

Prospección de Oro Invisible en Rocas Carbonatadas (Calizas) del Miembro Salada de la
Formación La Luna, Sector Vereda Vanegas-Municipio de Lebrija, Santander.

Liseth Carolina Galvis Cortés, Paula Andrea Sarmiento Triana

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo (a)

Director

Jesús Hernando Mendoza Forero

M.Sc., Exploración Mineral – Geología de Minas

Codirector

Jorge Cruz Martín

Phd., Geología Económica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

*Este capítulo de mi vida que culmina, lo dedico a Dios por su inmenso amor, para él son y
serán todos mis logros.*

*A mi madre, mejor amiga, compañera de vida, mi ángel guardián Nelly Beatriz Cortés
Ortega y a mi padre Danilo Galvis Afanador; por sus inagotables sacrificios, amor y apoyo
incondicional.*

*A mis hermanos Michael Steven y Allison Denisse como prueba que todo lo que se quiere
bajo la presencia de Dios, se hará realidad.*

*A mis abuelos Elsa y Evelio, a mis tíos (a) y primos maternos, por sus consejos y apoyo
moral.*

Al mejor compañero y amigo que Dios me pudo regalar Jeffrey Fernando López Rincón.

*A mi compañera de tesis y amiga Paula Andrea Sarmiento Triana, por su valiosa amistad,
compañía, apoyo, y a su hermosa familia que me acogió con cariño durante la culminación del
proyecto.*

A mi buen amigo Dayerson Silva, por su constante apoyo y cariño.

*A esos amigos que estuvieron sosteniéndome en los momentos difíciles y que seguirán
estando, saben el cariño y gratitud que les tengo.*

*A todas las personas que me brindaron de su conocimiento, oportunidades, motivación y
cariño para mi crecimiento personal y profesional.*

A Dios y a todos ellos, les agradezco mucho. Este logro no es solo mío, es de todos ustedes.

Liseth Carolina Galvis Cortés

Dedicatoria

A Dios por todas sus bendiciones,

A mis padres Juan Carlos Sarmiento y Marlene Triana que con su esfuerzo, dedicación y amor han sido mi apoyo en todo momento y me han hecho la mujer que soy.

A mi hermano Juan Carlos Sarmiento que ha sido mi compañero y mi fortaleza en muchos momentos de mi vida.

A mis dos abuelitas que son inspiración de vida, de amor y esfuerzo.

A mis tíos, que han sido un apoyo incondicional para mí y mi familia, ante cualquier adversidad.

A mi prima Silvia Rodríguez que ha sido mi mejor amiga, mi apoyo y mi cómplice desde siempre.

A mi compañera de tesis Liseth Carlina Cortés, por su cariño, su hermosa amistad, por ser mi equipo y mejor compañía de trabajo.

A mis amigos por ser parte de mi vida, por ser motivarme cuando más lo he necesitado, por regalarme tantas alegrías y maravillosos momentos.

Paula Andrea Sarmiento Triana

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios por ser nuestra fortaleza y guía en cada paso de nuestra vida, y por permitirnos alcanzar este nuevo logro.

A nuestras familias por el respaldo, paciencia y cariño, que nos han brindado, son nuestra motivación.

Gracias a la Escuela de Geología por permitirnos formar profesionalmente y en ella, gracias a las personas que fueron partícipes en este proceso, por aportar en nuestro conocimiento y en nuestras vidas, a nuestros profesores, amigos y compañeros, a integrantes de la escuela como Luis Eduardo Garrido, Martha Liliana Blanco, Rosadilia Carrillo y César Enrique Llerena.

A la empresa Alicanto Colombia S.A.S. por su calurosa acogida y por brindarnos la oportunidad de contribuir en el desarrollo de proyectos de este estilo, a Jorge Cruz y su esposa Rosa, a Ricardo Valls y a Jose Luis Mederos, por sus consejos de vida, sus cuidados y por sus contribuciones en este proyecto, a sus trabajadores Don Evelio, Toño, Fabián y José por su acompañamiento durante la fase de campo.

A nuestro director Jesús Hernando Mendoza por su seguimiento, supervisión y participación en este proyecto.

A los profesores, Ana Milena, Georgina, Edith, German Patarroyo, y Francisco Velandia por sus aportes y acompañamiento durante este proyecto, y en especial, a los profesores, Víctor Caballero quién nos brindó acompañamiento en campo y fue nuestro guía y consejero en la elaboración de las columnas estratigráficas y cartografía del área de estudio y al profesor Juan Badillo quien nos brindó de su tiempo, conocimiento, guía y apoyo.

Al profesor Carlos Alberto Ríos, y al Geólogo Carlos Villareal por su colaboración con la adquisición de datos al SEM, así como al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander.

Al equipo adscrito al Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatigüara y en especial al profesor Jose Antonio Henao por su colaboración en la entrega de los resultados

Como menciones especiales,

A Brayan Guarín por su colaboración en la elaboración de los cortes geológicos, y a Erwing Mauricio por su personalidad servicial y compañía durante este proceso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	24
1. Objetivos	26
1.1. Objetivo General	26
1.2 Objetivos Específicos.....	26
2. Marco referencial	27
2.1 Antecedentes	27
2.1.1. Análisis Geoquímicos.	27
2.1.2. Análisis de lineamientos.	29
2.2 Geología Regional	32
2.2.1. Macizo de Santander.....	32
2.2.2. Valle Medio del Magdalena.....	34
2.3 Geología Estructural	43
2.3.1. Sistema de Fallas de Bucaramanga.....	45
2.3.2. Falla Lebrija	45
2.3.3. Depresión Estructural de Vanegas	46
2.3.4. Falla de Cuesta Rica y Sinclinal Vanegas.....	46
2.3.5. Anticlinal Vanegas.....	46
2.3.6. Falla Solferino.....	47
2.3.7. Falla Río Cáchira	47
2.3.8. Sinclinal Nuevo Mundo	47
2.3.9. Sinclinal Arévalo	47

3. Metodología	48
3.1. Fase 1: Recopilación Bibliográfica.....	48
3.2. Fase 2: Campo.....	48
3.3. Fase 3: Análisis en laboratorio.....	49
3.4. Fase 4: Trabajo de Oficina.....	51
3.5. Fase 5: Interpretación de resultados.....	51
4. Generalidades	52
4.1. Localización del área de estudio	52
4.2. Aspectos Fisiográficos	54
5. Marco geológico del área de estudio	56
5.1. Estratigrafía.....	56
5.1.1. Unidades Cretácicas.....	57
5.1.2. Unidades Paleógenas	62
5.1.3. Unidades Cuaternarias	65
5.2. Rasgos Estructurales	66
6. Estudios realizados en este trabajo.....	69
6.1. Formación La Luna.....	69
6.1.1. Secciones Columnares Levantadas	70
6.1.2. Petrografía.....	73
6.1.3. Espectrometría de masas (ICP-MS, Ultratrace 1).....	83
6.1.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	85
6.1.5. Difracción de rayos x (DRX).....	95
7. Discusión	98

8. Conclusiones	106
9. Recomendaciones.....	107
Referencias bibliográficas	109

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Resultados de análisis geoquímico para 4 muestras realizado por SGS Colombia S.A.</i>	27
Tabla 2. <i>Lineamientos del área del Proyecto Rionegro.</i>	29
Tabla 3. <i>Coordenadas del área objeto de estudio</i>	52
Tabla 4. <i>Vías de acceso al área de estudio.</i>	54
Tabla 5. <i>Resultados del análisis geoquímico para 4 muestras realizado por Actlabs Colombia S.A.S.</i>	83
Tabla 6. <i>Minerales identificados para cada muestra con sus observaciones correspondientes</i>	85
Tabla 7. <i>Fases minerales identificadas en la muestra VAN-33-09 (Cód. 19322001).</i>	96
Tabla 8. <i>Fases minerales identificadas en la muestra VAN-33-11 (Cód. 19322002 y 19322003).</i>	97
Tabla 9. <i>Elementos químicos (Au, Hg, As, y Sb) obtenidos del ICP-MS para las calizas de la Formación La Luna.</i>	105

Lista de Figuras

Figura 1. A) Lineamientos principales, Proyecto Rionegro, B) Lineamientos secundarios, Proyecto Rionegro. C) Lineamientos terciarios, Proyecto Rionegro. D) Lineamientos circulares, Proyecto Rionegro. Adaptado de Galkine, Complex structural study of Rionegro Project area, Colombia. Draft.	30
Figura 2. Áreas de densidad máxima de “todas las intersecciones de lineamiento ponderados” marcadas en color rojo. (Galkine & Valls, Technical Report on the Rionegro Project, 2018). .	31
Figura 3. Regiones fisiográficas del Departamento de Santander. (Adaptado del IGAC, 1992), donde se muestra en púrpura la extensión del macizo de Santander.	32
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Valle Medio del Magdalena (tomada de ANH, 2012).	34
Figura 5. Sección estructural de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, tomado de (Córdoba, 2010)	44
Figura 6. Localización del área con un polígono rojo, sobre la plancha 109-I-D. Imagen tomada del Geoportal del IGAC.	52
Figura 7. Localización del área de estudio. El polígono blanco representa el área que abarca el permiso de exploración Proyecto Rionegro y en rojo, el área de estudio de 20 km ² . Imágenes tomadas de Google Earth.	53
Figura 8. Vías de acceso al área de estudio. Imagen tomada del PTO Contrato de concesión JG3-16392 de Alicanto S.A.S.	53

- Figura 9. Fotografía panorámica que muestra la geomorfología de escarpes y laderas de baja pendiente del área de estudio. Al costado derecho, Río Lebrija. Coordenadas: E: 1085654, N: 1305656, H: 220 ± 3 , vía Vanegas-Cuesta Rica. Orientación de la foto: 158° N en azimut. 55
- Figura 10. Mapa geológico de 20 km² en el sector Vereda Vanegas, escala 1:25.000. Se ubican las estaciones de campo y puntos de control de campo. 56
- Figura 11. Formación Simití, aflorando en el área de estudio, laderas muy suaves. Coordenadas de la foto: E: 1086861, N: 1304300, H: 190 ± 3 , Vía El Conchal-Vanegas, margen izquierdo de la vía. 57
- Figura 12. Capas delgadas de lodolita calcárea físil hacia la base de la Formación La Luna, con presencia de galerías perpendiculares a la estratificación (A) y concreciones paralelas a la estratificación de hasta 12 cm. Orientación: 335° en azimut. 58
- Figura 13. A) Impresiones de conchas de *Inoceramus* de la Formación La Luna. B) Sección quebrada Vanegas, donde se muestran varias concreciones de tamaño considerable, y capas tabulares de estratificación delgada a media de biomicritas. C) Lentes de chert y capas de biomicritas de foraminíferos planctónicos con laminación plano-paralela. D) Foraminíferos y fosfato con borde de recristalización de calcita y laminación plano-paralela. 59
- Figura 14. A) Imagen tomada en la estación VAN-20, donde se observa capa con formas subredondeadas de biomicrita con reemplazamiento a sílice intercalada con capas de biomicritas (mudstone>wackestone) de estratificación delgada. B) Lugar donde se tomó muestra de mano VAN-20-01(C). 60
- Figura 15. A) Afloramiento de lodolitas grises y varicoloreadas de la Formación Umir. B) Afloramiento de shales de la Formación Umir. C) Capa de carbón de 15 cm. D) Arenisca de

grano muy fino a fino con laminación cruzada ondulosa. E) Afloramiento de capas de areniscas hacia el techo de la Formación Umir. 62

Figura 16. A) Detalle de afloramiento de las areniscas de grano fino a medio de la base de la Formación Lisama y capa conglomerática de clastos de lodo ferruginoso. B) Laminación cruzada representativa de la Formación. C) Afloramiento de capas de areniscas de grano medio color verdoso de la Formación Lisama. 63

Figura 17. A) Arenisca de cuarzo ligeramente litoconglomerática de la Formación La Paz (líticos de chert, lodolita y cuarzo principalmente). B) Areniscas grises adquiriendo colores ocres por meteorización, de grano medio-grueso, con intraclastos de lodolita color gris claro, hacia el tope de La Paz. C) Afloramiento de capas de arenisca de grano medio intercaladas con capas de arenisca de fino a medio con laminación flaser y lodolitas grises. D) Capas gruesas de arenisca de grano fino a medio ligeramente conglomerática, buzando hacia el W. 65

Figura 18. A) Quebrada donde afloran las lodolitas grises con colores de alteración ocres, de la Formación Esmeraldas. B) Muestras de lodolitas color gris tomadas en las capas tabulares que afloran en la quebrada. 65

Figura 19. Diagrama de rosas correspondiente al rumbo dominante de 125 familias de diaclasas tomadas en el área de estudio. Elaborado en Georose. 67

Figura 20. Mapa Geológico con su respectivo corte correspondiente a la sección A-A' en el área de estudio donde se pueden observar los flancos del Sinclinal Nuevo Mundo y del Anticlinal Vanegas. 68

Figura 21. A) Pliegues en la Formación La Luna, Coordenadas: E: 1085456, N: 1305653, H: 194 ± 4. B) Pliegue en la Formación Umir, Coordenadas: E: 1084665, N: 1304414, H: 188 ± 4. ... 69

Figura 22. A) Afloramiento donde se tomaron las muestras para análisis químico y donde se puede observar claramente la intercalación de la pseudoesparita con bentonita y biomicritas con gran contenido en M.O. B) Impregnación de hidrocarburo en diaclasas perpendiculares a la estratificación. C) Detalle de la intercalación de calizas, chert y bentonita?. Se correlaciona en la Columna estratigráfica Sección Quebrada Vanegas con los bastones 11-14. Orientación de la foto: 260° N en azimut..... 71

