en un recuadro rojo la posición del perfil sobre la cantera.

Fuente: Aerofotografía propia, 2026.



Figura 6. Aerofotografía del perfil de meteorización, señalando en un recuadro rojo su distribución lateral.

Fuente: Aerofotografía propia, 2026.



Figura 7. Perfil de meteorización de la cantera CONTEC. Corestones dentro del perfil.

Fuente: Fotografía propia, 2026.

5.1. Microscopía óptica

Se realizaron cortes delgados de dos muestras M1 y M2 del equivalente menos alterado, debido a que se observó en campo variaciones texturales. Ambas muestras fueron obtenidas de la zona inferior a la base del perfil de meteorización.

Descripción M1: Roca lapillítica vitro-cristaloclástica fina, constituida por cristaloclastos de feldespato potásico (sanidina) como fases principales, cuarzo subordinado y minerales opacos y biotita como fases accesorias. Se observa un cristaloclastos de cuarzo subhedrales de tamaño grueso, con fracturamiento interno y bordes angulosos (Imágenes a y b, Figura 8). Los cristales de sanidina presentan formas subhedrales a euhedrales, coloración pardo-amarillenta tanto en nicoles paralelos como cruzados y una alteración muy incipiente con desarrollo de neominerales. Los cristales de biotita con formas anhedrales y marcas de alteración. Se observan vitroclastos alargados y orientados preferencialmente interpretados como fiammes de tamaño fino (Imágenes c y d, Figura 8), evidenciando un comportamiento reomórfico asociado al grado de soldamiento moderado a alto. Asimismo, exhibe una textura de desvitrificación felsítica producto de la recristalización del vidrio en contacto con la matriz. Estos definen una textura parataxítica característica.

Descripción M2: Roca lapillítica vitro-cristaloclástica fina, constituida por cristaloclastos de feldespato potásico (sanidina) y cuarzo como fases principales y biotita y minerales opacos como fases accesorias. Se observa un cristaloclasto de cuarzo de tamaño muy grueso, fenocristalino, con fracturamiento interno y bordes angulosos (Imágenes c y d, Figura 9). Los cristales de sanidina presentan formas subhedrales a euhedrales de tamaño grueso a medio, con maclas de *Carlsbad*, coloración pardo-amarillenta tanto en nicoles paralelos como cruzados y marcar de alteración leve a moderada intensidad, atribuida a procesos de argilización. Se observan vitroclastos elongados, compactados y orientados preferencialmente, interpretados como fiammes de tamaño muy grueso (Imágenes b, Figura 9), los cuales evidencian un grado de soldamiento moderado a alto. Asimismo, exhibe una textura

de desvitrificación felsítica, producto de la recristalización del vidrio en contacto con la matriz. Estos definen una textura parataxítica característica.

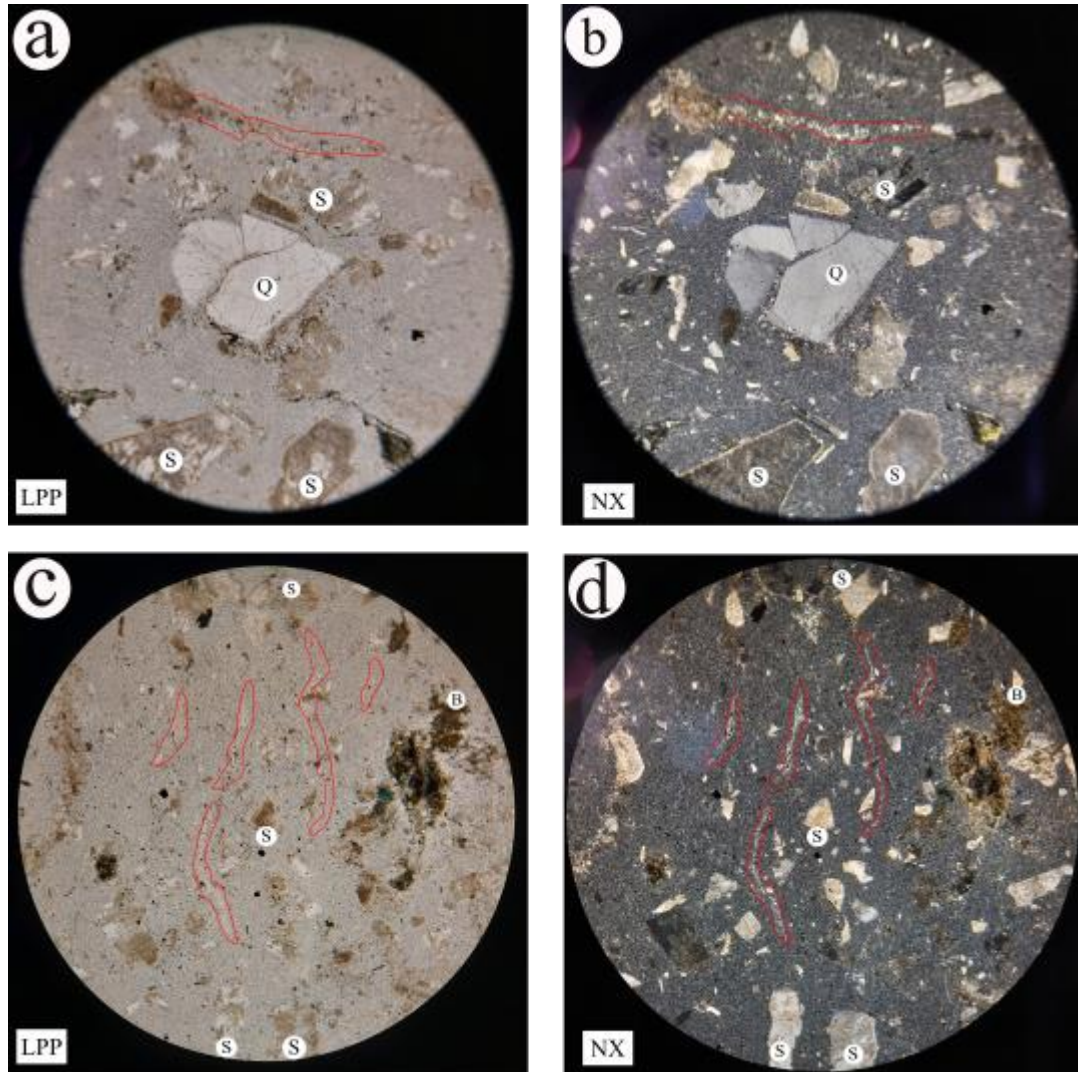


Figura 8. Fotomicrografías de la muestra M1 en sección delgada. En las imágenes a y b se observa un cristaloclasto de cuarzo (Q) subhedral, con fracturamiento interno y bordes angulosos, inmerso en una matriz fina vitro-cristaloclástica. Además, se reconocen fiammes marcados con líneas rojas, sanidina (S) y biotitas muy alteradas (B). Izquierda: luz polarizada plana (LPP); derecha: nícoles cruzados (NX). Aumento: 40×. Fuente: Microfotografías propias, 2026.

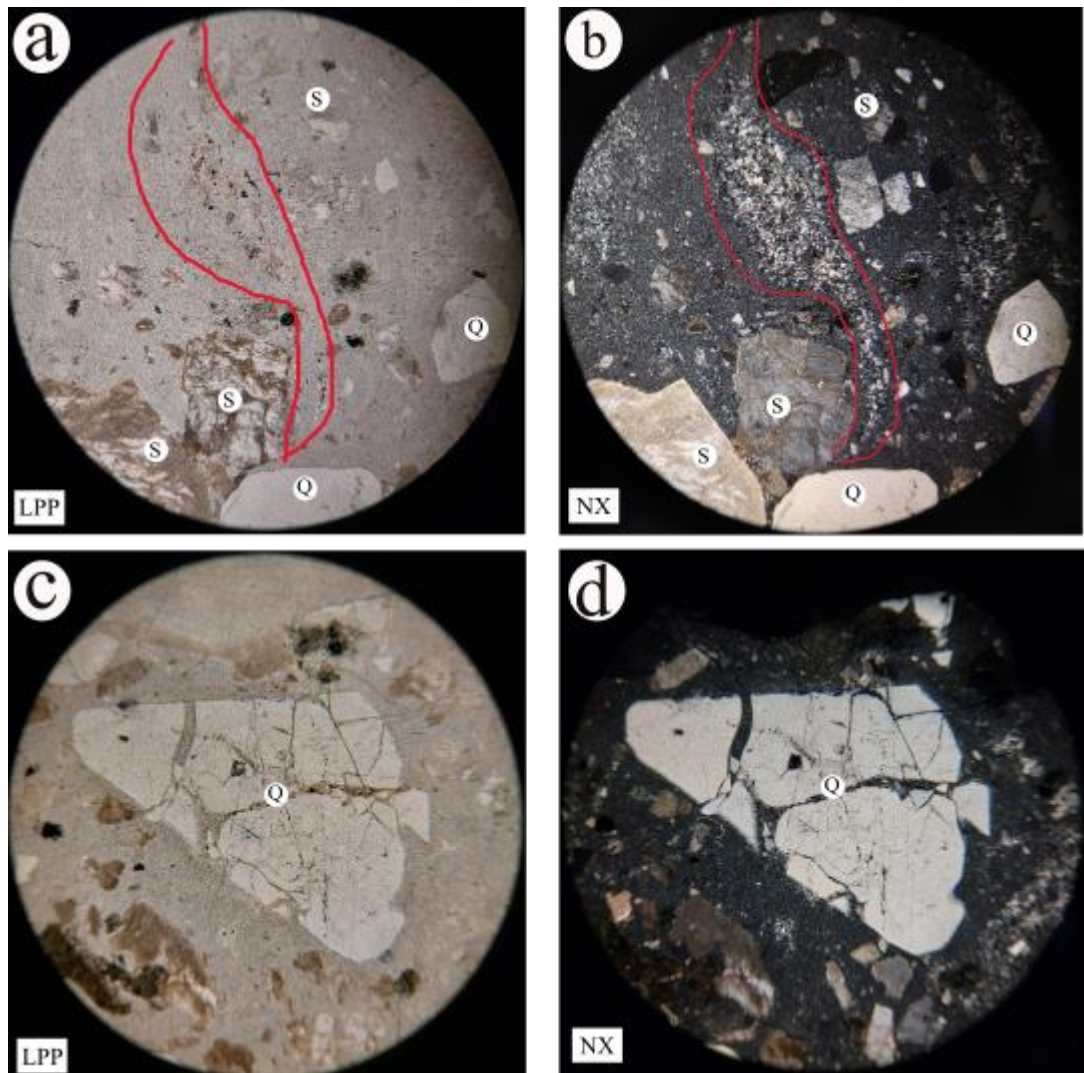


Figura 9. Fotomicrografías de la muestra M2 en sección delgada. Se observa un vitroclasto pumíceo colapsado, elongado y orientado preferencialmente, de morfología lenticular a sigmoidal, interpretado como fiamme y marcado con líneas rojas. Además, en las imágenes c y d se reconoce un cristaloclasto de cuarzo (Q) subhedral, con fracturamiento interno y bordes angulosos, inmerso en una matriz fina vitrocrystaloclástica. También se reconocen sanidina (S) y biotita muy alterada (B). Izquierda: luz polarizada plana (LPP); derecha: nícoles cruzados (NX). Aumento: 40×.

Fuente: Microfotografías propias, 2026.

Interpretación: Basados en características petrográficas de las muestras M1 y M2, se interpreta a esta roca como una ignimbrita con soldamiento moderado a alto, definidos por el comportamiento reomórfico de los fiammes.