Figura 23. Afloramiento donde fue levantada la Columna Estratigráfica, Sección Vereda Vanegas 73

Figura 24. En las microfotografías A, B, C y D en nicoles cruzados, objetivo 5x, se observa laminación marcada por foraminíferos planctónicos y láminas de microesparita en una matriz de lodo calcáreo, rica en materia orgánica. En la imagen D se observa un bioclasto de 3.8 mm. .. 74

Figura 25. En las microfotografías A, B, C y D en nicoles cruzados, objetivo 5x, se observan Foraminíferos planctónicos, bioclastos fosfáticos y restos fósiles en una matriz de lodo calcáreo, rica en materia orgánica. 75

Figura 26. Las microfotografías A y C fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x, se observa mosaicos de pseudoesparita formados a partir de la recrystalización de la micrita, apatito como mineral accesorio. Las imágenes B y D fueron en nicoles paralelos y muestra al igual que A y C opacos euhedrales y anhedrales identificados en SEM como pirita (Py) y esfalerita (Sp). 76

Figura 27. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x. Se observa el contacto gradacional (A) entre la biomicrita (Wackestone) y los mosaicos de la pseudoesparita que aumentan en tamaño desde el contacto al tope de la sección como se ve en las imágenes B y C. En la imagen D se observa biomicrita de foraminíferos planctónicos

reemplazados por calcita y sílice microcristalina con matriz de micrita, microesparita y materia orgánica. Esta sección corresponde al tope de la muestra VAN-33-05. 77

Figura 28. Las microfotografías A, B y C fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x. La imagen A, muestra el contacto neto entre la biomicrita (B) y la pseudoesparita (C) que corresponde a la base de la muestra VAN-33-05. La imagen D fue tomada en nicoles paralelos y muestra como la materia orgánica en la pseudoesparita se limita a rellenar porosidad secundaria. 79

Figura 29. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x. Se observa el contraste entre una caliza de foraminíferos con neomorfismo de matriz micrítica en proceso de reemplazamiento a sílice, y una matriz netamente silíceas con foraminíferos planctónicos y algunos fósiles de gasterópodos. La imagen B, muestra una venilla de calcita con materia orgánica y la imagen D, cúmulos de pirita identificados en SEM. 80

Figura 30. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x. Se observa una caliza de foraminíferos planctónicos y bentónicos que han sido reemplazados por calcita y algunos por sílice microcristalina, microconchas de bivalvos, ésta se encuentra bastante fracturada y presenta algunos fragmentos removilizados. Las fracturas se ven rellenas por calcita y van desde 0.02 a 1.9 mm de grosor. 81

Figura 31. Las microfotografías A y B fueron tomadas en nicoles cruzados, C y D en nicoles paralelos, objetivo 5x. Se observa el contacto entre una caliza lodosa con laminación plano-paralela y terrígenos de grano limo a arena muy fina y una caliza con abundantes foraminíferos bentónicos y pellets en una matriz de lodo calcáreo y fosfático. 82

Figura 32. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 6000x de pirita framboidal de 41 μm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	86
Figura 33. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 30000x de cubos de pirita de 1.2 y 1.4 μm . Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	86
Figura 34. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de pirita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	87
Figura 35. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 6000x de esfalerita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	87
Figura 36. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 12000x de caolinita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	88
Figura 37. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 3000x de calcita que muestra recristalización y un pequeño framboide de pirita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	89
Figura 38. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 12000x de apatito, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	89
Figura 39. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de pirita de 57 μm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	90

Figura 40. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x. Se señala cavidades que han sido rellenadas por esmectita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	90
Figura 41. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x de pirita de 52 μm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	91
Figura 42. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de caolinita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	92
Figura 43. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x que muestra materia orgánica llenando parcialmente poros de la caliza con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	92
Figura 44. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x de pirita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.	93
Figura 45. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x que muestra materia orgánica rellenando una venilla con calcita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	94
Figura 46. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 200x que muestra el contraste entre una matriz calcárea VS una silíceo, con el correspondiente espectro EDX de la matriz silíceo. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.....	94

Figura 47. Difractograma de rayos X de la muestra VAN-33-09 que muestra 7 fases minerales (ver tabla.) identificadas mediante análisis comparativo con la base de datos PDF-2 2004 utilizando el software EVA, Universidad Industrial de Santander.	95
Figura 48. Difractograma de interestratificado de illita/ esmectita, correspondiente a la muestra VAN-33-11 (Cód. 19322002 y 19322003). Laboratorio de rayos X, Universidad Industrial de Santander.....	96
Figura 49. Difractograma de rayos X de la muestra VAN-33-11 que muestra 7 fases minerales (ver tabla.) identificadas mediante análisis comparativo con la base de datos PDF-2 2004 en el software EVA, Universidad Industrial de Santander.	97
Figura 50. Secuencia paragenética de minerales pre-mineralización, evento Carlin y post-mineralización, determinados para el depósito Getchell-Nevada. (Modificado de Cline y Hosfra, 2000). En rojo se marcan los minerales presentes en la muestra VAN-33-09.	102
Figura 51. Modelo que ilustra los procesos asociados con la generación de fluidos hidrotérmicos que evolucionaron para convertirse en fluidos minerales para depósitos de tipo Carlin, mostrando ubicaciones dentro de la corteza que pueden haber contribuido con Au y otros componentes de fluido mineralizante. Adaptado de Cline, 2005.	103
Figura 52. Coeficientes de correlación lineal entre oro, mercurio, arsénico y antimonio para los cuerpos de mineral de West, Main y East en los depósitos de oro de Carlin. Adaptado de Harris, M. & Radtke, A. (1936).	104

Lista de Apéndices

(Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Mapa Geológico.

Apéndice B. Columna estratigráfica: Sección Quebrada Vanegas.

Apéndice C. Columna estratigráfica: Sección Vereda Vanegas.

Apéndice D. Catálogo de Muestras de Mano.

Apéndice E. Catálogo de Secciones Delgadas. (Petrografía)

Apéndice F. Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Resumen

Título: PROSPECCIÓN DE ORO INVISIBLE EN ROCAS CARBONATADAS (CALIZAS) DEL MIEMBRO SALADA DE LA FORMACIÓN LA LUNA, SECTOR VEREDA VANEGAS-MUNICIPIO DE LEBRIJA, SANTANDER*

Autores: Liseth Carolina Galvis Cortés, Paula Andrea Sarmiento Triana**

Palabras clave: Miembro Salada, Formación La Luna, rocas carbonatadas, Oro invisible.

Descripción: El Miembro Salada, de la Formación La Luna en el sector de la vereda Vanegas está constituido por capas de biomicritas de foraminíferos planctónicos con gran contenido de materia orgánica, intercaladas con capas duras de caliza recristalizada (pseudoesparita), normalmente limitadas por niveles delgados de bentonita. El objetivo general de este proyecto radicó en la determinación de la presencia de oro invisible en los niveles de rocas calcáreas aquí aflorantes, mediante geología de campo, levantamiento de columnas estratigráficas, estudios macroscópicos y microscópicos de las muestras recolectadas, complementados con estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Para la cuantificación de las concentraciones de oro, fueron analizadas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), las muestras de biomicrita y pseudoesparita, encontrándose un valor anómalo de oro aproximadamente 14 veces superior a la abundancia cortical, en los niveles de pseudoesparita; en contraste, las muestras de biomicrita presentan valores relativamente insignificantes. Con base a esto, son los niveles de pseudoesparita los que representan un interés desde el punto de vista de mineralización aurífera. Por medio de los análisis complementarios se identificó que el oro se encuentra en las piritas en tamaños tan diminutos que aun utilizando grandes aumentos no es posible visualizarlo.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: M.Sc. Hernando Mendoza Forero Codirector: Ph.D. Jorge Cruz Martin.

Abstract

Título: PROSPECTION FOR INVISIBLE GOLD IN THE CARBONATES (LIMESTONE) OF THE SALADA MEMBER OF THE LA LUNA FORMATION, SIDEWALK VANEGAS-MUNICIPALITY OF LEBRIJA, SANTANDER

Authors: Liseth Carolina Galvis Cortés, Paula Andrea Sarmiento Triana**

Keywords: Invisible gold, carbonated rocks, Salada Member, La Luna Formation

Description: The Salada Member, of the La Luna Formation in the Vanegas sidewalk sector is constitute by layers of planktonic foraminifera biomicrites with a high organic matter/substance content, with interlayers of recrystallized limestone (pseudosparite), limited by fine layers of Bentonite. The general objective of this project was to determine the presence of invisible gold in the layers of limestone, through field geology, stratigraphic columns, macroscopic and microscopic studies of the collected samples, complemented with Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray diffraction (DRX) studies. For the quantification of the gold concentrations, the biomicrite and pseudoesparite samples were analyzed by Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), found an anomalous gold value approximately 14 times higher than the cortical amount, in the pseudoesparite layers; in contrast, the biomicrite samples have relatively insignificant values. Based on this, are the pseudosparite layers that represent an interest from the viewpoint of gold mineralization. Through the complementary analyzes it was identified that gold is found in pyrites in such tiny sizes that even using large magnifications it is not possible to visualize it.

*Bachelor thesis

** *Faculty of physicochemical Sciences. Geology School. Directress: M.Sc. Hernando Mendoza Forero Codirectress: Ph.D. Jorge Cruz Martin

Introducción

El oro es un metal precioso muy valorado por el hombre, por ello la importancia en el reconocimiento de su ocurrencia geológica. Sus yacimientos son muy diversos y abarcan todas las edades geológicas, se pueden encontrar en vetas de cuarzo, pórfidos cupríferos, skarn, paleoplaceres, placeres, yacimientos de Au diseminados, entre otros.

Las investigaciones realizadas en Colombia enfocadas a los depósitos de oro invisible están mayormente relacionados a cuerpos ígneos, la falta de exploración en rocas carbonatas sugieren su poca relevancia en el territorio colombiano. Este trabajo aún con varias limitaciones pretende suscitar el interés por este tipo de yacimientos ampliamente investigados en otros países como Estados Unidos en Nevada y China en el oeste de la región de Qinling.

El propósito de este trabajo es determinar la existencia o no de oro invisible en las calizas del Miembro Salada de la Formación La Luna, y en caso favorable mencionar los criterios que podrían relacionarse a su ocurrencia. Para el cumplimiento de este objetivo se lista un objetivo general y unos objetivos secundarios, que permitan el apropiado desarrollo del trabajo.

La investigación se realizó al oriente del Valle Medio del Magdalena, en un área de 20km² localizada en la vereda Vanegas del municipio de Lebrija, geológicamente su litología está representada por unidades estratigráficas del cretácico y paleógeno siendo la Formación La Luna de edad cretácica seleccionada en el levantamiento de columnas posteriormente utilizadas para la correlación del Miembro Salada con el perfil de interés, del cual se extrajeron las muestras para estudios de análisis químico de espectrometría de masas (ICP-MS) con el fin de determinar la presencia de oro, resultado que dio positivo, con un valor mayor en la muestra (VAN-33-09) en comparación con los demás valores, estos estudios se complementaron con análisis de

microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) a fin del interés de obtener una mejor asociación mineral, teniendo estos resultados se procede a correlacionarlos con los resultados obtenidos de otros autores que han investigado el oro invisible en rocas carbonatadas, finalizando de esta manera con las respectivas conclusiones y recomendaciones..

Planteamiento del problema

En el sector de la vereda Vanegas del municipio de Lebrija-Santander, la empresa Alicanto Colombia S.A.S realizó estudios de exploración, buscando nuevas fuentes de mineralización aurífera. De acuerdo con sus interpretaciones, decidieron realizar análisis químicos por espectrometría de masas a las calizas de la Formación La Luna, donde observaron cantidades de oro por encima de la abundancia promedio de la corteza (Clarke), llegando a considerar la posible existencia de una mineralización de oro invisible semejante al yacimiento Tipo Carlin. Por tal razón, este trabajo pretende profundizar en el estudio de estas calizas realizando cartografía en el área de interés, haciendo el levantamiento de columnas estratigráficas y muestreos para análisis macroscópicos y microscópicos, con el fin de identificar los niveles de roca que serían más propicios para hacer los respectivos análisis químicos por espectrometría de masas (ICP-MS) y posteriormente complementarlos con microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) para un mayor entendimiento de su composición. La interpretación de la información recolectada permitirá soportar la idea de la presencia o no de oro invisible en las calizas, y al mismo tiempo, ampliaría la visión sobre el conocimiento de este tipo de mineralizaciones poco conocidas en Colombia.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar en el área de estudio, los niveles calcáreos (calizas) aflorantes de la Formación La Luna (Miembro Salada) que pudieran ser favorables para la posible existencia de oro invisible.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar si en las calizas de la Formación La Luna (Miembro Salada), se encuentran indicios geológicos y geoquímicos que muestren condiciones favorables para la presencia de contenido de Au invisible.

Comparar y contrastar los datos de campo y los resultados de la petrografía, geoquímica (ICP-MS), microscopía electrónica de barrido (SEM) y de difracción de rayos x (DRX), que se interpreten como positivos para una posible mineralización de Au invisible.

Reconocer los atributos y rasgos geológicos asociados con las unidades estratigráficas que afloran en el área de estudio.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

En el año 2014 los geólogos de Fenix Geoconsult Ltd. adelantaron estudios de exploración para la solicitud de las licencias PCL-11051 y PCL-11341 para la empresa Alicanto Colombia S.A.S. con relación a oro en placeres aluviales del río Lebrija. Entre los estudios realizados se encuentran análisis de lineamientos, imágenes satelitales, geofísica con GPR, trabajo de campo y contados análisis químicos; esto con la finalidad de entender el carácter estructural y geológico que permitiera encontrar nuevas fuentes de mineralización dentro del Proyecto Rionegro. La interpretación de sus resultados se consigna en el informe “Technical Report on the Rionegro Project” en el cual mencionan la posibilidad de mineralización de tipo Carlin en las calizas de la Formación La Luna en el sector de la vereda Vanegas.