5.2. Difractometría de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido

5.2.1. Muestra Cant 1

La muestra Cant 1 ha sido extraída de la zona donde el perfil de meteorización presenta colores rojos más intensos y asociados *etchforms* desarrollados *in situ* (Figura 10). En este sector del frente de cantera se identificó una gran cantidad de *etchforms* menores indicadores de meteorización química profunda, principalmente *corestones* de varios tamaños, algunos de unos pocos centímetros y otros con más de 2 metros de diámetro. La identificación de estas geoformas fue verificada a partir de las estructuras de descamación por meteorización.



Figura 10. Zona de muestreo de la Cant 1. Nótese su relación con los abundantes *corestones*.

Fuente: Fotografía propia, 2026.

En el difractograma de esta muestra Cant 1 (Figura 11) se identifican cuatro fases cristalinas predominantes. En primer lugar, se reconocen picos representativos del cuarzo. Seguidamente, se registran picos correspondientes al feldespato potásico, plagioclasa y biotita, los cuales corresponden a minerales primarios de la roca. Finalmente, se observan picos atribuibles a la caolinita, interpretada como un neomineral formado durante la meteorización química.

predominantes, seguidos por Fe (1,9%), K (0,9%), Cu (0,3%), Na (0,2%), Mg (0,2%) y Ti (0,1%).

Los mapas de distribución elemental presentados en la (Figura 15), evidencian concentraciones homogéneas para Si, Al, O, Fe, Mg, Na y Ti (Figura 15a-i). En contraste, el C y el K muestran concentraciones localizadas o anómalas (Imágenes d y e, Figura 15). Por su parte, el Cu (Imagen f, Figura 15) se encuentra en proporciones muy bajas dentro de la muestra. Esto evidencia una mayor diversidad composicional respecto a las muestras más alteradas del perfil.

La presencia de elementos de Na, Mg y Ti, resulta relevante, aunque estén en bajas proporciones, es importante debido a que estos elementos dejan de ser detectados en las muestras Cant 2 y Cant 3. Esta característica permite tomar a Cant 1 como referencia de material menos alterado dentro de la secuencia analizada.

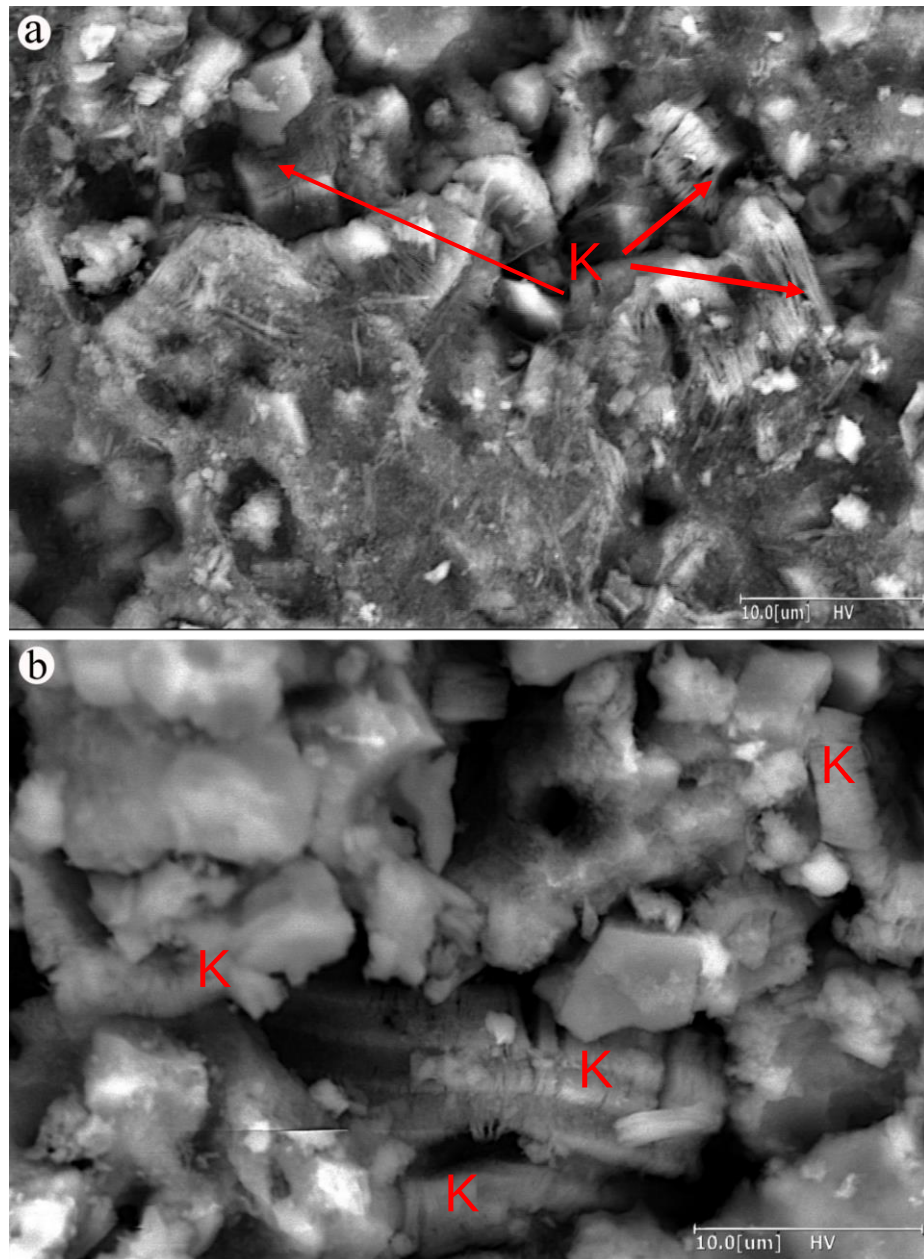


Figura 12. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 1: a) Caolinitas (K) neoformadas agrupadas en forma de “acordeones” o “libros”. b) Caolinita (K) con estructura vermiculares “*vermiform*”, agregados alargados como “gusanos”.

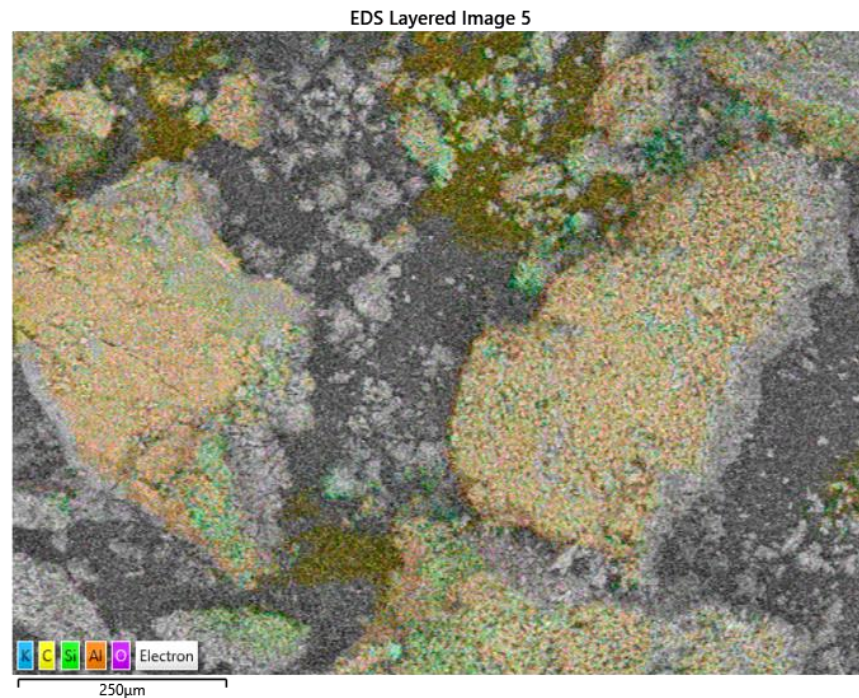


Figura 13. Mapa elemental de la muestra Cant 1. Las diferencias en los colores se corresponden con elementos caracterizados en la muestra, el color azul representa el Potasio (K), el amarillo Carbono (C), el verde Silicio (Si), el naranja Aluminio (Al) y el fuxia Oxígeno (O).

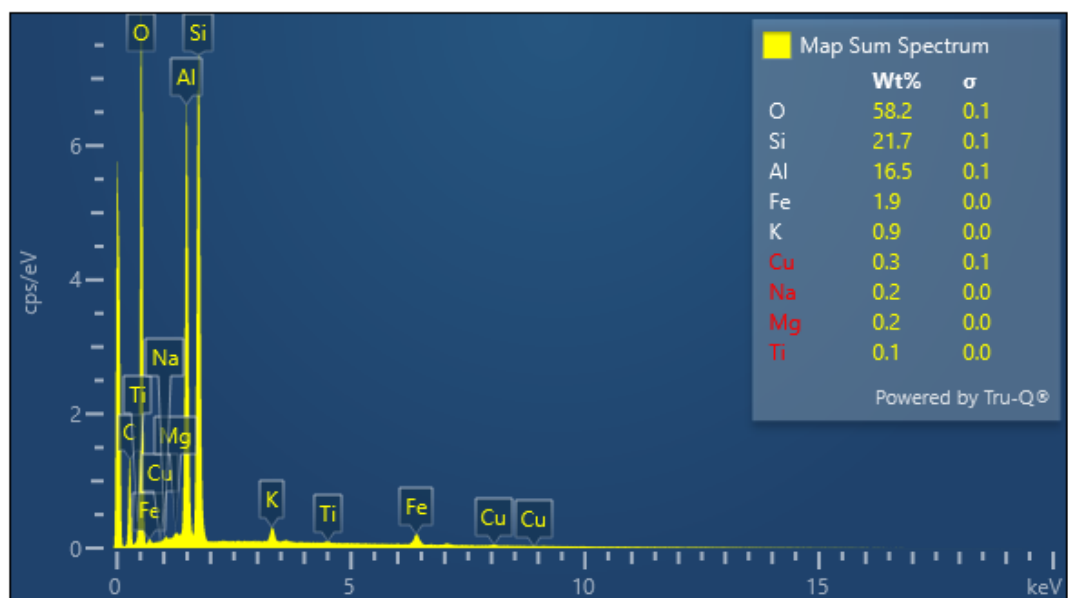


Figura 14. Espectrograma del EDS donde se observa una caracterización cualitativa de los elementos mayoritarios y una semicuantificación de los elementos: O, Si, Al, Fe, K, Cu, Na, Mg y Ti.