2.1.1. Análisis Geoquímicos: Con el propósito de allegar información concreta, la empresa Geo-consultora Fénix S.A.S. solicita el análisis geoquímico para 4 muestras de roca carbonatada, colectadas en la Formación La Luna, Miembro Salada, análisis que fueron realizados por los laboratorios de SGS Colombia. Los geólogos de Alicanto tomaron las muestras en el sector vereda Vanegas en las coordenadas: Y: 1086510 m. E X: 1304370 m. y una altitud de 186 msnm. La técnica utilizada corresponde a Espectrometría de Masas (ICP-MS) mediante análisis multi elemental (ICM-12B) para 52 elementos con ataque de 2 ácidos y ensayo al fuego con espectrofotometría de absorción atómica (FAA313) para el análisis cuantitativo oro. Ver tabla 1.

Tabla 1. Resultados de análisis geoquímico para 4 muestras realizado por SGS Colombia S.A.

Elemento	Unidad	Método	Limite Detec.	Limite Superior	R1415	R1416	R1417	R1418
Au	ppb	FAA313	5	5000	39	34	16	21
Ag	ppm	ICP12B (*)	0.2	100	0.8	0.4	0.7	0.4
Al	%	ICP12B (*)	0.01	15	0.1	0.82	0.37	0.37
As	ppm	ICP12B (*)	3	10000	6	6	31	30
Ba	ppm	ICP12B (*)	1	10000	10	42	269	245
Be	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	<0.5	0.7	0.8	0.9
Bi	ppm	ICP12B (*)	5	10000	<5	<5	<5	<5
Ca	%	ICP12B (*)	0.01	15	8.4	0.06	>15	>15
Cd	ppm	ICP12B (*)	1	10000	1	<1	11	12
Co	ppm	ICP12B (*)	1	10000	2	1	2	2
Cr	ppm	ICP12B (*)	1	10000	21	20	32	31
Cu	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	8.9	17.5	37.5	38.9
Fe	%	ICP12B (*)	0.01	15	0.73	0.94	0.47	0.49
Ga	ppm	ICP12B (*)	10	10000	<10	<10	<10	<10
K	%	ICP12B (*)	0.01	15	0.05	0.25	0.1	0.1
La	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	3.4	5.5	3.6	4
Li	ppm	ICP12B (*)	1	10000	1	8	1	2
Mg	%	ICP12B (*)	0.01	15	0.03	0.02	0.13	0.13
Mn	ppm	ICP12B (*)	2	10000	123	20	39	36
Mo	ppm	ICP12B (*)	1	10000	4	4	121	115
Na	%	ICP12B (*)	0.01	15	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
Nb	ppm	ICP12B (*)	1	10000	<1	<1	<1	<1
Ni	ppm	ICP12B (*)	1	10000	10	8	185	174
Pb	ppm	ICP12B (*)	2	10000	89	19	21	48
S	%	ICP12B (*)	0.01	10	0.18	0.17	0.95	1.01
Sb	ppm	ICP12B (*)	5	10000	<5	<5	<5	<5
Sc	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	0.9	2.6	2.4	2.5
Sn	ppm	ICP12B (*)	10	10000	<10	<10	<10	<10
Sr	ppm	ICP12B (*)	0.5	5000	99.8	25	1552.6	1466.2
Ti	%	ICP12B (*)	0.01	15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Tl	ppm	ICP12B (*)	2	10000	<2	<2	2	2
V	ppm	ICP12B (*)	2	10000	3	7	829	877
W	ppm	ICP12B (*)	10	10000	<10	<10	<10	<10
Y	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	5.7	2.7	8.2	9.1
Zn	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	63.4	12.9	648.3	650.5
Zr	ppm	ICP12B (*)	0.5	10000	4.2	1.2	2.6	2.4
Hg	ppm	ICP12B (*)	1	10000	<1	<1	<1	<1
Se	ppm	ICP12B (*)	10	10000	<10	<10	16	18
Te	ppm	ICP12B (*)	10	10000	<10	<10	<10	<10
Peso Muestra	G	PMI_CH			430	125	380	410

Nota: Adaptado del resultado de análisis orden GQ1500287 para Geoconsultora Fénix S.A.S.

2.1.2. Análisis de lineamientos: Estudio realizado por QP Dr. Galkine, P.Geo y posteriormente interpretado y procesado por P. Geo. R. Valls en el cual se tomó en consideración únicamente los lineamientos y su distribución, sin un análisis preliminar de datos geológicos/ geofísicos /geoquímicos, realizado en toda la zona de aplicación del proyecto Rionegro comprendiendo un área de 1300 km². Todos los lineamientos se dividieron en cuatro grupos: principales, secundarios, terciarios y circulares (Fig.1). El total de lineamientos y longitudes aparecen en la tabla 2.

Tabla 2. *Lineamientos del área del Proyecto Rionegro.*

Tipo de Lineamiento	Número Total	Longitud (km)
Terciarios	18.913	0,25 a 1,5
Secundarios	730	2.5 a 7
Principales	21	11-28
Circulares	31	-

Nota: La tabla de datos fue realizada con la información reportada en el documento de Galkine, Complex Structural Study of Rionegro Project Area, Colombia. Draft.

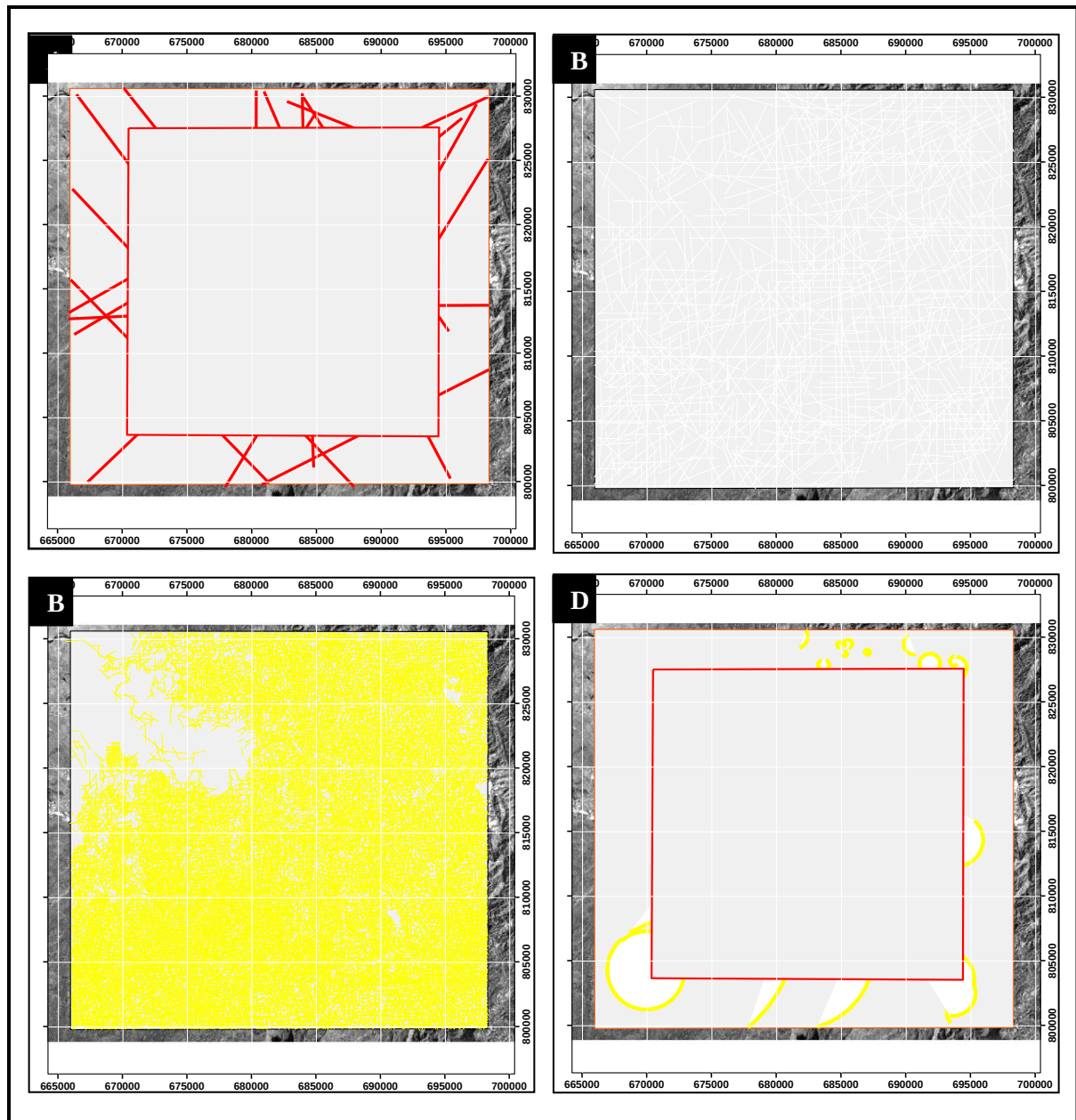


Figura 1. A) Lineamientos principales, Proyecto Rionegro, B) Lineamientos secundarios, Proyecto Rionegro. C) Lineamientos terciarios, Proyecto Rionegro. D) Lineamientos circulares, Proyecto Rionegro. Adaptado de Galkine, Complex structural study of Rionegro Project area, Colombia. Draft.

Según Galkine y Valls, (2018) a partir de consideraciones generales, los lugares con mayor densidad de lineamientos pueden considerarse como las áreas más favorables para la

mineralización desde el punto de vista de los fundamentos del método y pueden recomendarse como las primeras zonas de objetivo para futuras actividades de exploración, debido a una alta permeabilidad que permite el fluido circulante en estas áreas. Por esta razón, consideran que es muy importante tener en cuenta la distribución espacial de las diferentes densidades de lineamiento y por practicidad y compromiso con la estadística, realizan el mapeo de los máximos. Ver figura 2.

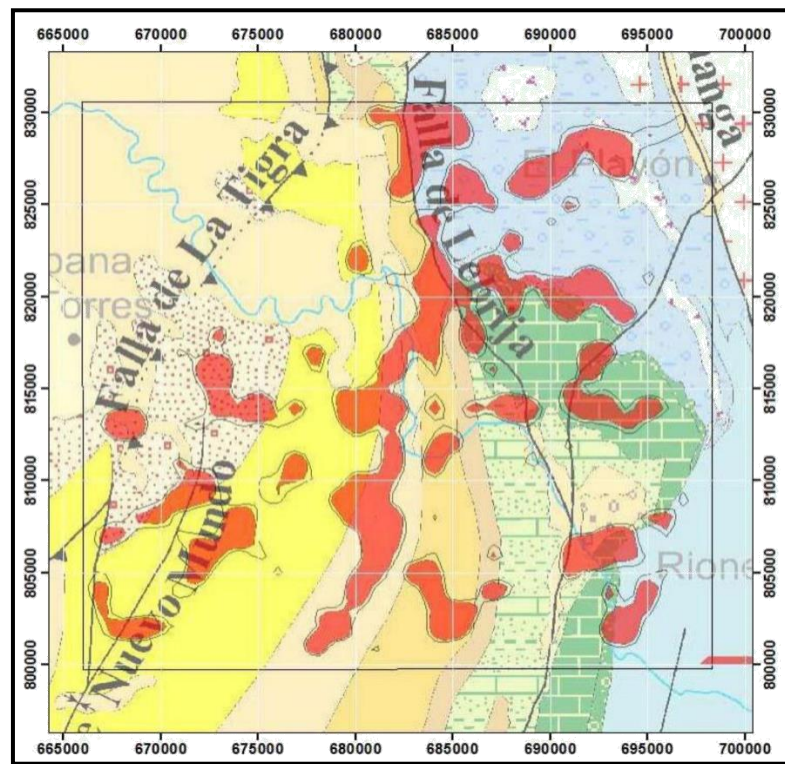


Figura 2. Áreas de densidad máxima de “todas las intersecciones de lineamiento ponderados” marcadas en color rojo. (Galkine & Valls, Technical Report on the Rionegro Project, 2018).

2.2 Geología Regional

2.2.1. Macizo de Santander: El Macizo de Santander se localiza en una zona, al sur del Bloque Maracaibo el cual es limitado por fallas regionales como La Falla Bucaramanga-Santa Marta, y Boconó. (Tschanz, 1974; Van der Hilst y Mann, 1994), hace parte del sistema Orogénico Andino, específicamente en los Andes del Norte. Las rocas del Macizo de Santander son predominantemente metasedimentarias y metaígneas intruídas por cuerpos plutónicos que varían en composición de diorita a granito. Sobre los flancos del Macizo y en sus fosas tectónicas afloran rocas sedimentarias (Ward, et al, 1973). Las rocas más antiguas del Macizo corresponden al Complejo Neis de Bucaramanga, de edad Proterozoico tardío, e incluyen neises, esquistos micáceos y migmatitas que probablemente formaron parte del Escudo Precámbrico de la Guyana.