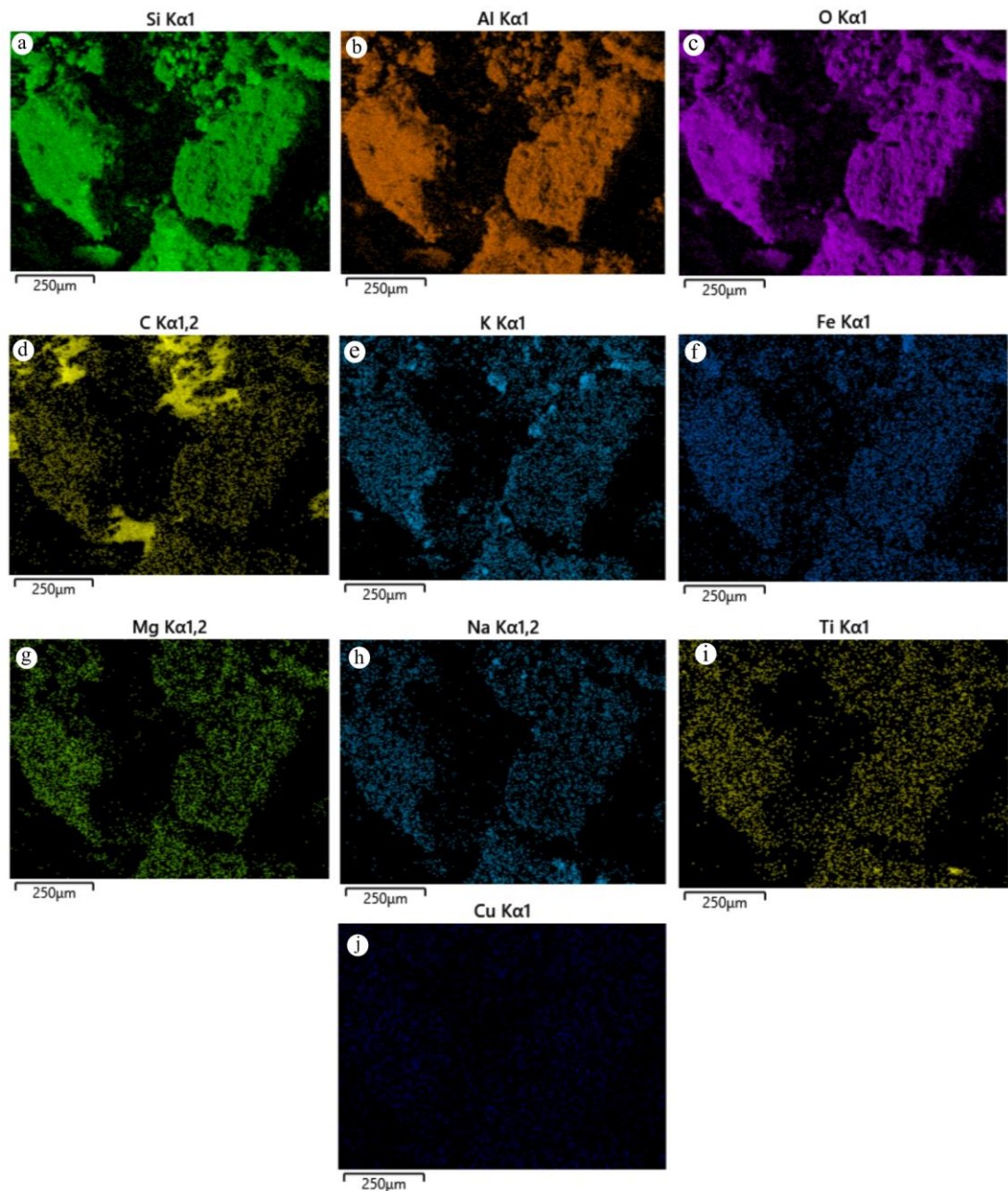


Figura 15. Mapas por elementos. Obtenidos a partir del detector por espectroscopia por energía dispersiva (EDS). a) Silicio (Si), b) Aluminio (Al), c) Oxígeno (O), d) Carbono (C), e) Potasio (K), f) Hierro (Fe), g) Magnesio (Mg), h) Sodio(Na), i) Titanio (Ti) y j) Cobre (Cu).

5.2.2. Muestra Cant 2

La muestra Cant 2 ha sido extraída de la zona donde el perfil de meteorización presenta una coloración más blanquecina y un sistema de fracturas ortogonales a subortogonales, compuesto por discontinuidades verticales, subverticales y subhorizontales (Figura 16). Estas fracturas delimitan bloques con geometría aproximadamente paralelepípedica, cuyos bordes tienden a redondearse progresivamente debido al ingreso del agua meteórica por las fracturas, dando lugar al desarrollo de *corestones*. A diferencia de Cant 1, el saprolito se encuentra más alterado, por lo que las fracturas se observan parcialmente difusas debido al mayor grado de meteorización química profunda.



Figura 16. Zona de muestreo de la Cant 2. Se visualiza el sistema de fracturas bordeando los *corestones*, formando paralelepípedos (marcados con líneas discontinuas rojas).

Fuente: Fotografía Propia, 2026.

Se observan poco desarrollados *corestones* delimitados por un sistema de fracturas subhorizontales y verticales (Figura 17). La roca conserva mayor cohesión respecto al material alterado circundante, aunque presenta bordes suavizados por meteorización química diferencial. Esta morfología evidencia el avance de la meteorización a través de las discontinuidades, favoreciendo la individualización progresiva de bloques dentro del *saprock*.

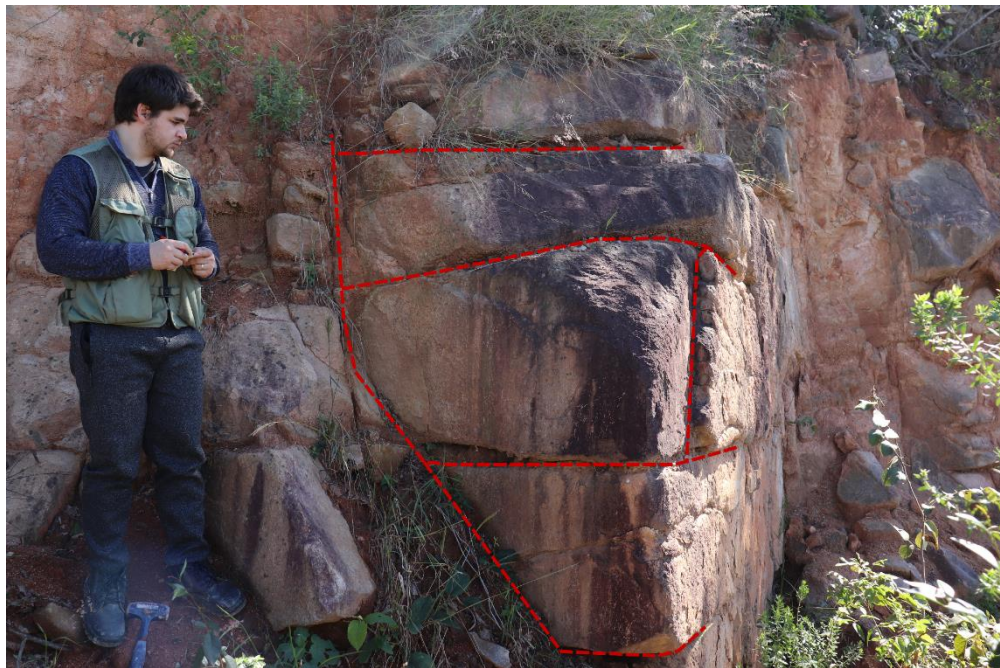


Figura 17. Fotografía de *corestones*, delimitado por fracturas ortogonales, marcadas con líneas discontinuas rojas.

Fuente: Fotografía Propia, 2026.

En el difractograma de esta muestra Cant 2 (Figura 18) se identifican tres fases cristalinas predominantes. En primer lugar, se reconocen picos asociados al cuarzo, seguidos por picos correspondientes al feldespato potásico, ambos interpretados como minerales primarios de la roca. Finalmente, se registran picos atribuibles a la caolinita, considerada un neomineral formado durante la meteorización química.

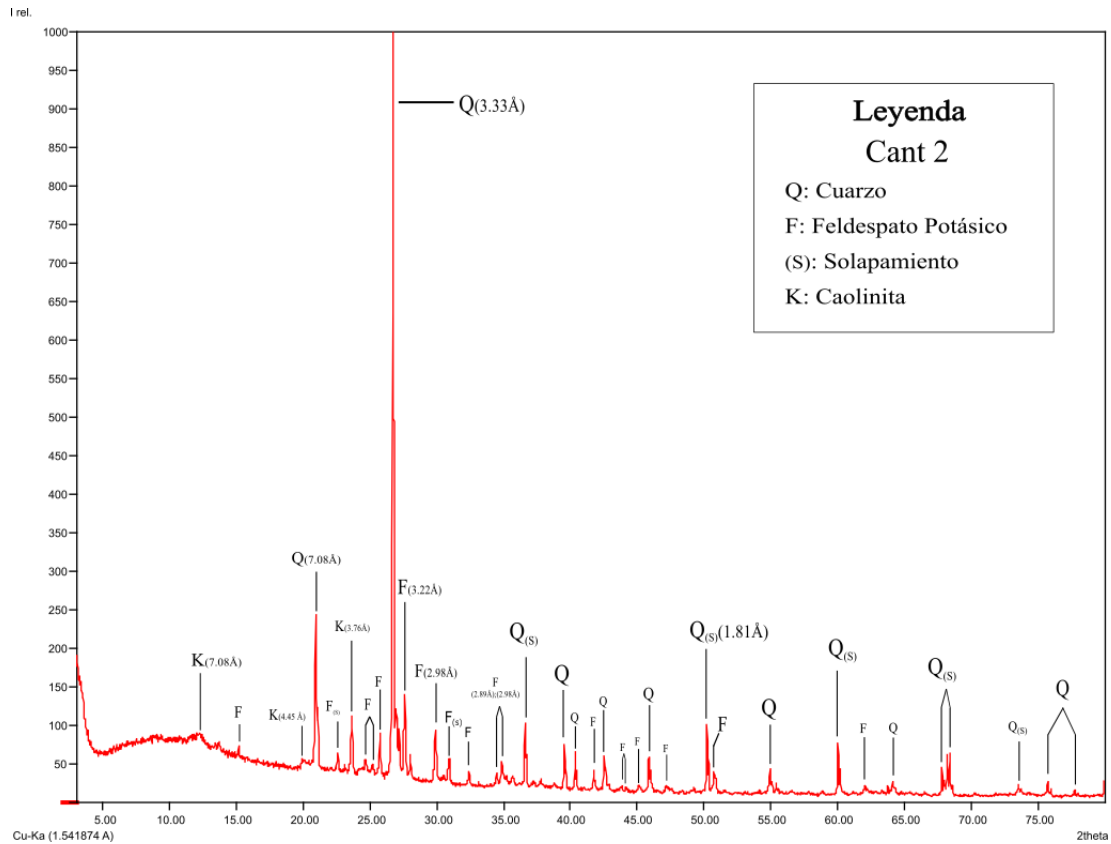


Figura 18. Difractograma de la muestra Cant 2, señalando la posición de los minerales primarios cuarzo (Q), feldespato potásico (F). Además, se señalan los picos correspondientes a neo minerales de caolinita (K), mientras que la letra “S” que se encuentra entre paréntesis, simboliza la superposición de picos.

El análisis micromorfológico mediante microscopía electrónica de barrido (Figura 19) revela la presencia de cristales bien desarrollados con morfologías características de la caolinita. En dicha figura se observan agregados laminares apilados del tipo “libro”, rasgo típico de este mineral y consistente con los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X.