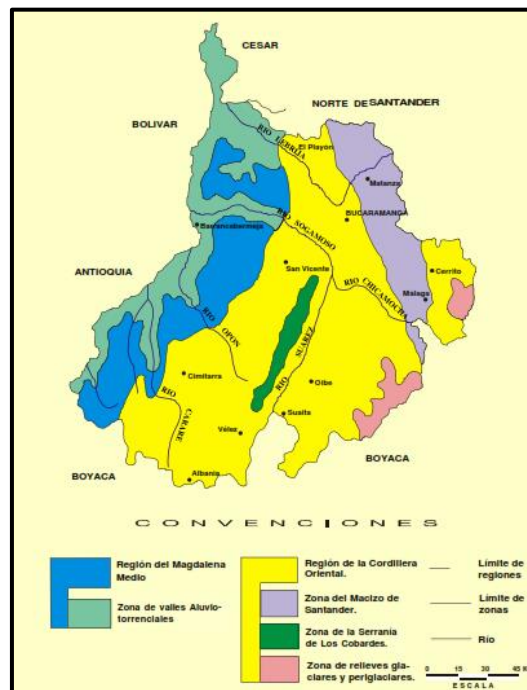


Figura 3. Regiones fisiográficas del Departamento de Santander. (Adaptado del IGAC, 1992), donde se muestra en purpura la extensión del macizo de Santander.

Las rocas metamórficas de bajo a medio grado, de edad Proterozoico tardío al Ordovícico, incluyen esquistos, filitas, metalimolitas, metareniscas y mármoles, que hacen parte del Complejo Esquistos de Silgará; sucesión geosinclinal que posiblemente se extiende hacia la cordillera de Mérida (Venezuela). En el grupo de rocas metamórficas de grado alto a medio, se encuentran rocas plutónicas metamorfoseadas (Ortoneis) de composición granito a tonalita. Mantilla (2016) considera que representan rocas de dos edades, Proterozoico tardío y Ordovícico a Devónico temprano, y que corresponderían con las orogenias Grenvilliana y Famatiniana (localmente denominadas Quetame-Caparonensis). Con excepción de la recrystalización en las calizas de edad Permo-Carbonífera, las unidades litoestratigráficas del Paleozoico superior no estarían afectadas por metamorfismo regional.

Los batolitos, plutones y cúpulas no metamorfoseadas del Macizo de Santander, su composición varía de Diorita a Granito, la mayoría de ellos con edades Triásico-Jurásicas a Jurásicas, corresponden al denominado Grupo Plutónico de Santander, en el que se distinguen dos conjuntos: uno el más joven, de granito y cuarzomonzonita rosados y otro de cuarzomonzonita y granodioritas grises, más antiguo. Al oeste de la Falla de Bucaramanga se localiza un pequeño cuerpo de riolita y un cuerpo intrusivo, tabular, con granófiro y brechas intrusivas en rocas sedimentarias de edad Triásica. Se desconoce la edad, pero probablemente es más joven que el Grupo Plutónico de Santander (Ward, et al, 1973). Los diques más escasos de basalto, pórfido dacítico y diabasa se han observado en rocas hasta el límite Jurásico-Cretácico, siendo los pórfidos dacíticos la única roca ígnea que intruye las rocas del Cretácico. (Ward, et al, 1973).

2.2.2. Valle Medio del Magdalena: La cuenca del Valle medio del Magdalena corresponde a una depresión alargada que se extiende de N-S, situada entre la cordillera Central y la cordillera Oriental de Colombia, representa un área de 34.000 km². La cuenca es limitada hacia el sur por el cinturón plegado de Girardot, al SE por el sistema de fallas Bituima y La Salina, al oeste por los sedimentos neógenos que forman parte de la Serranía de San Lucas, y hacia al NE con el sistema de Fallas de Bucaramanga-Santa Marta, y al norte por el sistema de fallas del Espíritu Santo. (Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J., 2007).

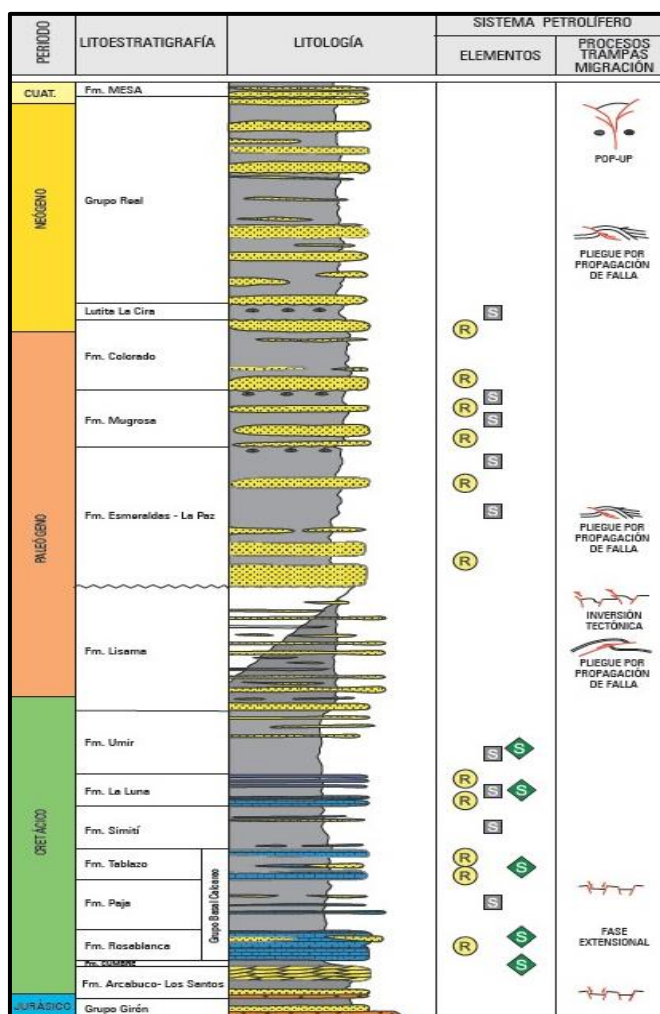


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Valle Medio del Magdalena (tomada de ANH, 2012).

Su sedimentación corresponde a varios eventos geológicos, reconociéndose tres secuencias de primer orden, la primera secuencia fue depositada en ambientes continentales a marginales durante un rift intracratónico en el Triásico y Jurásico inferior, la segunda de ambientes fluviales y litorales durante el desarrollo de grabens en el Jurásico tardío a Cretácico inferior, y la tercera en condiciones marinas durante el proceso tectónico de subsidencia termal (Fabre, 1987; Sarmiento, 2002), concluyendo su ciclo de sedimentación con una tectónica de esfuerzos compresivos en el Paleoceno al Eoceno, propiciando la deposición de facies principalmente clásticas arenosas, de las unidades estratigráficas del Paleógeno, las cuales corresponden a ambientes continentales de naturaleza fluvial.

2.1.2.1. Estratigrafía del Mesozoico: La secuencia sedimentaria Mesozoica en el Valle medio del Magdalena inicia con la acumulación de sedimentos de la Formación Bocas, Formación Jordán, Formación Girón. Estas unidades litoestratigráficas se encuentran relacionadas y en respuesta a la erosión ocasionada por el levantamiento topográfico consecuencia del emplazamiento de los batolitos durante el Triásico y el Jurásico (Ward, et al, 1973). El siguiente evento de sedimentación corresponde con la sedimentación marina del Cretácico, representada por las unidades estratigráficas del Cretácico inferior como son la Formación Los Santos (antes denominada Tambor), Formación Cumbre, Formación Rosablanca, Formación Paja, Formación Tablazo, Formación Simití, y del Cretácico superior como son la Formación La Luna y Formación Umir.

2.1.2.2. Unidades del Triásico-Jurásico

- **Formación Bocas:** Definida por (Ward, et al, 1973); suprayace a la formación Tiburón en un contacto discontinuo y en un contacto discordante con el Neis de Bucaramanga y Los

Esquistos del Silgará, su edad corresponde al Jurásico medio y se define como una unidad litoestratigráfica de rocas siliciclásticas, caracterizada por una sucesión de sedimentos continentales, más específicamente de alternancia entre limolitas, limolitas levemente calcáreas, areniscas, conglomerados, arcillolitas fosilíferas, con capas finas de rocas volcánicas hacia el techo de la Formación. Para esta unidad se reporta una variedad de rocas ígneas porfiríticas que cortan la formación y las cuales se han asociado al magmatismo de edad Neógena (Mantilla et al., 2011; Mantilla et al., 2013b).

- **Formación Jordán:** Descrita por Cedié en 1968, se reconoce por su litología de limolitas de color marrón rojizo y areniscas de grano grueso de color gris verdoso a ligeramente conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, esta unidad contiene capas de tobas soldadas de composición félsica, lo que define su ambiente de depositación como continental volcanoclástico; por sus relaciones estratigráficas, se considera de edad Jurásico medio (Ward, et al, 1973). Suprayace concordantemente a la Formación Bocas y en discontinuidad estratigráfica con la Formación Girón.

- **Formación Girón:** Fue nombrada como “Girón Series” por Hettner (1892), compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, con interestratificaciones de limolitas y arcillolitas, y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo, lo cual define su ambiente de depositación como continental, fluvial a lacustre-fluvial. Se le asigna una edad del Jurásico superior a Cretácico Inferior.

2.1.2.3. Unidades del Cretácico: Las unidades cretácicas son principalmente de depósitos clásticos de carácter fluvial, marinos someros y sedimentos de plataforma media a externa.

2.1.2.3.1. Secuencias litológicas del Cretácico Inferior

- **Formación Los Santos** (anteriormente Tambor): Suprayace con la formación Girón en discontinuidad estratigráfica, e infrayace concordantemente con la Formación Cumbre; inicialmente fue definida por Cediel (1968) luego redefinida por Laverde (1985), constituida principalmente de cuarzoareniscas, localmente intercaladas con lodolitas, areniscas conglomeráticas y arcillolitas, estas facies han sido interpretadas como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas.
- **Formación Cumbre:** Definida por (Renzoni, et al, 1969), su contacto es concordante tanto con la infrayacente Formación Los Santos y con la suprayacente Formación Rosa blanca, es constituida por cuarzoareniscas grises de grano fino intercaladas con limolitas y shales negros con presencia de pirita. Su ambiente de depositación es considerado como planicie costera de transición a marino somero.
- **Formación Rosablanca:** Originalmente descrita por Wheeler (1929), corresponde a un ambiente medio marino somero en condiciones neríticas, lo que indica una transgresión al inicio del cretácico, está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia el techo de la Formación consta de areniscas y lodolitas calcáreas, es concordante con la suprayacente Formación Paja.
- **Formación Paja:** Fue descrita inicialmente por Wheeler 1929, su litología consta de lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises, localmente

arenosas, fosilíferas, lo que indica una profundización gradual del mar correspondiendo a un ambiente de depositación epicontinental, esta formación se encuentra en contacto concordante con la suprayacente Formación Tablazo (Morales, et al, 1958).

- **Formación Tablazo:** Originalmente fue definida por Wheeler, constituida por calizas grises a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas. Se encuentra concordante con la suprayacente Formación Simití. (Ward, et al, 1973)

- **Formación Simití:** Descrita por (Morales, et al, 1958), su litología consta de shales grises a negros, carbonosos, levemente calcáreos, con concreciones calcáreas hasta de 3 m y con intercalaciones de areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas, en capas delgadas. Se encuentra en contacto concordante con la suprayacente Formación La Luna. Su ambiente de depositación fue marino somero o nerítico de aguas intermedias a profundas.

2.1.2.3.2. Secuencias litológicas del Cretácico Superior

- **Formación La Luna:** Originalmente fue descrita como “La Luna Limestone” por Hedberg (1931) adquiere este nombre de los afloramientos dispuestos en la Quebrada La Luna al NW de Perijá, Zulia (Venezuela); debido a su gran extensión su nombre prevalece en Colombia Nororiental. Su litología es de calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior; su contacto con la suprayacente F. Umir tiene una leve discontinuidad (Morales, et al, 1958). Esta

unidad se subdivide en tres miembros descritos por (Morales, et al, 1958) de base a techo corresponden los nombres de Miembros Salada, Pujamana y Galembo, las cuales se pueden definir apropiadamente por la clasificación de Folk en la variación de biomicrita.

- *Miembro Salada:* Morales et al. (1958) lo define en la parte inferior como shales calcáreos finamente laminados en capas delgadas, en el V.M.M se reconocen también unas pocas capas de caliza negra y textura fina que están presentes con cintas y concreciones de pirita (Ward, et al, 1973) de acuerdo con la clasificación según Folk, se reconoce por biomicritas de foraminíferos plantónicos consolidando la propuesta acerca de la transgresión más notable del Cretácico en el VMM. Sarmiento (2015) describe este miembro como biomicritas compactas con laminación plana paralela intercaladas con capas medias a gruesas de biomicritas recristalizadas color gris claro reconociéndolas en sección delgada como pseudoesparitas, se encuentran predominantemente foraminíferos plantónicos y presencia de microbivalvos fragmentados y bioclastos fosfáticos, en su segmento intermedio es notable las capas finas de “chert diagenético”, es apreciable la baja densidad de concreciones discoidales formadas durante la diagénesis temprana. Su clasificación según Dunham es de Packstone sobre Wackestone. Las biomicritas recristalizadas y biomicritas parcialmente silicificadas de “chert biogenético” se relacionan con el aporte terrígeno extracuenca, que se ha reportado como lluvia de cenizas volcánicas. (Sarmiento, 2015)

- *Miembro Pujamana:* Es descrito por Morales et al (1958) como un intervalo de shales grises a negros, calcáreos finamente estratificados y se reconoce por biomicritas de foraminíferos plantónicos y bentónicos que contienen material fino terrígeno lo que ocasiona disminución en la porosidad comportándose como un auto-sello dentro de La Luna, es común la silicificación

parcial de la matriz y de los microfósiles y hacia el techo capas tabulares y nodulares de “chert diagenético” (Sarmiento, 2015)

- *Miembro Galembo:* Se reconoce por sus capas fosfáticas medias a muy gruesas entre las biomicritas, situación que persiste hasta el techo de Galembo. En este miembro predominan los foraminíferos bentónicos fosfáticas, con material terrígeno (arcilla y limo muy fino) Este miembro representa la progresiva somerización de la Formación La Luna a una plataforma somera que episódicamente alcanza ambientes costeros donde forma parte el material terrígeno aunque su aporte sigue siendo restringido (Sarmiento, 2015)

Sarmiento, (2015), interpreta la Formación La Luna como una unidad transgresiva sobre una plataforma de mar abierto distal (Miembro Salada), que progresivamente va somerizando (Miembro Pujamana), hasta desarrollarse en una plataforma somera próxima costera con aporte de abundante material fosfático y la participación restringida de terrígenos (Miembro Galembo).

- **Formación Umir:** Propuesto por Huntely en 1917; litológicamente consta predominantemente de shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos, con intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas así como mantos explotables de carbón. Los mantos de carbón y las capas de areniscas en la formación Umir son más frecuentes hacia la parte media superior, las areniscas varían de base a techo de Sublitoarenitas a litoarenitas, lo que indica un aumento de los componentes líticos que principalmente son de clastos volcánicos y metamórficos de bajo grado (Guerrero, 2012) esto sustenta el aporte de material terrígeno desde el occidente ocasionada por la apertura del levantamiento de la Cordillera Central (Gómez, et al, 2003) y a la consecuente conformación de ambientes muy someros, a manera de mares restringidos con ocasionales desarrollos de áreas

pantanosas con los respectivos depósitos de materia orgánica, posteriores formadores de mantos de carbón (Sarmiento, 2015). Su edad es del Campaniano Maastrichtiano de acuerdo a varios estudios palinológicos realizados por varios autores (Sarmiento, 2015). Su contacto con la suprayacente Formación Lisama es Concordante mientras que con su infrayacente Formación Luna es discontinua. (Morales, et al, 1958)

2.1.2.4. Unidades del Paleógeno: Sus unidades litoestratigráficas se relacionan a ambientes principalmente continentales de carácter fluvial, predominando las facies clásticas arenosas.

- **Formación Lisama:** Fue descrita originalmente por en (Morales, et al, 1958) con localidad tipo en la Quebrada Lisama, la cual es tributario del Río Sogamoso. Está constituida por lodolitas varicoloreadas, e intercalaciones de arenitas grises a grises verdosas, localmente estratificación cruzada de grano fino a medio más hacia el tope, así como delgados mantos de carbón poco desarrollados. Su ambiente de depositación corresponde a la transición de ambientes marinos someros de la Formación Umir a depósitos deltáicos y de planicies aluviales (Moreno et al. 2011, Nie et al. 2012) Su contacto con la suprayacente Formación La paz está determinada por una discordancia regional bien marcada. El espesor alcanza hasta 1.225 m. Su edad ha sido establecida como Paleoceno Tardío mediante palinología (Ward, et al, 1973).

- **Formación La Paz:** Descrita originalmente en (Morales, et al, 1958). Adquiere su nombre de la serranía o escarpe extendido entre el Río Sogamoso y el Río Lebrija, ríos que cortan perpendicularmente la Unidad, al igual que el Río Sucio. Su localidad tipo está en la angostura del Río Lebrija, por la vía férrea, su espesor es bastante variable llegando a 1500m al sur de la localidad tipo hacia el cierre del Sinclinal del Nuevo Mundo, (Caballero, V., Parra, M. & Mora, A.R. 2010). La secuencia estratigráfica está compuesta por areniscas conglomeráticas de color

gris, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises, su ambiente de depositación corresponde a ambientes de alta energía asociados a abanicos aluviales canaliformes y a ríos trezados. Su contacto superior con la Formación Esmeraldas es concordante y transicional. La unidad se considera del Eoceno medio a Tardío. (Jaramillo & Dilcher, 2001; Pardo & Roche, 2009).

- **Formación Esmeraldas:** Su nombre corresponde a la localidad tipo la cual se encuentra cerca al caserío Esmeraldas junto al Río Sogamoso en el Flanco Este del Sinclinal del Nuevo. Originalmente descrita en (Morales, et al, 1958). Su litología consiste de intercalaciones de areniscas grises y verdosas, de grano fino, con limolitas y lutitas moteadas de rojo, púrpura y pardo en consecuencia de su alto contenido de materia orgánica también contiene algunas capas delgadas de carbón. Corresponde a un ambiente asociado a sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos que varían hacia el norte a llanuras baja lacustres afectadas posiblemente por influencia marina (Caballero, 2010). Su contacto presenta una posible discordancia con la Unidad suprayacente (Formación Mugrosa) (Caballero, 2010). Su edad es Eoceno superior, basada en estudios Palinológicos. (Ward, et al, 1973).

- **Formación Mugrosa:** Nombrada originalmente en (Morales, et al, 1958). Adquiere su nombre de la quebrada Mugrosa, está constituida por lodolitas varicoloreadas con tendencia a los colores rojizos y amarillos sobre los tonos grises con mucha menor proporción de intercalaciones de areniscas de grano muy grueso a conglomeráticas, grano decrecientes (Caballero, 2010), en el VMM localmente se encuentra un horizonte fosilífero hacia el tope de la formación con evidencias de gasterópodos de agua dulce, unos pocos huesos de peces y caparazones de tortugas (Ward, et al, 1973). Su ambiente de depositación corresponde a sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos (Caballero, 2010). Su contacto con la Formación suprayacente

(Formación Colorado) es concordante. Se le asigna una edad de Oligoceno inferior a medio (Ward, et al, 1973).

- **Formación Colorado:** Adquiere su nombre del Río Colorado localizado al sur del SNM en el Campo Cira-Infantas. Esta unidad consiste predominantemente de arcillolitas pardo-rojizas, con intercalaciones de areniscas, de grano grueso a conglomeráticas, en capas de espesor variable en su parte inferior, mientras que la parte superior las arcillolitas adquieren colores de gris oscuro a negras, son carbonosas, fosilíferas, con intercalaciones de arenisca, de grano medio, en capas delgadas. Se considera que los sedimentos de esta unidad se depositaron bajo condiciones fluviales. El espesor es variable entre 1.200 y 2.500 m. Su contacto suprayacente con el Grupo real es discordante. La unidad es considerada como del Oligoceno superior al Mioceno inferior (Ward, et al, 1973).

2.3 Geología Estructural

Santander es un territorio con una Geología bastante compleja y una tectónica con actividad reciente. A escala regional se reconocen 3 regiones con rasgos estructurales diferentes. La región Oriental con fallamiento en bloques; la Central con un estilo de plegamiento y fallamiento inverso, y la región Occidental, que corresponde con la depresión graben del Magdalena.

En el Valle Medio del Magdalena se agrupan tres zonas estructuralmente diferenciadas: la zona oriental, caracterizada por la presencia de estructuras con tendencia NE-SW, representadas predominantemente por sistemas de cabalgamientos con vergencia principal hacia el Occidente. En profundidad se presentan estructuras de tipo duplex y en menor cantidad, estructuras de inversión heredadas de fallas Jurásicas y Cretácicas, la zona central poco deformada, con algunas fallas normales fosilizadas, y La zona occidental presenta fallas inversas y cabalgamientos con

vergencia principal hacia el Oriente con una fuerte componente transpresiva (Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Buchelli, F., Sotelo, C., 2001)

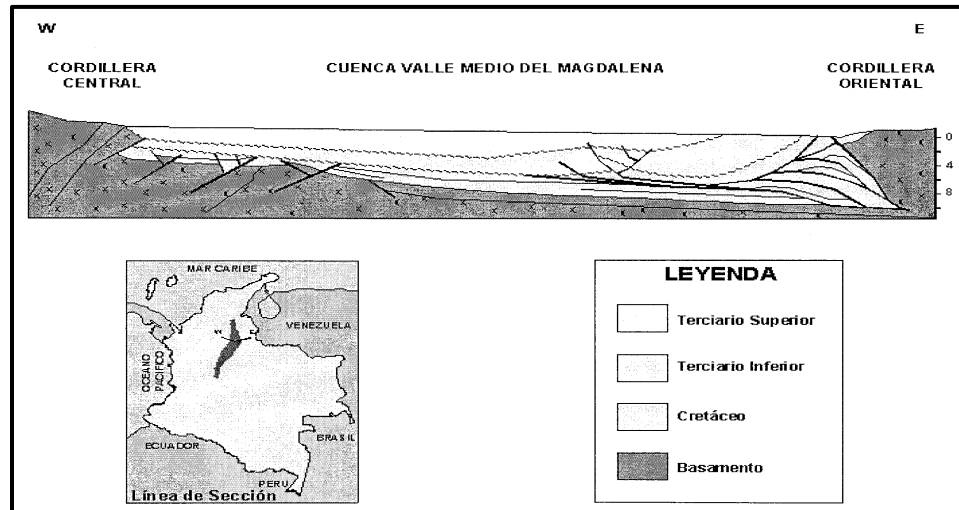


Figura 5. Sección estructural de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, tomado de (Córdoba, 2010)

El área de estudio se encuentra en la región estructural central del departamento de Santander, más específicamente en la zona estructural oriental del Valle Medio del Magdalena, al oeste de la Falla Bucaramanga-Santa Marta, sus rasgos estructurales predominantes corresponden a la Falla Lebrija, la Falla Solferino, la Falla del Río Cáchira, Falla de Cuesta Rica, Falla de La Salina; Anticlinal y Sinclinal de Vanegas, Sinclinal Arévalo, y el flanco oriental del Sinclinal del Nuevo Mundo

2.3.1. Sistema de Fallas de Bucaramanga: Es el rasgo regional más significativo, con dirección aproximada N20°W este es considerado como un sistema de fallas de rumbo con movimiento sinextral, (Campbell, 1965); con desplazamientos verticales importantes, que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como inversa (Julivert, 1958) y en su extremo meridional aún de cabalgamiento (Boinet, T., Bourgois, J., y Mendoza, H., 1981). Su importancia radica en la contribución al desarrollo del Valle del Magdalena y al levantamiento del Macizo de Santander.

2.3.2. Falla Lebrija: Esta falla tiene un rumbo sinuoso en dirección NNW con un buzamiento ligero sobre la Formación Umir en el sector de la Quebrada Salamaga, se localiza al oeste de la vereda Vanegas y se visualiza desde la cabecera de la quebrada Salamaga correspondiente a la vereda Montevideo, hacia su parte más sur de la plancha en el municipio de Rionegro se encuentra su principal desplazamiento vertical donde coloca rocas del Terciario con la Formación Bocas de edad Jurásico medio comportándose aparentemente como una falla de rumbo. Debido a que los depósitos cuaternarios que la cubren no registran actividad reciente, se podría considerar como una falla inactiva. La actividad de esta falla ocasionó los buzamientos verticales de las formaciones Lisama y Umir, en el sector norte de los flancos oriental y occidental del filo La Paz, conformando un paisaje de espinazo o “Hog Back” y laderas monoclinales con Chevrones (Alcaldía de Lebrija, 2003). En el área de estudio no fue posible encontrar evidencias del comportamiento de esta falla.

2.3.3. Depresión Estructural de Vanegas: Esta área está limitada al oeste por la falla de Lebrija y al este por la falla Solferino; las unidades estratigráficas corresponden a formaciones pre-Cretáceas y Cretáceas de dirección noreste o noroeste. La depresión parece ser el resultado de movimientos en la Falla de Solferino y levantamiento en el norte, donde la Formación Bocas está ampliamente expuesta e intruída por un cuerpo alargado de riolita que probablemente ha sido un factor en el levantamiento. Entre esta depresión existen gran cantidad de fallas y plegamientos con direcciones que van desde el noroeste al noreste (Ward, et al, 1973).

2.3.4. Falla de Cuesta Rica y Sinclinal Vanegas: La falla Cuesta Rica es paralela a la falla del río Cáchira, es local y bien definida, tiene una dirección NW-SW y divide los diferentes tipos de roca que se formaron en el cretáceo inferior (CDMB, 2010); en la parte noroeste la falla Cuesta Rica interseca la Falla Lebrija desplazándola un poco más hacia el noroeste y desaparece en los estratos del Terciario al oeste de la Falla Lebrija (Ward, et al, 1973). Según Ward (1973) el flanco oriental del anticlinal de Vanegas se une al sinclinal del mismo nombre, que cabecea suavemente hacia el sur y desaparece debajo del material aluvial del río Lebrija. El eje sinclinal está bien definido hacia el norte hasta la Falla de Cuesta Rica, que sigue el eje aproximado del sinclinal al noroeste.

2.3.5. Anticlinal Vanegas: Ward (1973) define esta estructura con un suave cabeceo y el eje algo ondulante, puede trazarse por unos 14 km, desde la Formación Girón en el norte, hasta la Formación La Luna, en el sur. En vista de su longitud y persistencia, el anticlinal probablemente continúa hacia el sur en la Formación Umir, aunque esto no es evidente.

2.3.6. Falla Solferino: De acuerdo con Ward (1973) esta falla provoca que la Formación Girón en apariencia cabalque ligeramente hacia el oeste sobre las formaciones del Cretácico en una distancia de 5 a 6km a lo largo de la Falla de Solferino. Al oeste de la falla, los estratos cretácicos adquieren una posición invertida de sus buzamientos normales hacia el oeste en el norte y sur en respuesta a la deformación ejercida por la falla citada.

2.3.7. Falla Río Cáchira: Esta falla en su extremo occidental tiene comportamiento inverso con dirección NE-SW lo que provoca el cruce de unidades Jurásicas con Cretácicas principalmente (CDMB, 2010), sin embargo en gran parte de su extensión tiene comportamiento normal con un alto ángulo de inclinación hacia el este con rumbo nor-noreste (Arias, 1978).