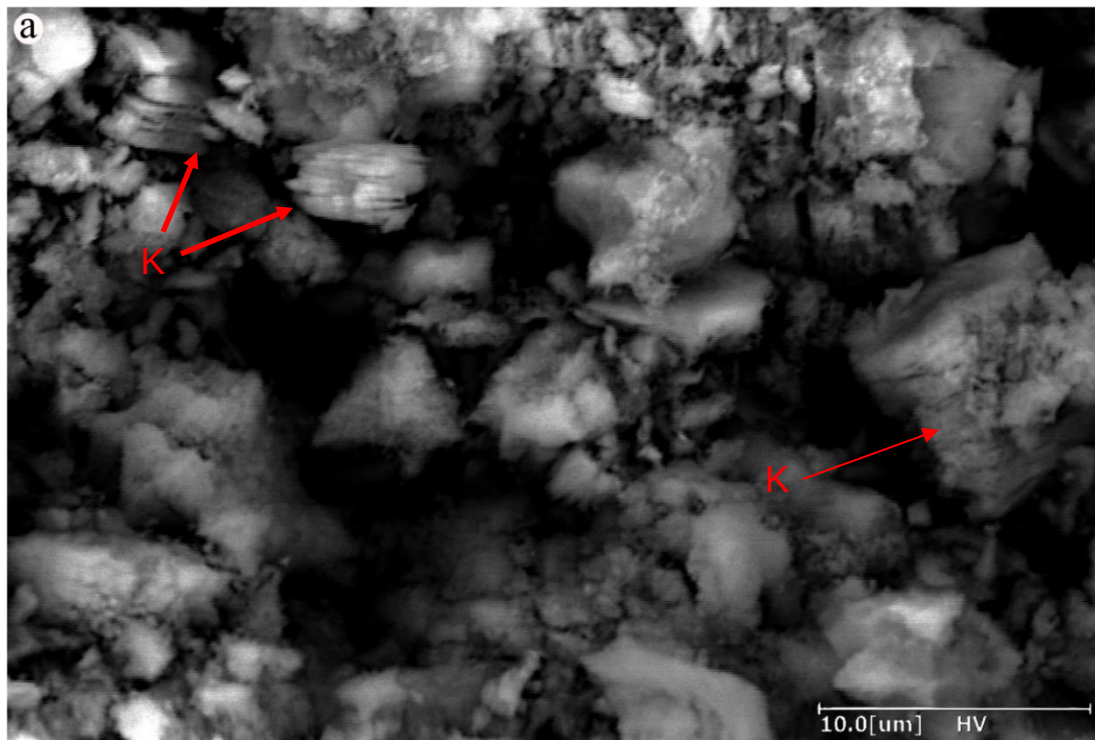


Figura 19. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 2, se observan Caolinitas (K) neoformadas agrupadas en forma de “acordeones” o “libros”.

La caracterización semicuantitativa mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) permitió realizar un barrido elemental (Figura 20) lo cual permitió identificar O, Si, Al, K y Fe como los principales elementos presentes en la muestra Cant 2. El espectro obtenido (Figura 21) muestra contenidos predominantes de O (58,8 %), Si (23,9 %) y Al (13,6 %), acompañados por menores proporciones de K (2,4 %) y Fe (1,3 %).

Los mapas de distribución elemental (Figura 22) evidencian concentraciones relativamente homogéneas de O, Al y Si en el área analizada (Imágenes b, c y d, Figura 22). En contraste, el C muestra concentraciones localizadas o anómalas (Imagen a, Figura 22). Por su parte, el K presenta en menor proporción respecto a los elementos mayoritarios. A diferencia de Cant 1, no se detectan Na, Mg, Ti ni Cu en el área analizada, lo que indica una composición elemental más restringida en la muestra Cant 2.

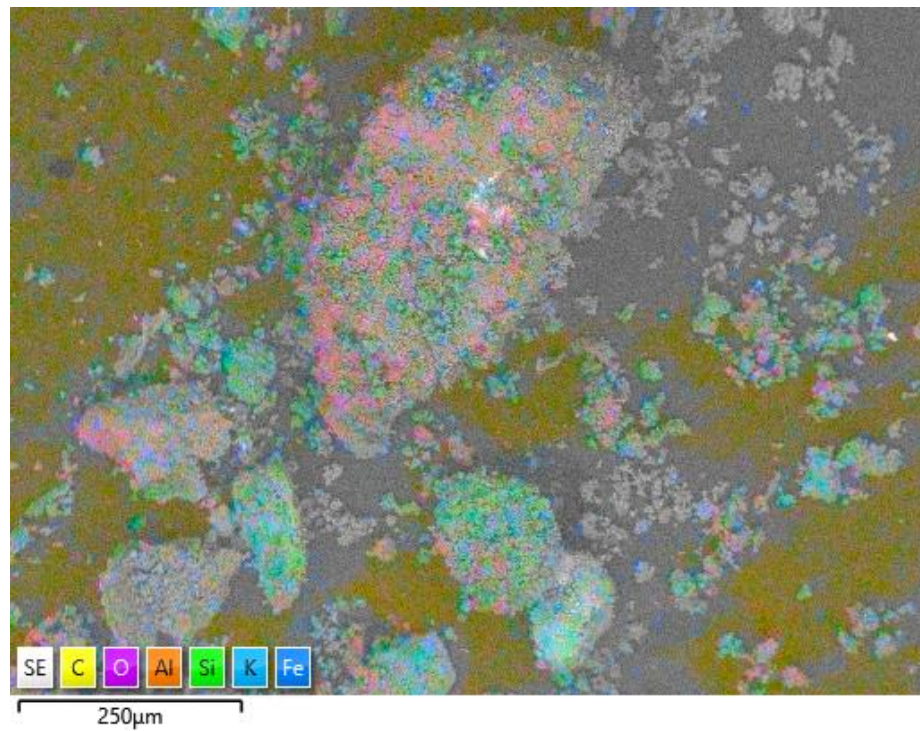


Figura 20. Mapa elemental de la muestra Cant 2. Las diferencias en los colores se corresponden con elementos caracterizados en la muestra, el color azul representa el potasio (K), el amarillo carbono (C), el verde silicio (Si), el naranja aluminio (Al), el azul hierro (Fe) y el fuxia oxígeno (O).

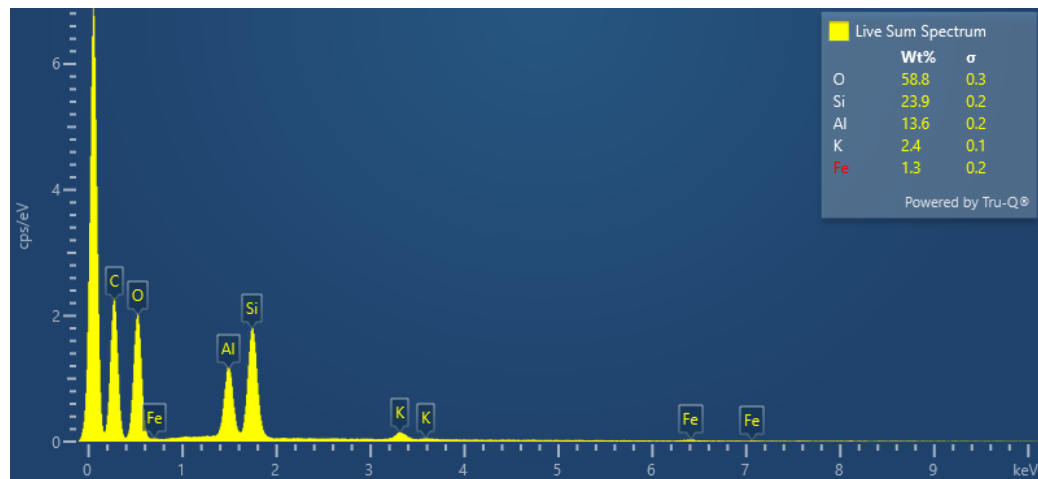


Figura 21. Espectrograma del EDS donde se observa una caracterización cualitativa de los elementos mayoritarios y una semicuantificación de los elementos: O, Si, Al, Fe, K.

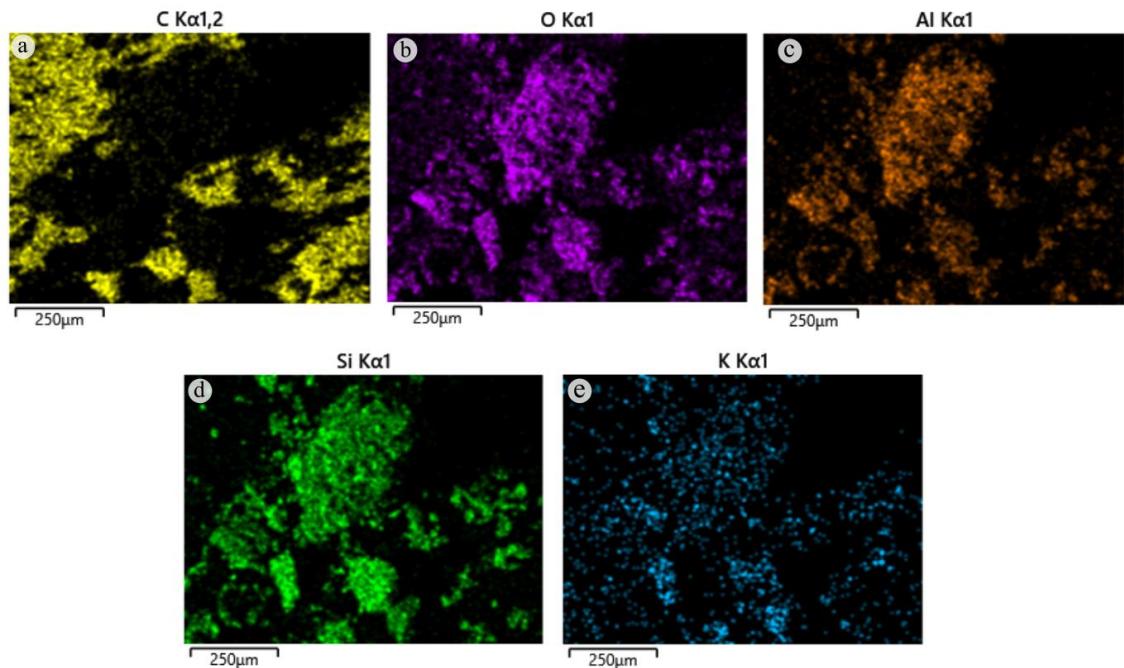


Figura 22. Mapas por elementos. Obtenidos a partir del detector por espectroscopia por energía dispersiva (EDS). a) Carbono (C), b) Oxígeno (O), c) Aluminio (Al), d) Silicio (Si), e) Potasio (K).

5.2.3. Muestra Cant 3

La muestra Cant 3 ha sido extraída de la zona donde el perfil de meteorización presenta un color más rojizo, donde los *corestone* de mayor tamaño, de morfología subredondeada a subangulosas (Figura 23), algunos sueltos debido a su tamaño y cohesión con respecto al saprolito que lo rodea. Algunos *corestones* presentan morfologías bien redondeadas y con una costra de color pardo rojizo, rica en óxidos de hierro (Figura 24). Está cubierta puede interpretarse como una *ferricreta* o duricostra.

El incremento en la redondez y abundancia de *corestones*, sumado a la disminución en la visibilidad del sistema de fracturas, evidencia un mayor grado de alteración en comparación con Cant 2.



Figura 23. Zona de muestreo de la Cant 3. Se observan corestones marcados con líneas discontinuas rojas.

Fuente: Fotografía propia, 2026.



Figura 24. Corestones con costras de alteración ferruginosa (*ferricreta*) marcados con líneas discontinuas rojas.

Fuente: Fotografía propia, 2026.

En el difractograma de esta muestra Cant 3 (Figura 25) se identifican cuatro fases cristalinas predominantes. En primer lugar, se reconocen picos asociados al

La presencia de caolinita observada en las microfotografías es concordante con los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X. En cambio, la posible esmectita debe considerarse como una interpretación morfológica complementaria, debido a que su identificación se basa principalmente en el hábito observado al MEB. Estas características indican un mayor desarrollo de minerales secundarios en la muestra Cant 3, vinculados a los procesos de meteorización química que afectan al material original.