2.3.8. Sinclinal Nuevo Mundo: En general este sinclinal representa una estructura amplia ligeramente asimétrica donde su eje está recargado hacia su flanco occidental, posiblemente a causa del fuerte levantamiento a lo largo del lado oriental de la Falla la Salina; al sur del Río Sogamoso el eje presenta un desplazamiento hacia el oeste probablemente ocasionado por una falla en dirección oriente-occidente a lo largo del Río Sogamoso bajo los depósitos aluviales (Royero, 2001).

2.3.9. Sinclinal Arévalo: Es un sinclinal con suave cabeceo hacia el sur con dirección norte- noroeste es el mejor definido de varios pliegues que ocurren al este de la Falla del Río Cáchira, se encuentra cerca del flanco oriental de la Depresión Estructural de Vanegas (Ward, et al, 1973).

3. Metodología

3.1. Fase 1: Recopilación Bibliográfica

Se colectó y seleccionó información correspondiente a la Formación La Luna, geología regional y local de la zona de artículos científicos, libros, proyectos de grado, boletines geológicos y páginas web científicas, además de estudios con relación a mineralización aurífera en rocas carbonatadas que pudieran ser correlacionados y útiles para el alcance de este proyecto.

3.2. Fase 2: Campo

En primera instancia, se hizo el reconocimiento de campo con el fin de tener una visión general de la expresión geológica de la zona y los afloramientos que llamaron la atención para la empresa Alicanto Colombia S.A.S. A partir de eso, se delimita un área de 20 km² en la plancha topográfica 109-I-D, para hacer la respectiva cartografía a escala 1:25.000.

Durante la cartografía se recolectó información de 65 estaciones de trabajo de campo, 40 puntos de control, y dentro de la misma, se levantaron dos secciones estratigráficas a escala 1:100 (del Miembro Salada y el Miembro Galembo) en dos perfiles escogidos por la empresa. se tomaron 104 muestras de mano de las cuales 9 se escogieron para realizarles secciones delgadas (5 de éstas fueron analizadas por SEM) y 3 para análisis geoquímico. Además, se toman 136 datos de estratificación, y 125 datos de familias de diaclasas en Azimut/ Buzamiento, tomados con el método de la mano derecha.

Para el levantamiento de las columnas estratigráficas se usó un bastón de Jacob de 1.50 m el cual se alinea perpendicular a la adyacencia de las capas y con ayuda de un láser y pintura, se marcó cada bastón con su número consecutivo. Ya en un formato de columnas, se representa 1

m de roca en 1 cm de la hoja para un detalle a escala 1:100. En dicho formato se escribe la enumeración de los bastones, dato de estratificación, dibujo de la columna con espesores de las capas, contactos, nomenclatura de la litología, tamaño de grano, estructuras/ fósiles y observaciones. La localización de cada columna se encuentra en los apéndices B y C.

3.3. Fase 3: Análisis en laboratorio

- **Análisis petrográfico**

Se estudiaron 10 secciones delgadas en el laboratorio de microscopía óptica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, utilizando un microscopio de luz transmitida marca NIKON ECLIPSE E200, por el método cuantitativo de conteo de puntos en intervalos de 1.5 mm, para su respectiva clasificación composicional y textural. Las clasificaciones se basaron en Dunham (1962) y Folk (1959, 1962 y 1974), y se siguieron los parámetros establecidos en las guías de laboratorio de sedimentología elaboradas por Caballero y Cruz (2007).

- **Análisis químico por Espectrometría de Masas**

Con base en la información obtenida en campo, se escoge la sección “Quebrada Vanegas” (ver apéndice de columnas) del Miembro Salada, Formación La Luna para el estudio de posible mineralización de oro invisible, del cual se tomaron 2 muestras representativas de ese perfil (biomicrita rica en materia orgánica y pseudoesparita) y otra muestra (biomicrita rica en materia orgánica) tomada fuera del área para confrontar resultados. La técnica de análisis químico utilizado fue la de espectrometría de masas (ICP-MS) elemento Utratrace 1, realizada en el laboratorio Actlabs Colombia S.A.S. el cual corresponde a un análisis de 63 elementos por digestión con Agua Regia y determinación final por ICP-MS que proporciona oro (Au) cuantificado de forma parcial.

- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

Fue desarrollado en el laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander por Carlos Villarreal. Las muestras fueron recubiertas con carbono y el equipo utilizado fue el microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650, con los detectores para imágenes: Electrones secundarios, Everhart Thornley detector ETD, para observar morfología y electrones retrodispersados, Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD, para observar composición. Para análisis químico el equipo utiliza un voltaje de aceleración de 20Kv y el detector EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy), y se usa el software EDX Genesis para obtener información semi-cuantitativa de los elementos químicos. El estudio se realizó a 4 calizas con la finalidad de identificar la composición de opacos no identificados en petrografía y finalmente complementar los demás estudios. La interpretación de los resultados se basó en el libro SEM Petrology Atlas (Welton, 2003).

- **Difracción de rayos X (DRX)**

Este estudio fue realizado para la identificación composicional de una arcilla y una caliza (pseudoesparita). Para ello, las muestras fueron molturadas y homogenizadas en un mortero de ágata y luego llevadas al laboratorio de difracción de rayos X del Parque Tecnológico Guatiguará, UIS a cargo del profesor Jose Antonio Henao. La muestra de arcilla tuvo dos procedimientos, un análisis en seco y otro en el cual se adicionó Etilenglicol para observar si se trata de una arcilla expansiva. El equipo utilizado fue un difractómetro de polvo de marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría de Da vinci y con el software EVA, se realizó la respectiva interpretación mediante comparación de los difractogramas obtenidos con los perfiles de difracción de la base de datos PDF-2 2004 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

3.4. Fase 4: Trabajo de Oficina

- **Elaboración del catálogo de muestras**

Se elabora un catálogo con la totalidad de las muestras Con todas colectadas en la fase de campo, en el que se incluye foto, localización, descripción y observaciones. Aquí se especifica a cuáles de ellas se les hizo sección delgada y/o análisis químico. La descripción de las muestras se basa según las clasificaciones de Dunham (1962) y Folk (1959, 1962 y 1974). El catálogo incluye mapa geológico con la georreferenciación de las muestras.

- **Elaboración de mapas, columnas estratigráficas y corte estructural**

De acuerdo a la información recolectada en campo, se georreferencian las estaciones, contactos litológicos, datos estructurales y estratigráficos en un mapa cartográfico base escala 1:25.000 de la Plancha 109-I-D obtenido de la base de datos abiertos del portal del IGAC, procediendo a la respectiva digitalización del mapa geológico del área de estudio a escala 1:25.000, utilizando el software QGis; para la digitalización de las columnas y el corte estructural se utilizó el software de licencia libre SedLog y Corel Draw X8 respectivamente.

3.5. Fase 5: Interpretación de resultados

Con base a los resultados obtenidos, se reúne información bibliográfica que permita correlacionar estos resultados con la posibilidad de mineralización de oro invisible en capas carbonatadas (calizas) del Miembro Salada, de la Formación La Luna y su posible relación con un tipo de yacimiento que permita explicar o provocar discusión a la presencia de oro invisible en caso de ser favorable los resultados.

4. Generalidades

4.1. Localización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada en la vereda Vanegas del municipio de Lebrija, Santander, dentro del polígono de exploración del “Proyecto Rionegro de Alicanto S.A.S.”

El área de interés abarca 20 km² y se ubica dentro de la plancha topográfica del IGAC 109-I-D escala 1:25.000, definida con las siguientes coordenadas:

Tabla 3. Coordenadas del área objeto de estudio

Punto	Norte	Este
1	1306150 m	1081850 m
2	1306150 m	1087450 m
3	1302550 m	1081850 m
4	1302550 m	1087450m

Se toma como referencia de origen las coordenadas planas ubicadas en Bogotá D.C.: X=1'000.000; Y:1'000.000, adoptadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

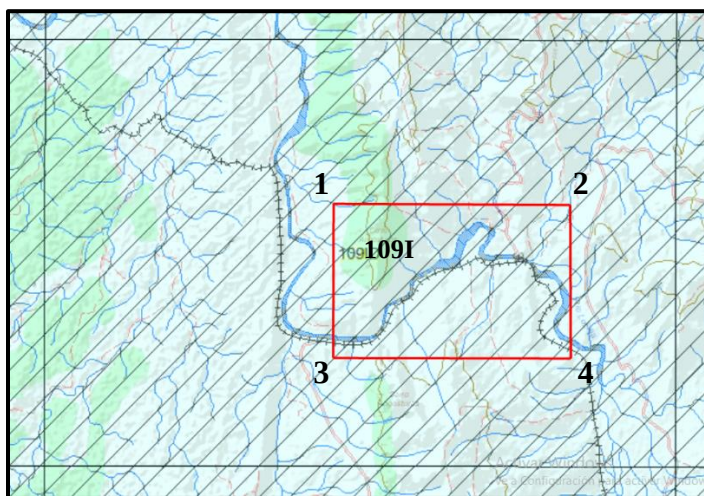


Figura 6. Localización del área con un polígono rojo, sobre la plancha 109-I-D. Imagen tomada del Geoportal del IGAC.

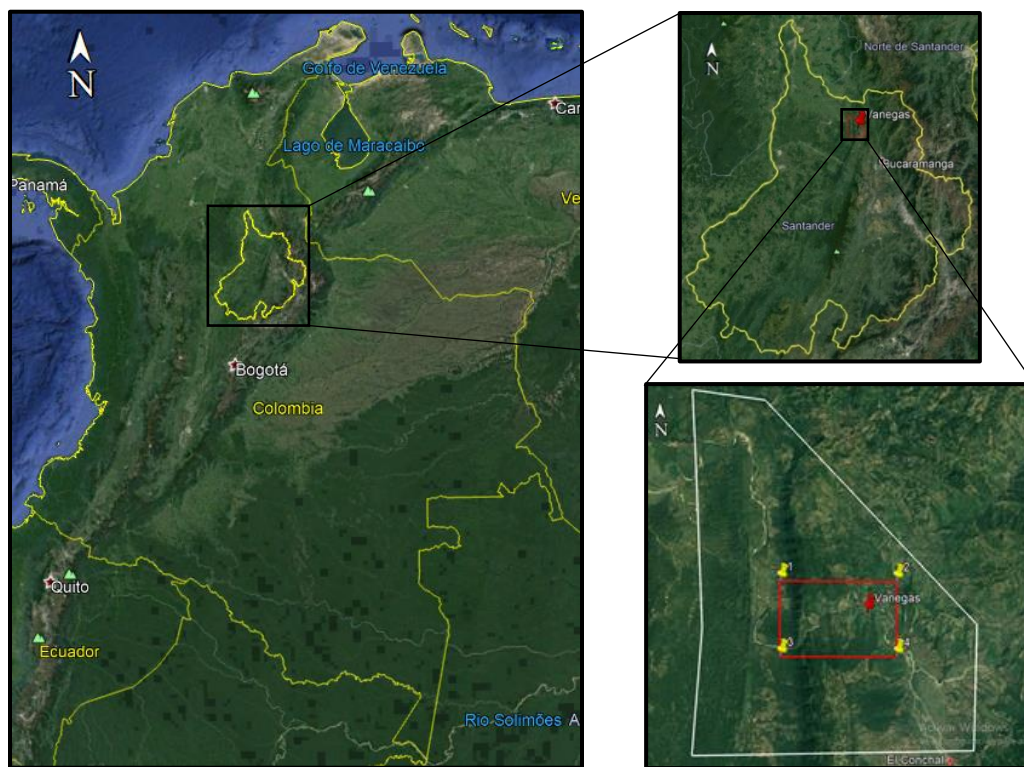


Figura 7. Localización del área de estudio. El polígono blanco representa el área que abarca el permiso de exploración Proyecto Rionegro y en rojo, el área de estudio de 20 km². Imágenes tomadas de Google Earth.

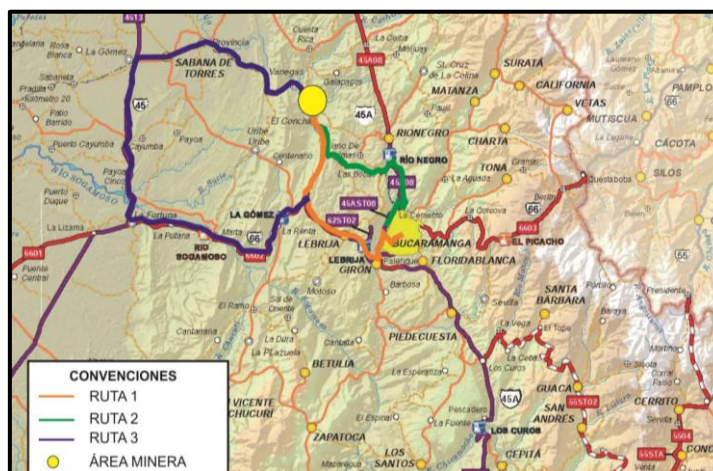


Figura 8. Vías de acceso al área de estudio. Imagen tomada del PTO Contrato de concesión JG3-16392 de Alicanto S.A.S.

Tabla 4. Vías de acceso al área de estudio.