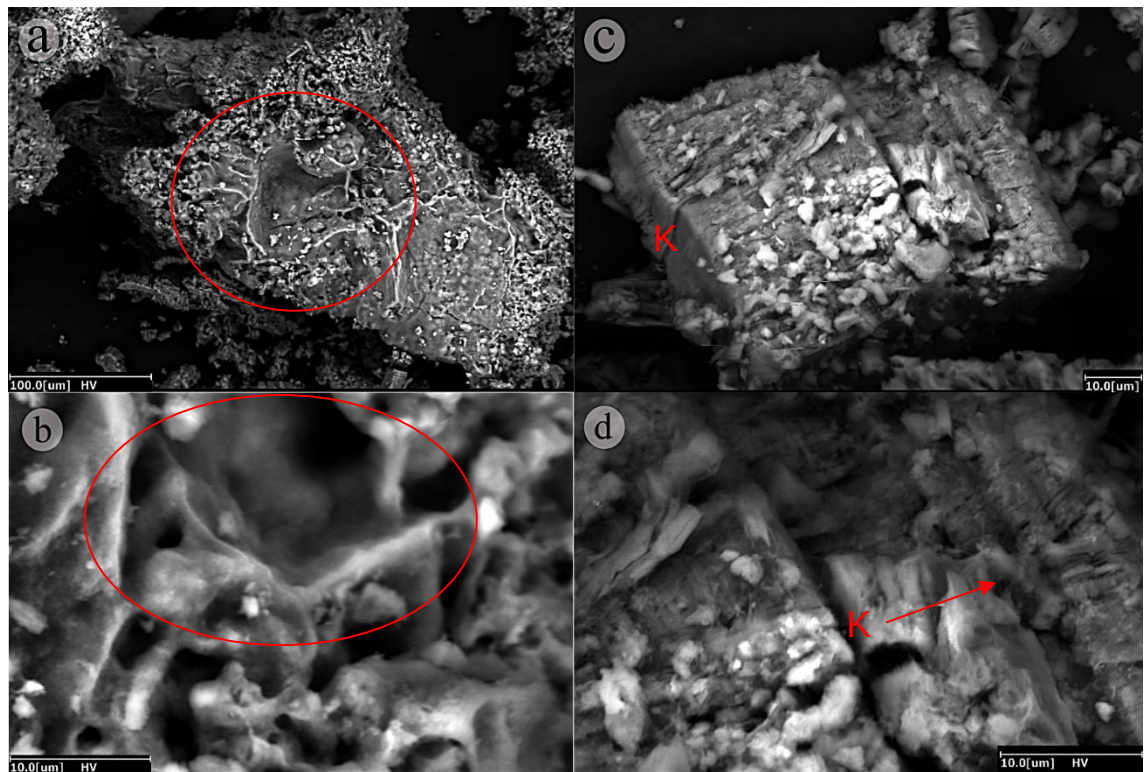


Figura 26. Microfotografía electrónica de barrido de la muestra Cant 3 que muestran esmectita con estructura tipo panal (*honeycomb*) en la imagen a y b, y caolinita (K) con morfología tipo “libro” en la imagen c y d, caracterizada por agregados laminares apilados.

La caracterización semicuantitativa mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) permitió realizar un barrido elemental (Figura 27) identificando la presencia de O, Si, Al, Fe, K y C en la muestra. El espectrograma (Figura 29) muestra que los elementos predominantes son O (57,4%), Si (21,8%) y Al (17,1%), seguidos por Fe (2,8%) y K (1,0%).

Los mapas de distribución elemental presentados en la figura 24 evidencian concentraciones relativamente homogéneas de O, Al y Si en el área analizada (Figura

28 b, c y d). Por su parte, el Fe y el K, se presentan en menor proporción respecto a los elementos mayoritarios, con una distribución más localizada (Imágenes e y f, Figura 28) y el C se observa de forma localizada en el mapa elemental (Imagen a, Figura 28).

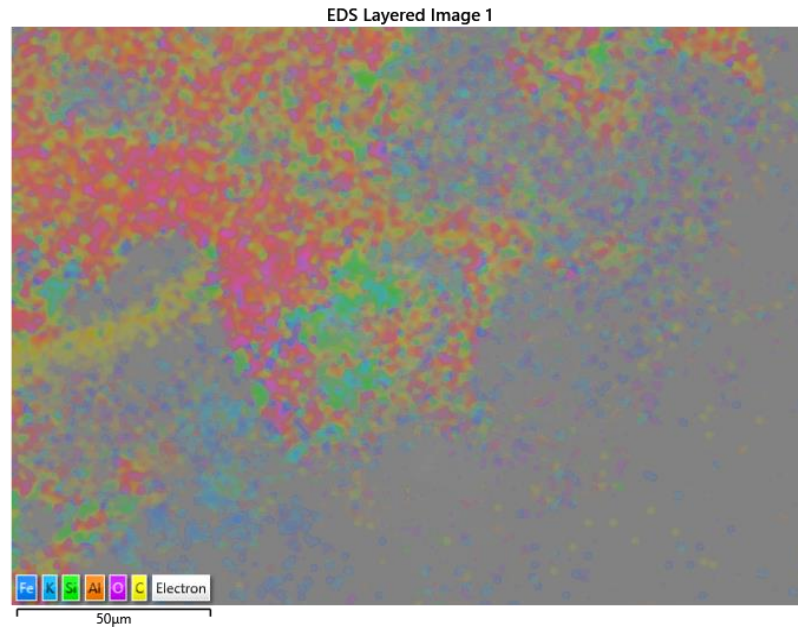


Figura 27. Mapa elemental de la muestra Cant 3. Las diferencias en los colores se corresponden con elementos caracterizados en la muestra, el color azul representa el Potasio (K), el amarillo Carbono (C), el verde Silicio (Si), el naranja Aluminio (Al) y el fuxia Oxígeno (O).

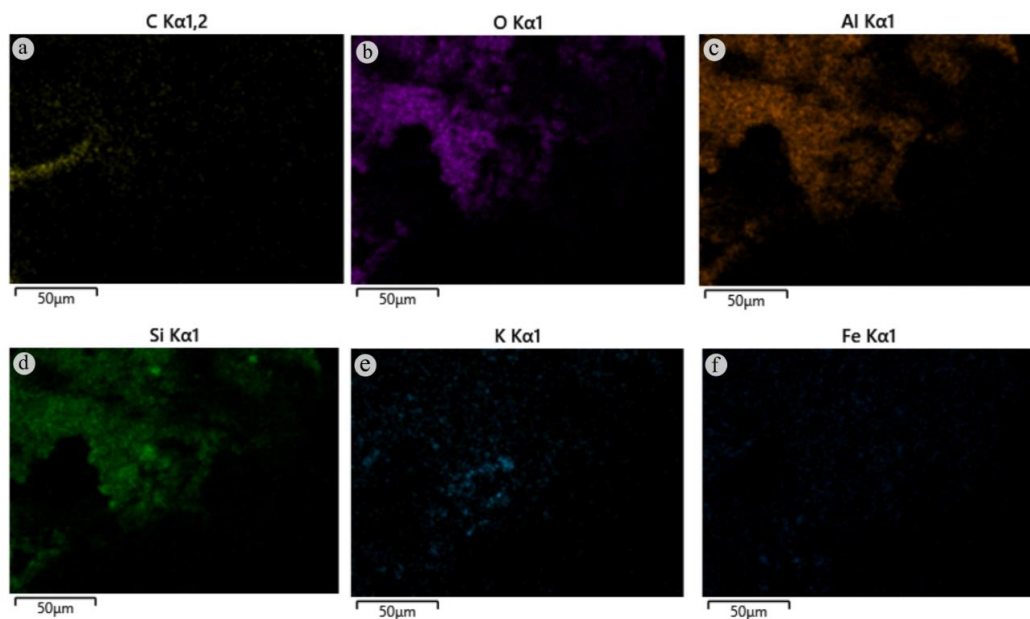


Figura 28. Mapas por elementos. Obtenidos a partir del detector por espectroscopia por energía dispersiva (EDS). a) Carbono (C), b) Oxígeno (O), c) Aluminio (Al), d) Silicio (Si), e) Potasio (K), f) Hierro (Fe).

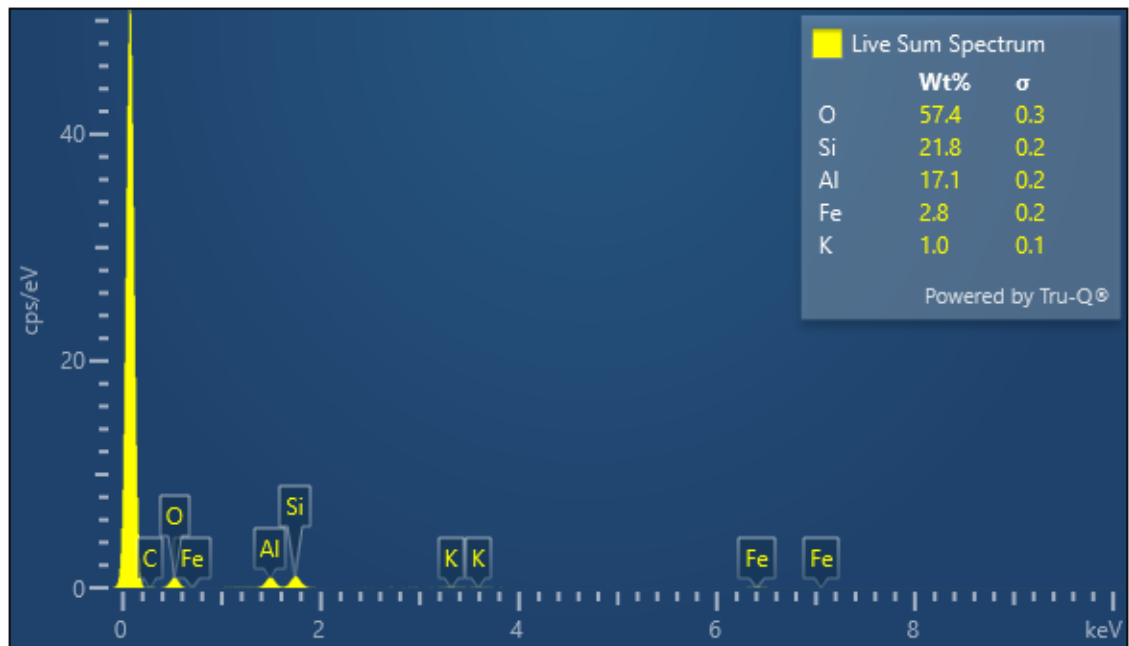


Figura 29. Espectrograma del EDS donde se observa una caracterización cualitativa de los elementos mayoritarios y una semicuantificación de los elementos: O, Si, Al, Fe, K.

5.2.4. Muestra Cant 4

La muestra Cant 4 ha sido extraída de la zona donde el perfil de meteorización presenta un color más blanquecino y con una cohesión menor con respecto a Cant 3 (Figura 30). Además, los *corestone* de varios tamaños, subredondeados a bien redondeados. Algunos sueltos debido a su tamaño y cohesión con respecto al saprolito que lo rodeaba.



Figura 30. Zona de muestreo de la Cant 4. Se observan *corestones* (bordeadas en formas ovaladas con líneas discontinuas rojas) y fracturas que los rodean (marcados con líneas discontinuas rojas).

Fuente: Fotografía propia, 2026.

En el difractograma de esta muestra Cant 4 (Figura 31) se identifican tres fases cristalinas predominantes. En primer lugar, se reconocen picos asociados al cuarzo, seguidos por picos correspondientes al feldespato potásico, ambos interpretados como minerales primarios de la roca. Finalmente, se registran picos atribuibles a la caolinita, considerada un neomineral formado durante la meteorización química.