Tramos	Distancia (Km)	Estado de la vía	Nombre de la vía
Ruta 1			
Bucaramanga a Brisas	12	Pavimentada	66
Brisas al Conchal	12	Sin pavimento	Antigua línea ferrocarril
Conchal a Salamaga	3	Sin pavimento	Antigua línea ferrocarril
Ruta 2			
Bucaramanga a El Cero	8	Pavimentada	I - 45
El Cero a Bocas	2	Pavimentada	Desvío a Bocas
Bocas a Salamaga	22	Sin pavimento	Antigua línea ferrocarril
Ruta 3			
Bucaramanga a la Fortuna		Pavimentada	66
La Fortuna a Sabana de Torres		Pavimentada	45
Sabana de Torres a Provincias		Pavimentada en intervalos	
Provincia a Salamaga		Sin pavimento	Antigua línea ferrocarril

Nota: Adaptado del “PTO Contrato de concesión JG3-16392 de Alicanto S.A.S”.

4.2. Aspectos Fisiográficos

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio se enmarca dentro de la zona de transición entre el Valle del Magdalena y la Región Andina propiamente dicha, presentando escarpes y laderas de baja pendiente a ligeramente planas, con alturas que van desde los 160 a los 620 m.s.n.m. Las formas del relieve responden a la distribución de unidades sedimentarias más competentes y menos competentes cuya orientación preferente es NW-SE, y al modelado de los procesos denudacionales y estructurales del terreno.

Las áreas aledañas al cauce principal del Río Lebrija y el Río Cáchira, se caracterizan por sus pendientes planas resultado del modelado fluvial y depósitos aluviales a lo largo del tiempo. Dichos depósitos son de gran importancia económica para la región, debido a la presencia de pequeñas partículas de oro cuya posible proveniencia sea el distrito minero Vetás-California, a través del Cauce del Río de Suratá.

Hidrográficamente, los principales afluentes de la subcuenca del Río Lebrija son el Río Cáchira (desde el noreste) y el Río Salamaga (desde el sureste). Hacia el Sur, desde la Vereda Montevideo, recibe varios afluentes de menor tamaño paralelos a subparalelos pertenecientes a la microcuenca Montevideo-Vanegas. (Quebrada Seca, Caño La Frontera y Quebrada Oriente) y hacia el norte de la Vereda Cuesta-Rica (Caño los fríos y Quebrada Geras).

De acuerdo con la estación meteorológica, la temperatura media anual es de 25°C, siendo máxima en el mes de febrero (30°C), de un clima monzónico y tropical de Sabana, cuya precipitación media anual es de 1902 mm y humedad media de 77%.



Figura 9. Fotografía panorámica que muestra la geomorfología de escarpes y laderas de baja pendiente del área de estudio. Al costado derecho, Río Lebrija. Coordenadas: E: 1085654, N: 1305656, H: 220 $\pm$ 3, vía Vanegas-Cuesta Rica. Orientación de la foto: 158°N en azimut.

5. Marco Geológico del Área de Estudio

El área de estudio se ubica al oriente de la cuenca del Valle Medio del Magdalena y en el límite noroccidental de la Cordillera Oriental más específicamente en la región definida por (Ward, 1973) como la Depresión Estructural de Vanegas la cual está limitada al occidente por la Falla Lebrija y al oriente por la Falla Solferino donde afloran unidades de rocas sedimentarias de edad Cretácica y Paleógena, y materiales no consolidados del Cuaternario.

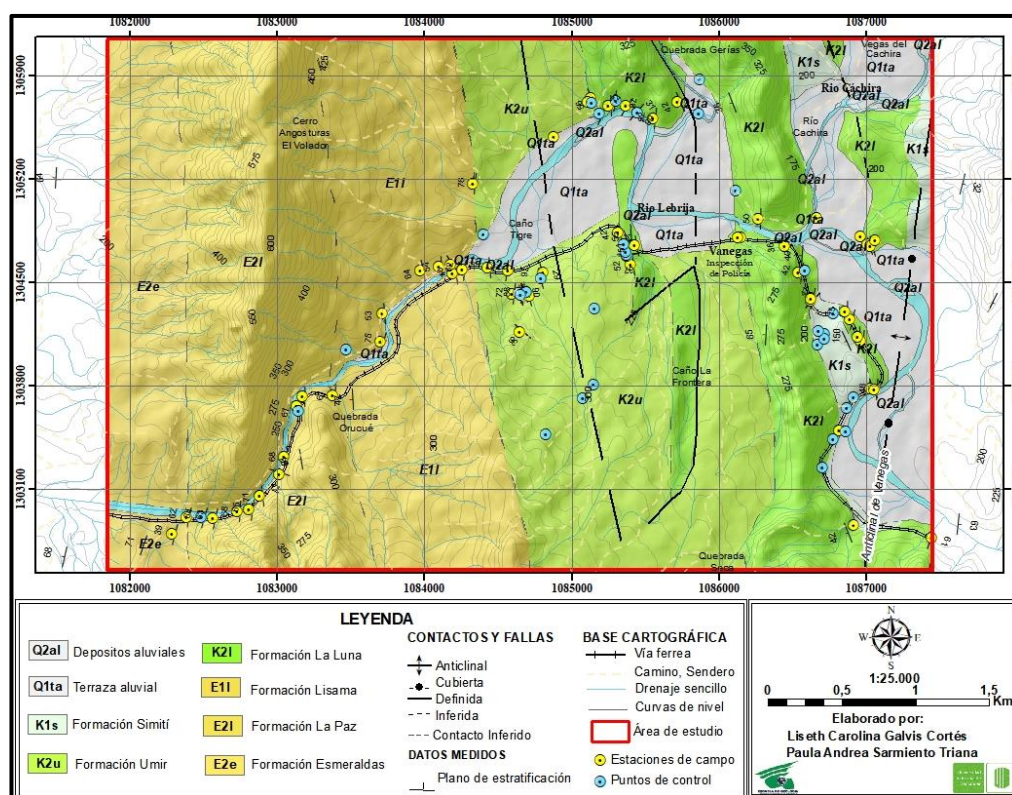


Figura 10. Mapa geológico de 20 km² en el sector Vereda Vanegas, escala 1:25.000. Se ubican las estaciones de campo y puntos de control de campo.

5.1. Estratigrafía

En el área afloran rocas sedimentarias correspondientes a las Formaciones Cretácicas Simití, La Luna y Umir; las Formaciones Paleógenas Lisama, La paz y Esmeraldas (estas últimas hacen

parte del flanco oriental del Sinclinal Nuevo Mundo) y algunos depósitos fluviales del Cuaternario. A continuación, se describe cada formación de acuerdo con la información obtenida en campo.

5.1.1. Unidades Cretácicas

5.1.1.1 Formación Simití (K1s): Aflora en la parte oriental de N a S en el área de estudio; su litología consta de shales grises a grises muy oscuros en estratificación capas delgadas (láminas de 0.5 a 2 cm), no calcáreas. Son poco competentes y fácilmente erosionables y se distingue por las laderas de baja pendiente. En contacto concordante con la infrayacente Formación Tablazo y la suprayacente Formación La Luna.



Figura 11. Formación Simití, aflorando en el área de estudio, laderas muy suaves. Coordenadas de la foto: E: 1086861, N: 1304300, H: 190 ± 3, Vía El Conchal-Vanegas, margen izquierdo de la vía.

5.1.1.2 Formación La Luna (K2l): Aflora en la parte oriental del área; litológicamente se describe de base a techo de la siguiente manera:

Hacia la base, se encuentran lodolitas calcáreas fisiles color gris oscuro a negras de estratificación fina, seguido de capas más competentes (de 5 a 12 cm) de biomicritas de foraminíferos planctónicos (Mudstone a Wackestone) color gris oscuro con gran contenido de materia orgánica y laminación plano-paralela.

Dispuestas de manera paralela a la estratificación, se encuentran impresiones de conchas de bivalvos aplastados del género *Inoceramus*, concreciones (de hasta 9 cm) y galerías paralelas y perpendiculares a esta de 15 a 22 cm (Fig 12.).

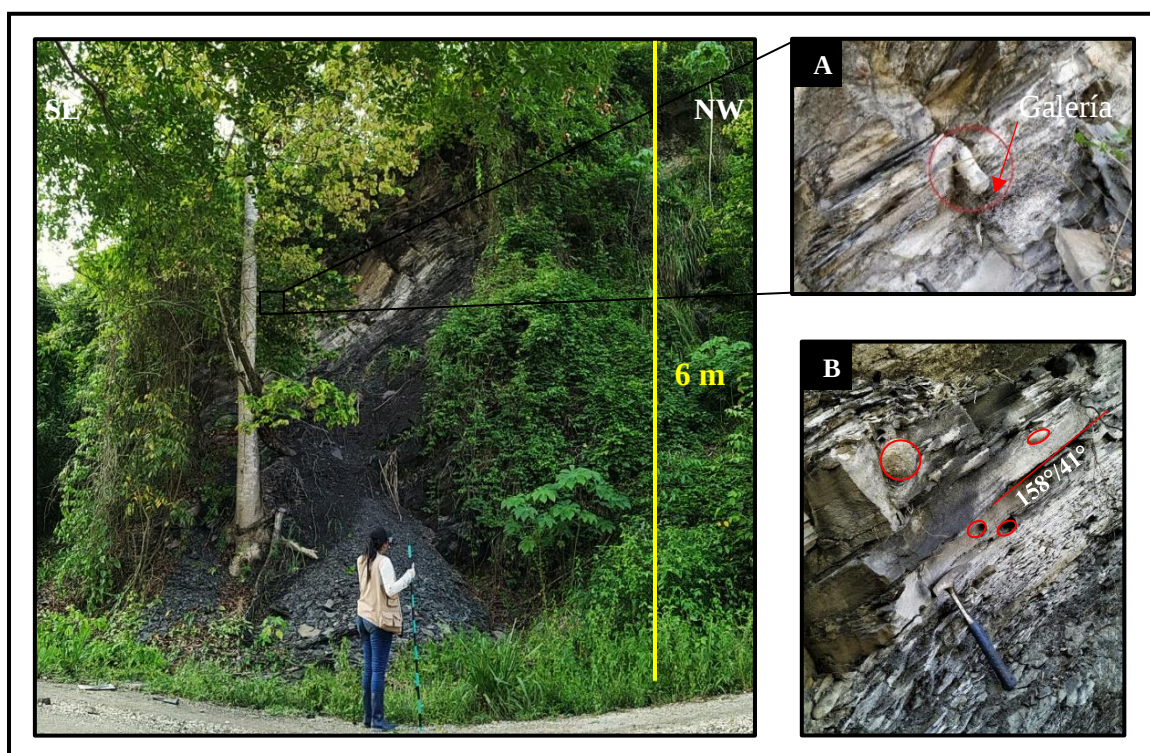


Figura 12. Capas delgadas de lodolita calcárea físil hacia la base de la Formación La Luna, con presencia de galerías perpendiculares a la estratificación (A) y concreciones paralelas a la estratificación de hasta 12 cm. Orientación: 335° en azimut.

Subiendo estratigráficamente, predominan las capas de biomicritas (Wackestone a Packstone) de foraminíferos planctónicos y restos fosfáticos en estratificación media a fina y laminación plano paralela, con esporádicos lentes elongados de chert (Fig. 13.C.) que se intercalan con capas

medias a gruesas de caliza recristalizada muy compacta (pseudoesparita, de 15 a 45 cm de espesor) color gris claro-verduzco y delgados niveles de 1 a 4 cm de arcilla color verde oliva claro que se oxidan y toman un color ocre rojizo. Mayor presencia de concreciones (hasta 60 cm) impregnadas de hidrocarburo solidificado (kerógeno) en fracturas perpendiculares a la estratificación.



Figura 13. A) Impresiones de conchas de *Inoceramus* de la Formación La Luna. B) Sección quebrada Vanegas, donde se muestran varias concreciones de tamaño considerable, y capas tabulares de estratificación delgada a media de biomicritas. C) Lentes de chert y capas de biomicritas de foraminíferos planctónicos con laminación plano-paralela. D) Foraminíferos y fosfato con borde de recristalización de calcita y laminación plano-paralela.

Suprayaciendo estas capas, continúa en estratificación fina, (de 1 a 4 cm) capas de biomicritas (Mudstone>Wackestone) con restos de fosfáticos (de 1 a 4 mm) con laminación plano-paralela. En campo, se encontró la intercalación con una capa de 21 cm (fig. 14.A) de caliza de foraminíferos planctónicos (Mudstone/ Wackestone) con reemplazamiento no homogéneo de sílice observándose una matriz color pardo claro con parches subredondeados de biomicrita color gris oscuro (fig.14.B).

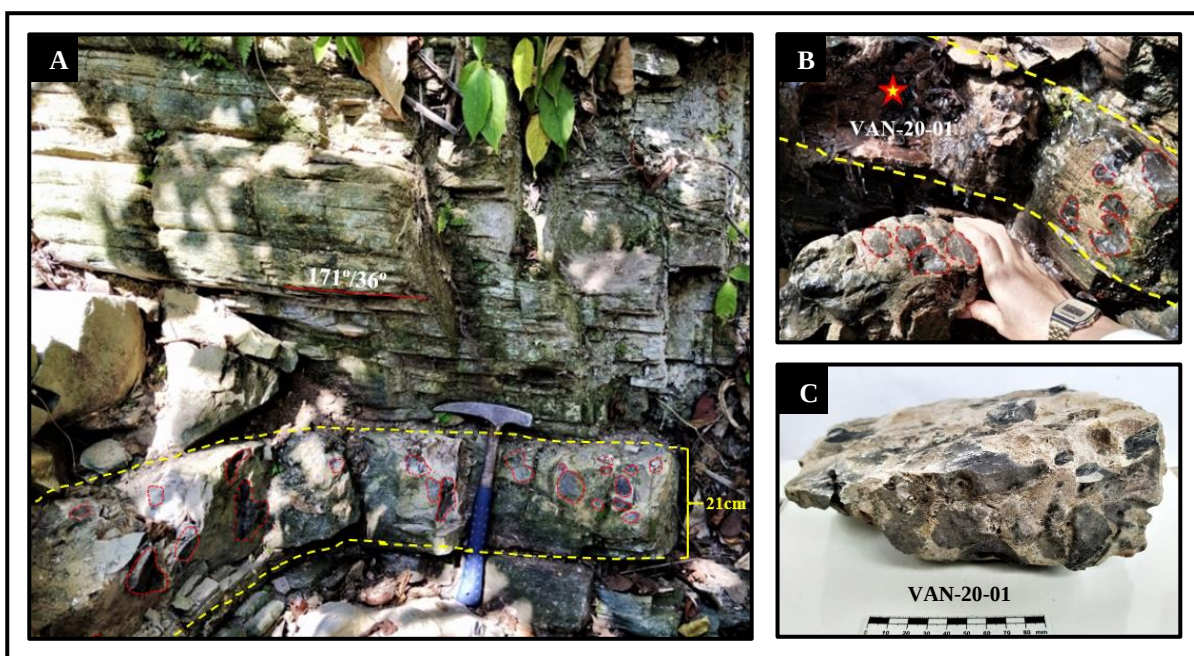


Figura 14. A) Imagen tomada en la estación VAN-20, donde se observa capa con formas subredondeadas de biomicrita con reemplazamiento a sílice intercalada con capas de biomicritas (mudstone>wackestone) de estratificación delgada. B) Lugar donde se tomó muestra de mano VAN-20-01(C).