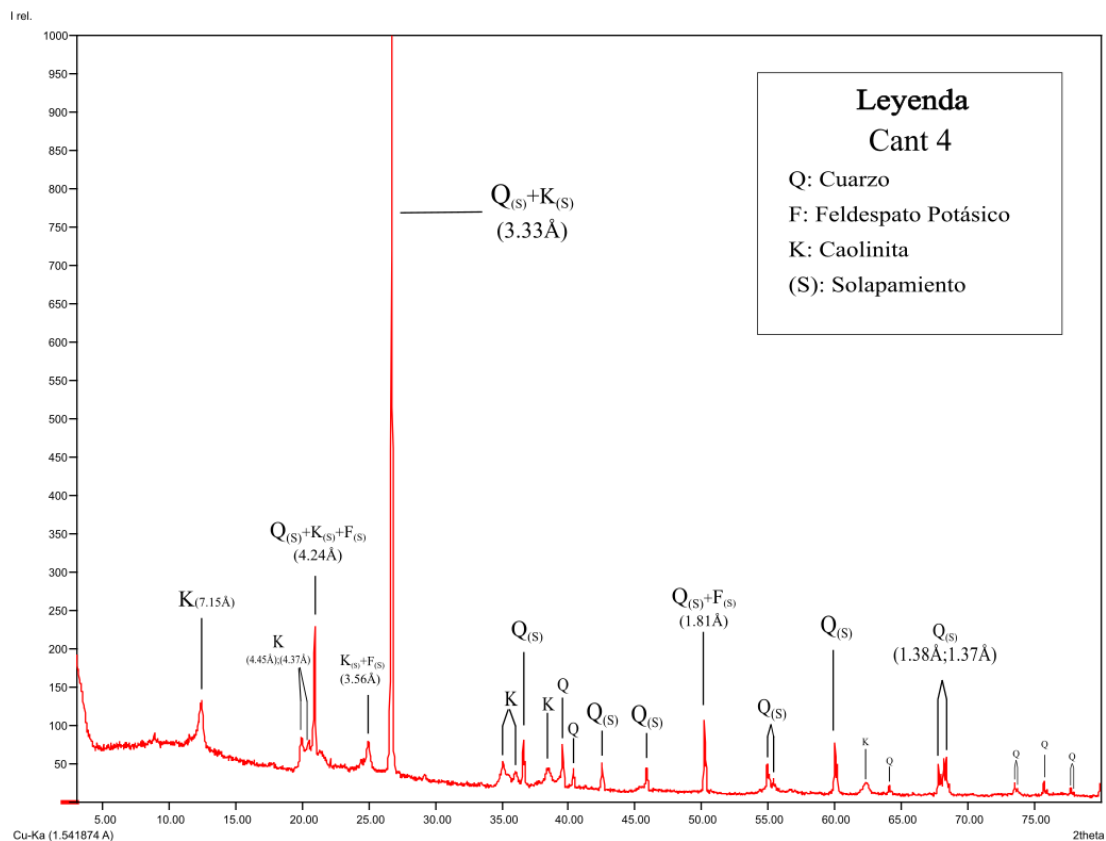


Figura 31. Difractograma de la muestra Cant 4, señalando la posición de los minerales primarios cuarzo(Q), feldespato potásico(F). Además, se señalan los picos correspondientes a neo minerales de caolinita (K), mientras que la letra “S” que se encuentra entre paréntesis, simboliza la superposición de picos.

5.2.5. Muestra Cant 5

La muestra Cant 5 ha sido extraída de la zona donde el perfil de meteorización presenta un material muy fino, blanquecino, arcilloso “caolín” (Figura 32 y 33). Dicho material se encuentra rodeado de variedades de *corestones*. Además, se observa en la zona inferior del perfil algunas fracturas ortogonales a subortogonales, constituido por discontinuidades verticales, subverticales y subhorizontales, formando bloques de geometría aproximadamente paralelepípedica (Figura 34 y 35).



Figura 32. Zona de muestreo de la Cant 5. Material blanquecino, “caolín” (marcado con líneas discontinuas rojas).

Fuente: Fotografía propia, 2026.



Figura 33. Vista general del Caolín identificado en Cant 5.

Fuente. Fotografía propia, 2026.



Figura 34. Caolín (A) junto con *corestones* subangulosos poco desarrollados, bordeados por fracturas ortogonales, formando paralelepípedos (marcadas con líneas discontinuas rojas), a su vez *corestones* subredondeados redondeados en la parte superior derecha.
Fuente: Fotografía propia, 2026.



Figura 35. Fracturas ortogonales formando paralelepípedos en la roca madre (marcadas con líneas discontinuas rojas).
Fuente. Fotografía propia 2026.

En el difractograma de esta muestra (Figura 36) se identifican dos fases cristalinas predominantes. En primer lugar, se reconocen picos asociados al cuarzo, interpretado como mineral primario de la roca. Finalmente, se observan picos atribuibles a la caolinita, considerada un neomineral formado durante la meteorización química. Esto evidencia que Cant 5 corresponde al material con mayor grado de alteración, donde los minerales primarios fueron transformados en neominerales del grupo de las arcillas, principalmente caolín. Esta interpretación coincide con lo observado in situ durante el trabajo de campo.

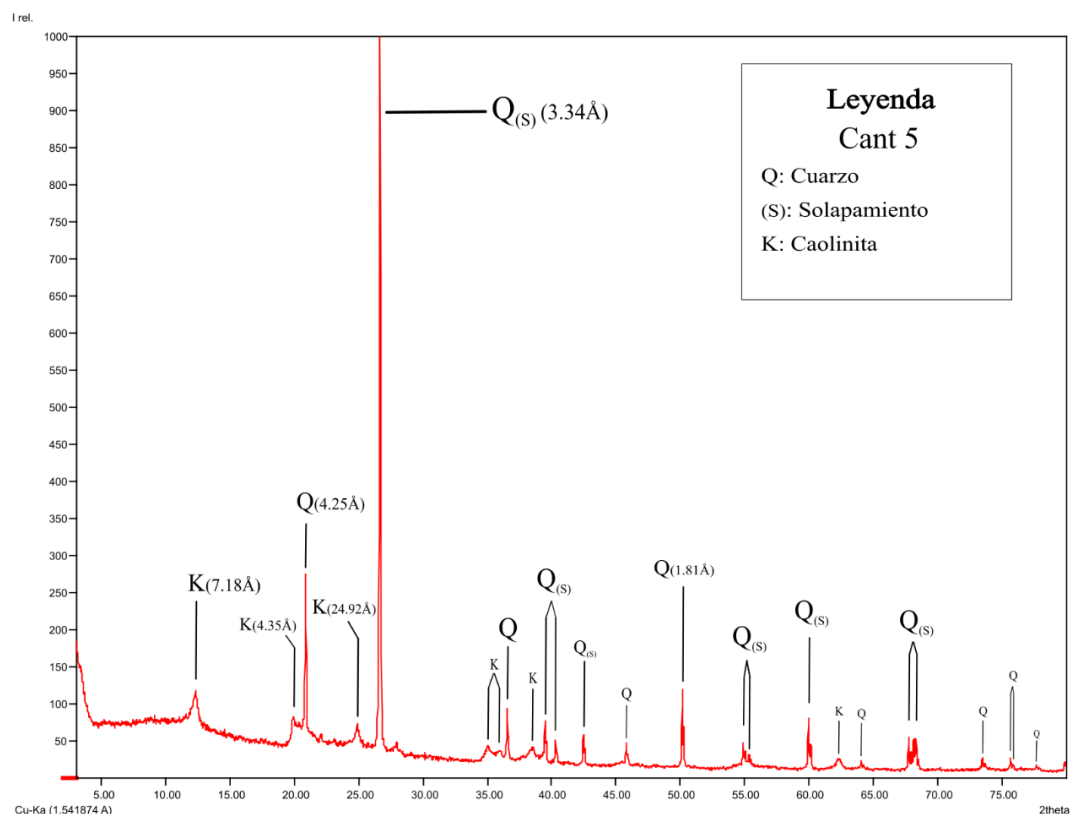


Figura 36. Difractograma de la muestra Cant 5, señalando la posición de los minerales primarios cuarzo (Q). Además, se señalan los picos correspondientes a neo minerales de caolinita (K), mientras que la letra “S” que se encuentra entre paréntesis, simboliza la superposición de picos.

5.3. Distribución del sistema de fracturamiento

Para determinar la configuración estructural de las ignimbritas, se procedió con la medición de más de 120 direcciones preferenciales de las fracturas principales en el frente de cantera, específicamente en aquellos sectores donde la meteorización no fue lo suficientemente intensa como para borrar los rasgos estructurales.

Se logró determinar 3 direcciones preferenciales de fracturamiento subverticales ($D1 \neq D2 \neq D3$), cuya representación se observa en el diagrama de la roseta de los vientos (Figura 38). El sistema de fractura principal es la D1 (305°), con dirección al NW y se corresponde con la de mayor intensidad y frecuencia, en ocasiones con espaciados de fracturamiento paralelo que superen el metro de longitud y en ocasiones, con intensidades alrededor de los 10 cm de longitud. La D1 es cortada por la D3 (25°) con dirección muy cercana al NNE y corresponde con el segundo sistema de fractura dentro del orden de importancia.

El sistema de fractura D3 presenta intensidades relativas en comparación de la D1, pudiendo variar entre los 1 o más metros por fractura, hasta sectores con alrededor de los 20 cm de espaciado entre fracturas paralelas. Posteriormente, D1 y D3 son cortados cuasi perpendicularmente por la D2 (275°), que presenta una dirección muy cercana al E-W. Este último sistema es muy poco visible y presenta intensidades muy bajas, presentando la menor frecuencia de los 3.

El análisis de la configuración estructural muestra una mayor frecuencia acumulada en la D1, por esta razón la representación gráfica presenta mayor magnitud, mientras que la D3 y D2 se registraron con menor frecuencia.

Por un lado y con relación a las zonas de ubicación de las muestras Cant, se comprobó que la distribución está controlada principalmente por las fracturas D1 y D3, siendo la muestra Cant 5 ubicada por sobre las fracturas D3. Por el otro lado y con relación a la distribución de los *corestones*, el desarrollo de estas geoformas se encuentra controlado por los sistemas D1 y D3, los cuales configuran un sistema ortogonal. Considerado en las bibliografías especializadas como el sistema precursor para el desarrollo de las geoformas y del perfil de meteorización.

Por último, el sistema de fractura ortogonal configurado por el sistema D1 y D3, termina por conjugarse con un sistema de fractura subhorizontal D4 (Figura 37), que presenta espaciados muy variados, en ocasiones en el orden de pocos centímetros y en otras, superando 1 metro de espesor. Este último actuó como limitante

subhorizontal de las geoformas desarrolladas dentro del perfil de meteorización. Por lo tanto, el tamaño de los corestones presentó un control secundario asociado al sistema de fractura subhorizontal D4.

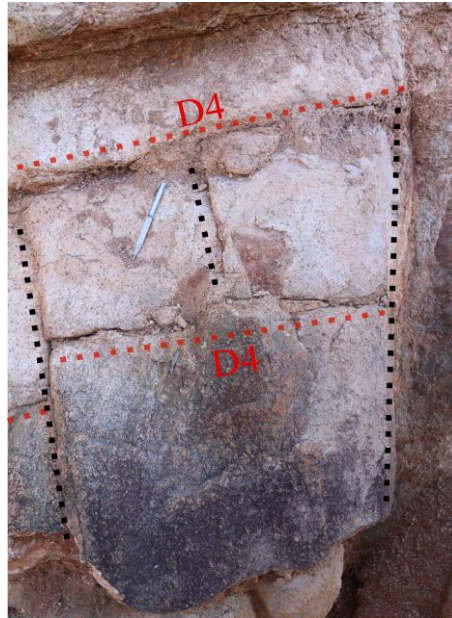


Figura 37. Fracturas subhorizontales (D4) y subverticales.

Fuente. Elaboración propia, 2026.

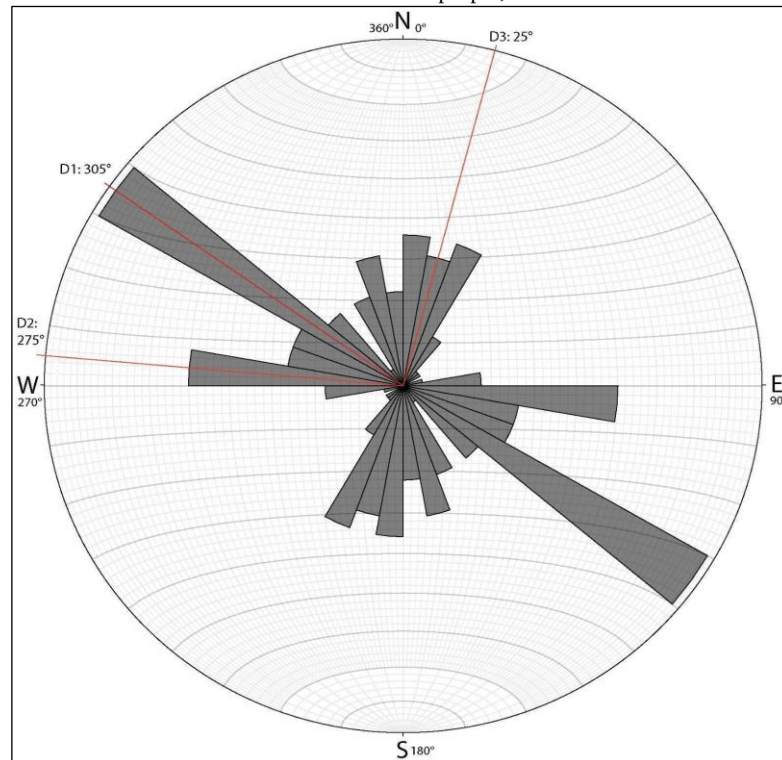


Figura 38. Diagrama de rosa de las orientaciones de las fracturas principales, medidas en el frente de cantera. La distribución evidencia direcciones preferenciales (D1, D2 y D3).

Fuente. Elaboración propia, 2026.

6. DISCUSIÓN

La discusión se organiza en base a tres consideraciones. La primera se vincula con el desarrollo del perfil de meteorización. La segunda se relaciona con la distribución del sistema de diaclasas. La tercera aborda la geomorfología del área de estudio, articulada con una interpretación de la sucesión de eventos geomorfológicos sustentada en la bibliografía, aspecto que permite establecer correlaciones de eventos e inferir las probables edades de los procesos.

El perfil de meteorización de la cantera CONTEC se desarrolló sobre una ignimbrita de grado moderado a alto de soldamiento, inferidos a partir del comportamiento reomórfico y evidenciado en los *fiammes* de las muestras. En el perfil que presenta un espesor mínimo de 6 m, se identificaron tres partes: frente de meteorización, *saprock* y saprolito. Estas partes se reconocieron a partir de las características geomorfológicas visibles y se compararon con la bibliografía para confirmar su correspondencia morfológica (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Migoñ, 2006).

Los perfiles de meteorización generalmente presentan una coherencia vertical, el equivalente menos alterado se ubica en el frente de meteorización a mayor profundidad, mientras que la muestra con mayor grado de alteración se localiza en la parte más alta del perfil a menor profundidad. El sistema de fracturas actúa como el mecanismo detonador del proceso, debido a que las aguas meteóricas ingresan en la roca a partir de estos planos de discontinuidades (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Ehlen, 2005; Migoñ, 2006).

En nuestro ejemplo, el perfil de meteorización de la cantera CONTEC presenta una distribución de sus partes: saprock y saprolita, de forma lateral (Figura 33). Para explicar esta diferenciación en la disposición lateral de las partes, es necesario tomar en consideración el proceso de meteorización supergénica y sus diferentes estadios evolutivos (Figura 34).



Figura 39. Aerofotografía del perfil de meteorización, señalando en un recuadro rojo su distribución lateral.

Fuente: Aerofotografía propia, 2026.

Los perfiles de meteorización y sus geoformas asociadas se desarrollaron en dos estadios evolutivos del paisaje (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Migoñ, 2006), la primera edad del proceso es determinado por el lapso temporal en el cual la meteorización química generó los neominerales y el perfil, mientras que la segunda edad está determinada por el lapso temporal donde se produjo el proceso de erosión de la saprolita y la exhumación geoformas mayores y menores en la superficie (Figura 40).

El proceso supergénico se inicia en los sectores donde el sistema de fracturas permite el ingreso del agua meteórica. En los sectores con mayor intensidad de fracturamiento, la meteorización avanza con mayor eficacia a lo largo del tiempo geológico (Figura 40). Este comportamiento genera zonas con alteritas blanquecinas mejor desarrolladas, asociadas a sectores donde el fracturamiento fue más eficiente, mientras que en los sectores con fracturamiento menos efectivo se desarrollan alteritas rojizas a amarillentas.

En este contexto se ubica el perfil de meteorización de la cantera CONTEC. Se verificó que Cant 5, correspondiente con la muestra de mayor grado de alteración según las observaciones de campo y los resultados por XRD y MEB, se localiza en concordancia con el sistema de fracturas D1, específicamente donde la intensidad de fracturamiento fue mayor (Figura 28). Las demás muestras (Cant 1, Cant 2, Cant 3 y Cant 4) se distribuyen en sectores laterales donde el sistema de fracturas D3 no presentó suficiente eficacia durante el tiempo en que ingresó el agua meteórica.

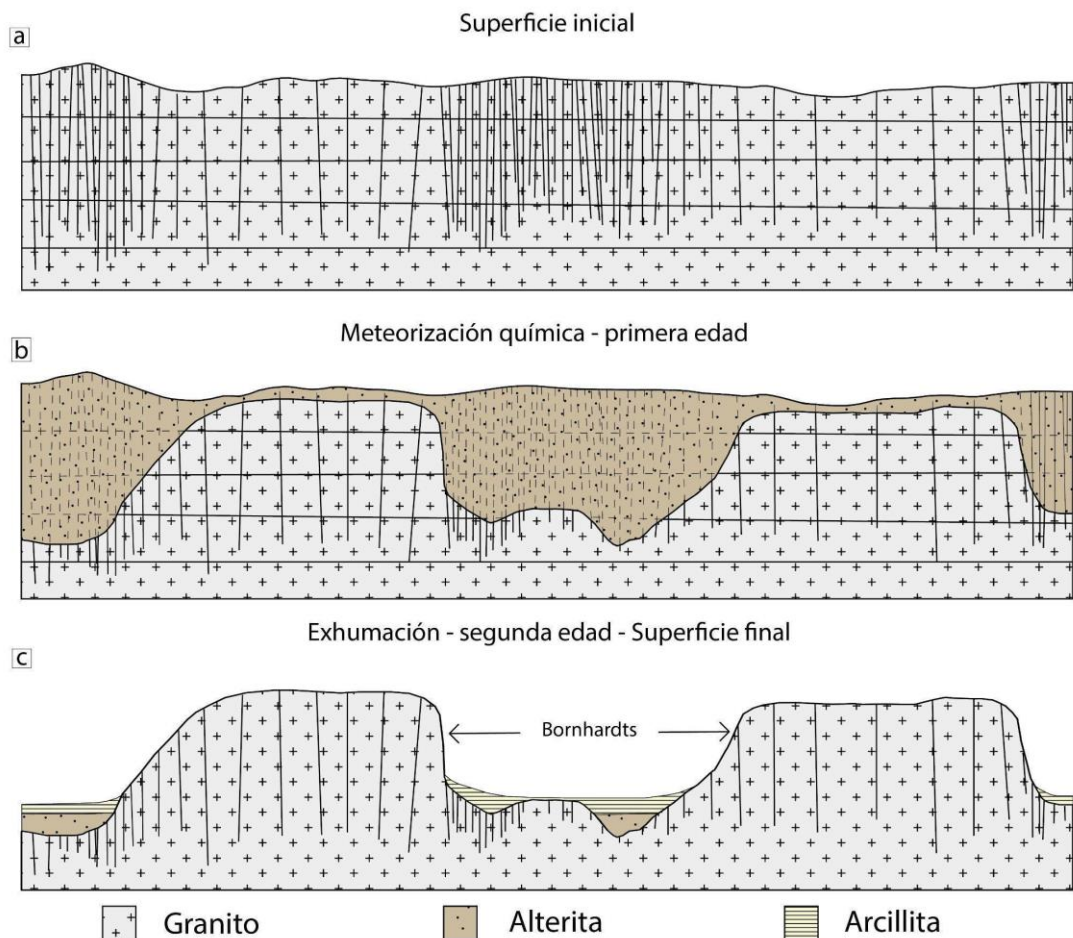


Figura 40. Diagrama de formación del proceso de formación de Bornhardts.

Fuente: Extraído y adaptado de (Twidale, 1982)

Desde el punto de vista geomorfológico y de la sucesión de eventos a lo largo del tiempo geológico, la Suite Magmática Caapucú, posterior a su emplazamiento en el Ediacárico, fue afectada por procesos de meteorización química que generaron neominerales. Estos materiales fueron erosionados y posteriormente incorporados como una unidad sedimentaria en el Silúrico (Montana, 1997).

Las arcillas fosilíferas del Silúrico mantienen una relación isotópica coherente con el basamento granítico-riolítico de la Suite Magmática Caapucú, debido a que ambas unidades comparten un origen común y una evolución posterior vinculada a procesos de alteración química a baja temperatura (Montana, 1996). El estudio isotópico de Montana (1996), indica que las arcillas silúricas derivan de la Suite Magmática Caapucú, aunque muestran señales de reequilibración asociadas a fluidos meteóricos durante etapas tardías, lo que confirma que los sedimentos conservan la firma del granito original, modificada por procesos diagenéticos posteriores.

Las observaciones isotópicas de Montana (1996), revelan de forma indirecta que la Suite Magmática Caapucú, fue afectada luego de su emplazamiento, por procesos de meteorización química profunda y posterior exhumación al menos parcial del frente de meteorización. Es decir, se meteorizó y se erosionó entre el Ediacárico del Neoproterozoico y el Llandoveryano del Silúrico Inferior.

Posteriormente, entre el Cretácico Inferior al Paleógeno, al menos la parte central del Paraguay Oriental fue afectado por procesos de meteorización química en condiciones climáticas de mucha humedad y temperatura (climas hiper-tropicales), este proceso desarrolló un gran número de *etchforms* tanto en los granitos de la Suite Magmática Caapucú (Rabassa, 2014; Colman *et al.*, 2018, 2019) así como una gran cantidad y diversidad de *etchforms* mayores y menores en areniscas paleozoicas y mesozoicas (Rabassa *et al.*, 2021; Colman *et al.*, 2022, 2025). La edad de dicho proceso morfogenético en Sudamérica se encuentra ampliamente documentada por Rabassa y Ollier (2014).

El perfil de meteorización química de la cantera CONTEC, basado en la mencionado previamente se desarrolló sobre un *bornhardt*, una *etchform* mayor ampliamente representada en la superficie de la Suite Magmática Caapucú. Esta observación aporta información relevante sobre el proceso morfogenético del área, ya que el perfil analizado representa estadios incipientes del desarrollo. Esto sugiere que, tras la meteorización química profunda reconocida en el Paraguay Oriental durante el Cretácico Inferior al Paleógeno y la posterior exhumación del frente de meteorización (Colman *et al.*, 2018, 2019, 2022; 2025; Rabassa *et al.*, 2021), el proceso morfogenético continuó actuando sobre geoformas previamente grabadas y exhumadas, evolucionando hacia condiciones supergénicas actuales más localizadas.

7. CONCLUSIÓN

El perfil de meteorización química aflorante en la cantera CONTEC alcanza al menos 6 m de espesor y presenta una organización lateral de sus unidades principales (frente de meteorización, saprock y saprolita), controlada por un sistema de diaclasas subverticales que favorece la infiltración profunda de agua meteórica. La disposición lateral de los distintos grados de alteración contrasta con los modelos verticales clásicos, evidenciando un estadio incipiente del proceso de meteorización.

La secuencia desde Cant 1 hasta Cant 5 evidencia un proceso progresivo y continuo de meteorización, en el que Cant 1 conserva predominantemente minerales primarios, mientras que Cant 5 presenta abundante caolinita como neomineral, acompañada de cuarzo.

El desarrollo del perfil de meteorización sobre un bornhardt de la Suite Magmática Caapucú sugiere que la meteorización química profunda actuó sobre una etchform preexistente, afectando geoformas previamente grabadas y posteriormente exhumadas.

La evidencia geológica y geomorfológica permite inferir que el perfil estudiado representa estadios incipientes dentro de un proceso morfogenético prolongado, compatible con los modelos regionales que proponen episodios de meteorización profunda durante el Cretácico Inferior–Paleógeno y su posterior evolución bajo condiciones supergénicas más localizadas.

En conjunto, el perfil de meteorización de la cantera CONTEC constituye un ejemplo de desarrollo lateral de la meteorización profunda. Su interpretación geomorfológica aporta nuevos elementos para comprender la evolución y la dinámica de los perfiles de alteración del Paraguay Oriental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bartolomé, J. F. (1997). El caolín: Composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(1), 7–19.
<https://es.scribd.com/document/270723279/caolin>
- Colman, C. F., Sarubbi-Jacks, Y., Martínez, O., Cubas, N., Aguilera, Y. E., Carignano, C., y Rabassa, J. (2022). Inventario de localidades con evidencias de paleosuperficies en Paraguay. En *VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*. San Juan, Argentina.
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/158199>
- Colman, C. F., Sarubbi-Jacks, Y., Martínez, O., Souberlich, R., y Rabassa, J. (2019). *Los granitos de Yagareté Cua: Una geomorfología singular como recurso geoturístico en el Paraguay Oriental*. En *V Simposio Brasileiro de Patrimônio Geológico*. Crato, Brasil. <https://n9.cl/gdfrz>
- Colman, C. F., Sarubbi-Jacks, Y., Souberlich, R., Vera, D., Bogarín, Y. R., Salinas, N., Martínez, O., y Rabassa, J. (2018). Caapucú: Una ciudad construida sobre un campo de núcleos de roca (*corestones*) en el Paraguay Oriental. En *VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*. Puerto Madryn, Argentina.
<https://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/3411>
- Colman, C. F., Martínez, O. A., Ladeira, F. S. B., Rabassa, J., Cubas, N., Aguilera, E. Y., Sarubbi Jacks, Y., Herrera, E. Z., Monteiro, M. M., y Sánchez, C. (2025). Geomorfología y paleosuperficies gondwánicas en el Paraguay central. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 77(3), A091025.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2025v77n3a091025>

- Cordani, U. G., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., Porto, R., Thomaz Filho, A., y Cunha, F. M. B. da. (1984). Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Série Ciência-Técnica-Petróleo*, 15, 1–70. <https://repositorio.usp.br/item/001464085>
- Cordani, U. G., Cubas, N., Sato, K., Nutman, A. P., Gonzales, M. E., y Presser, J. L. B. (2001). Geochronological constraints for the evolution of the metamorphic complex near the Tebicuary River, Southern Precambrian Region of Paraguay. En *III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica*. Pucón, Chile. <https://repositorio.usp.br/bitstream/f1e5d921-1be1-4678-b5fe-c2ec70a120f7/1390525.pdf>
- Cravero, F., Domínguez, E. A., y Murray, H. H. (1991). Valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD en caolinitas indicadoras de un clima templado-húmedo para el Jurásico superior-Cretácico inferior de la Patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 46(1–2), 20–25.
- Cubas, N., Garcete, A., Meinhold, K. D., Benítez, J. C., Figueredo, L., González, M. E., Burgaht, K. P., y Höhndorf, A. (1998). *Mapa geológico de la República del Paraguay, Hoja Villa Florida 5468, escala 1:100.000: Texto explicativo*. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales.
- Ehlen, J. (2005). Above the weathering front: Contrasting approaches to the study and classification of weathered mantle. *Geomorphology*, 67(1–2), 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.026>
- Eswaran, H., y Wong, C. B. (1978). A study of a deep weathering profile on granite in Peninsular Malaysia: I. Physico-chemical and micromorphological properties. *Soil*

Science Society of America Journal, 42(1), 144–149.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010032x>

Favetto, A., Rocha, V., Pomposiello, C., García, R., y Barcelona, H. (2015). A new limit for the NW Río de la Plata Craton border at about 24°S (Argentina) detected by magnetotellurics. *Geologica Acta*, 13(3), 243–254.

[https://revistes.ub.edu/index.php/GEOACTA/article/view/GeologicaActa2015.13.](https://revistes.ub.edu/index.php/GEOACTA/article/view/GeologicaActa2015.13.3.6)

[3.6](https://revistes.ub.edu/index.php/GEOACTA/article/view/GeologicaActa2015.13.3.6)

úlfaro, V. J. (1996). Geología del Paraguay Oriental. En P. Comin-Chiaramonti y C. B. Gomes (Eds.), *Alkaline magmatism in Central-Eastern Paraguay: Relationships with coeval magmatism in Brazil* (pp. 17–29). Edusp/Fapesp.

[https://www.geologiadelparaguay.com.py/Geolog%C3%ADa-del-Paraguay-](https://www.geologiadelparaguay.com.py/Geolog%C3%ADa-del-Paraguay-Oriental.pdf)

[Oriental.pdf](https://www.geologiadelparaguay.com.py/Geolog%C3%ADa-del-Paraguay-Oriental.pdf)

Hejl, E. (2005). A pictorial study of tafoni development from the 2nd millennium BC.

Geomorphology, 64(1–2), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.05.004>

Kanzler, A. (1987). The Southern Precambrian in Paraguay: Geological inventory and age relations. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 7/8, 753–765.

[https://www.geologiadelparaguay.com.py/The-Southern-Precambrian-in-](https://www.geologiadelparaguay.com.py/The-Southern-Precambrian-in-Paraguay-Kanzler.pdf)

[Paraguay-Kanzler.pdf](https://www.geologiadelparaguay.com.py/The-Southern-Precambrian-in-Paraguay-Kanzler.pdf)

Linton, D. L. (1955). The problem of tors. *The Geographical Journal*, 121(4), 470–

487. <https://doi.org/10.2307/1791756>

Mann, A. W., y Ollier, C. D. (1985). Chemical diffusion and ferricrete formation. En P. D. Jungerius (Ed.), *Soils and geomorphology (Catena Supplement, 6*, pp. 151–157). Catena Verlag.

- Mantovani, M. S. M., y Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303–315. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71137-0](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71137-0)
- Migoñ, P. (2006). *Granite landscapes of the world*. Oxford University Press.
- Migoñ, P. (2013). Weathering mantles and long-term landform evolution. En J. Shroder (Ed.), *Treatise on geomorphology* (pp. 127–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00071-3>
- Migoñ, P., y Lidmar-Bergström, K. (2001). Weathering mantles and their significance for geomorphological evolution of central and northern Europe since the Mesozoic. *Earth-Science Reviews*, 56(1–4), 285–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00068-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00068-X)
- Milani, E. J., y Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), 473–484. <https://ppegeo.igc.usp.br/portal/index.php/rbg/orogenias-paleozoicas-no-dominio-sulocidental-do-gondwana-e-os-ciclos-de-subsidencia-da-bacia-do-parana/>
- Montana, G., Comin-Chiaramonti, P., Censi, P., y Orué, D. (1996). Kaolinite deposits from central-eastern Paraguay. *Industrial Minerals*, 253, 63–71.
- Ollier, C. D. (1988). Deep weathering, groundwater and climate. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 70(4), 285–290. <https://doi.org/10.1080/04353676.1988.11880258>

- Ollier, C. D. (2010). Very deep weathering and related landslides. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 23(1), 5–14.
<https://doi.org/10.1144/EGSP23.2>
- Ollier, C. D. (2014). Some principles in the study of planation surfaces. En J. Rabassa, J., & Ollier (2014). *Paisajes de Gondwana en el sur de Sudamérica: Argentina, Uruguay y sur de Brasil*. (Springer, ciencias del sistema terrestre). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_4
- Padilha, A. L., Vitorello, Í., Antunes, C. E., y Pádua, M. B. (2015). Imaging three-dimensional crustal conductivity structures reflecting continental flood basalt effects hidden beneath thick intracratonic sedimentary basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7), 4702–4719.
<https://doi.org/10.1002/2014JB011657>
- Paradise, T. R. (2015). Tafoni and other rock basins. En *Reference module in Earth systems and environmental sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09570-1>
- Presser, J. L. B. (1992). *Geologia da Folha 5569-III La Colmena, Paraguai Oriental* [Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo.
https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-29092015-130943/publico/Presser_Mestrado.pdf
- Rabassa, J. (2014). Some concepts on Gondwana landscapes: Long-term landscape evolution, genesis, distribution and age. En J. Rabassa y C. D. Ollier (Eds.), *Gondwana landscapes in southern South America: Argentina, Uruguay and southern Brazil* (pp. 9–46). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_2

- Rabassa, J., Martínez, O. A., Colman, C. F., Ladeira, F. S. B., y Sarubbi Jacks, Y. (2021). The “Piedra Movediza” (“Rocking Stones”) of Tandil (Province of Buenos Aires, Argentina) and the “Piedras Equilibristas” (“Balancing Rocks”) of Paraguay and Brazil. En P. Bouza, J. Rabassa, y A. Bílnes (Eds.), *Advances in geomorphology and quaternary studies in Argentina*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8>
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Fanning, C. M., Baldo, E. G., González-Casado, J. M., Galindo, C., y Dahlquist, J. (2007). The Río de La Plata Craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth-Science Reviews*, 83(1–2), 49–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.03.004>
- Ross, C. S., y Kerr, P. F. (1931). *The kaolin minerals*. U.S. Geological Survey Professional Paper 165-E. <https://doi.org/10.3133/pp165E>
- Tardy, Y., y Roquin, C. (1992). Geochemistry and evolution of lateritic landscapes. En I. P. Martini y W. Chesworth (Eds.), *Weathering, soils and paleosols* (pp. 407–443). Elsevier. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_33-34/37560.pdf
- Timms, B. V. (2021). Pan gnammas (weathering pits) across Australia: Morphology in response to formative processes. *International Journal of Geosciences*, 12(10), 984–993. <https://doi.org/10.4236/ijg.2021.1210051>
- Twidale, C. R. (1980). The origin of bornhardts. *Journal of the Geological Society of Australia*, 27(1–2), 195–208. <https://doi.org/10.1080/00167618008729134>
- Twidale, C. R. (1982). *Granite landforms*. Elsevier.
- Twidale, C. R., y Vidal Romani, J. R. (2005). *Landforms and geology of granite terrains*. A. A. Balkema.

- Uña Álvarez, E. de. (2008). Description and nomenclature of the tafoni features (cavernous rock forms): Research approaches in granite terrains. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 33, 65–82.
- Velde, B. (1992). *Introduction to clay minerals: Chemistry, origins, uses and environmental significance*. Chapman y Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2368-6>
- Vento, B., Puebla, G. G., Pinzón, D., y Prámparo, M. B. (2021). Paleoclimate estimates for the Paleogene-Neogene in southern South America using fossil leaves as proxies. *Comptes Rendus Palevol*, 20(3), 29–48. <https://doi.org/10.5852/cr-palevol2021v20a3>
- Vidal Romaní, J. R., y Twidale, C. R. (1998). *Formas y paisajes graníticos*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1518.8004>
- Vidal Romaní, J. R., Twidale, C. R., Campbell, E. M., y Centeno, J. D. (1995). Pruebas morfológicas y estructurales sobre el origen de las fracturas de descamación. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 20, 307–346.