Hacia el tope, estratificación delgada de capas tabulares de biomicritas de foraminíferos bentónicos intercaladas con capas de caliza lodosa (mudstone), delgados niveles de lodolita color ocre rojizo y fosforitas en estratificación tabular delgada a media. Concreciones de hasta 55 cm paralelas a la estratificación.

La Formación la Luna se encuentra en contacto concordante con la infrayacente Formación Simití y discordante con la suprayacente Formación Umir.

5.1.1.3 Formación Umir (K2u): Ubicada hacia la parte central del área de estudio en sentido NW-SE; comprende capas medias a gruesas de shale gris intercaladas con capas delgadas de lolitas varicoloreadas. No calcáreas. Presenta restos de materia orgánica como hojas y partes de ramas carbonizadas, así como capas de carbón de hasta 40 cm desde la parte media al tope de la Formación.

Se encuentran intercalaciones de shale con capas delgadas de arenisca de grano muy fino a fino con laminación cruzada ondulada o wave cross (Fig.15), con capas estratocrecientes de arenisca de grano fino y bien seleccionadas hacia el tope, que indican su transición a las areniscas de grano fino a medio de la Formación Lisama.

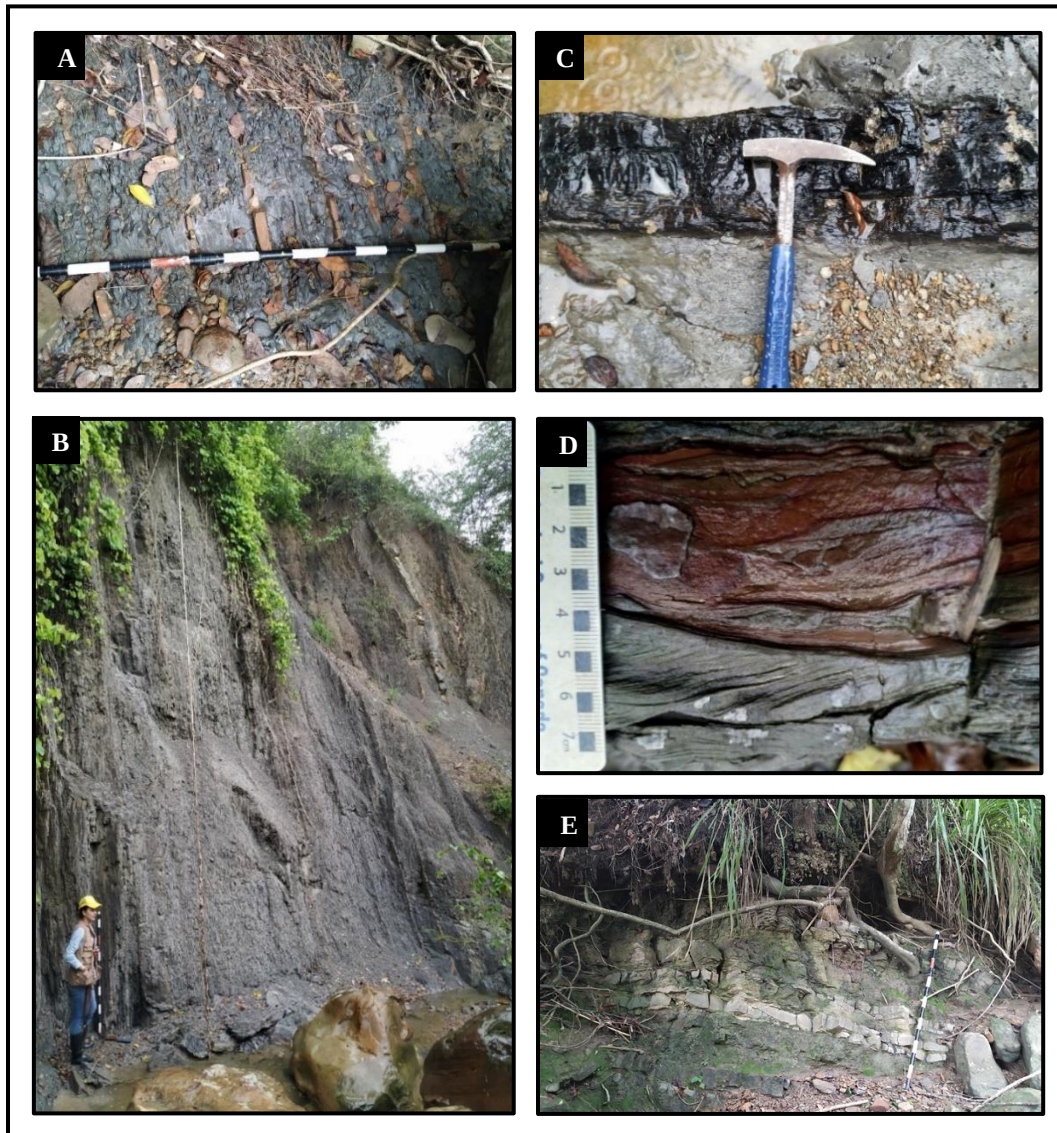


Figura 15. A) Afloramiento de lodolitas grises y varicoloreadas de la Formación Umir. B) Afloramiento de shales de la Formación Umir. C) Capa de carbón de 15 cm. D) Arenisca de grano muy fino a fino con laminación cruzada ondulosa. E) Afloramiento de capas de areniscas hacia el techo de la Formación Umir.

5.1.2. Unidades Paleógenas

5.1.2.1 Formación Lisama (E11): Forma parte del flanco oriental del Sinclinal Nuevo Mundo y se encuentra al oeste del área de estudio en sentido N-S. Constituida por capas estratocrecientes (hasta de 2 m de espesor) de areniscas de grano fino a medio, bien cementadas, color gris verdoso

con abundantes restos de materia orgánica y capas delgadas de arenisca conglomerática de clastos redondeados de lodo ferruginoso acunándose, hacia la base. Estas areniscas presentan laminación cruzada y ocasionalmente laminación ondulosa o sin estructura interna aparente, intercaladas con niveles delgados de lodolitas. Hacia la parte superior, se observan capas estratocrecientes de hasta 25 cm de espesor de areniscas granocrecientes color gris verdoso en contacto erosivo con conglomerados de cuarzo de la Formación La Paz.



Figura 16. A) Detalle de afloramiento de las areniscas de grano fino a medio de la base de la Formación Lisama y capa conglomerática de clastos de lodo ferruginoso. B) Laminación cruzada representativa de la Formación. C) Afloramiento de capas de areniscas de grano medio color verdoso de la Formación Lisama.

5.1.2.2 Formación La Paz (E2l): Aflora hacia el W del área de estudio en sentido NW-SE; constituida por capas muy gruesas y competentes (Fig. 17.D) de arenisca de grano medio a muy grueso, areniscas conglomeráticas y ligeramente conglomeráticas con intraclastos de lodo, asfaltita, chert y otros fragmentos de roca alargados, esféricos y redondeados (Fig.17.A). Las areniscas de la base pueden presentar estratificación cruzada de bajo ángulo observada cerca al puente popularmente conocido como Puente Campana. Subiendo estratigráficamente, se observan capas potentes de areniscas conglomeráticas con clastos de cuarzo aflorando a lo largo de la vía del ferrocarril, las cuales estarían representando canales amalgamados (barras) típicos de un ambiente de ríos meándricos. Hacia el tope, predominan las capas de arenisca color blanco grisáceo adquiriendo colores ocre, rojizos y verdosos por meteorización (Fig.17.C) intercaladas con capas de lodolitas grisáceas y areniscas con laminación flaser (Fig.17. B).



Figura 17. A) Arenisca de cuarzo ligeramente litoconglomerática de la Formación La Paz (líticos de chert, lodolita y cuarzo principalmente). B) Areniscas grises adquiriendo colores ocre por meteorización, de grano medio-grueso, con intraclastos de lodolita color gris claro, hacia el tope de La Paz. C) Afloramiento de capas de arenisca de grano medio intercaladas con capas de arenisca de fino a medio con laminación flaser y lodolitas grises. D) Capas gruesas de arenisca de grano fino a medio ligeramente conglomerática, buzando hacia el W.

5.1.2.3 Formación Esmeraldas (E2e): Esta Formación aflora en la parte más occidental del área de estudio; su litología es principalmente capas tabulares de estratificación fina a media de lodolitas grises y color ocre por meteorización, (Fig.18) intercaladas con capas de areniscas lodosas con laminación flaser con cementación media.

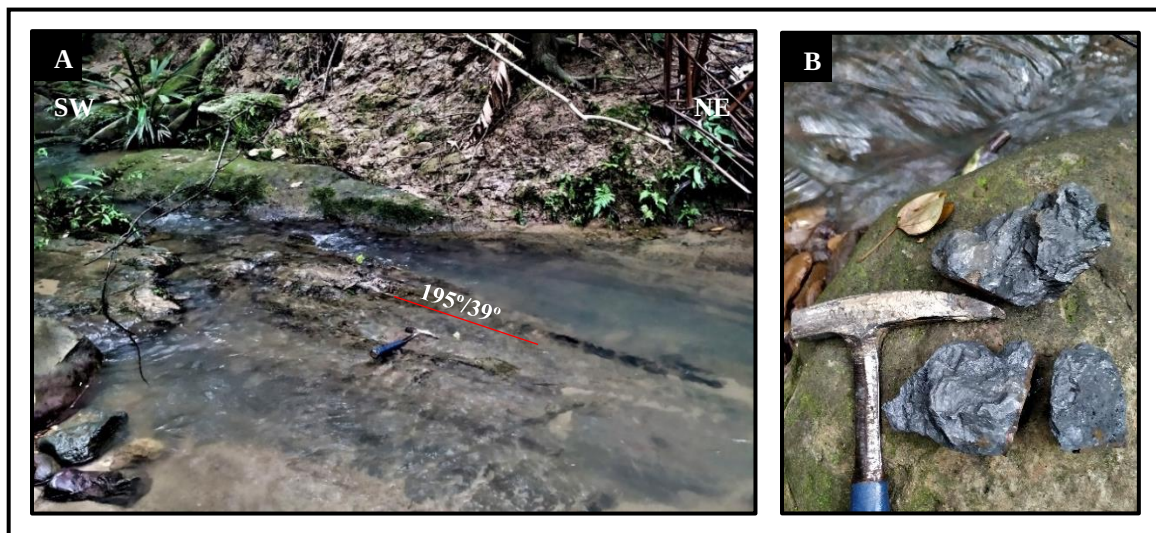


Figura 18. A) Quebrada donde afloran las lodolitas grises con colores de alteración ocre, de la Formación Esmeraldas. B) Muestras de lodolitas color gris tomadas en las capas tabulares que afloran en la quebrada.

5.1.3. Unidades Cuaternarias

- **Terraza aluvial (Q1ta):** Esta unidad se establece en superficies más arriba de la actual superficie de inundación de los ríos Lebrija y Cáchira vistas como laderas planas o de ondulado

suave, sobre las cuales ha habido desarrollo de la ganadería. Son terrazas constituidas por depósitos no consolidados aluviales.

- **Depósitos aluviales (Q2al):** Se encuentran en las áreas topográficamente más bajas en las inmediaciones de los ríos Lebrija y Cáchira; conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluvión y derrubios, generados por la deposición de material de carga fluvial.

5.2. Rasgos Estructurales

A continuación, se describen algunos rasgos estructurales vistos en la fase de campo, evidencia de la tectónica compresiva a la que han sido sometidas las rocas de la secuencia sedimentaria Cretácico-Paleógena en el área.

- **Diaclasas:** Las diaclasas son deformaciones frágiles vistas como fracturas o fisuras sin desplazamiento aparente en los cuerpos rocosos en respuesta a los esfuerzos a los que han sido sometidos.

Estas fracturas funcionan como conductos para el flujo de agua que causa cambios químicos como la disolución en las rocas, así como también, permite el paso de otros fluidos como el hidrocarburo, tal como se observa en la Formación La Luna donde las diaclasas con preferencia vertical presentan buena impregnación de este.

En el área, la dinámica estructural está relacionada con las fallas Lebrija, Cáchira, Cuesta Rica, Solferino y a escala regional, con el sistema de fallas Bucaramanga y la falla de Lebrija. El diagrama de rosas que se muestra a continuación (Fig. 19) refleja la orientación dominante de 125 datos de familias de diaclasas tomadas en campo.

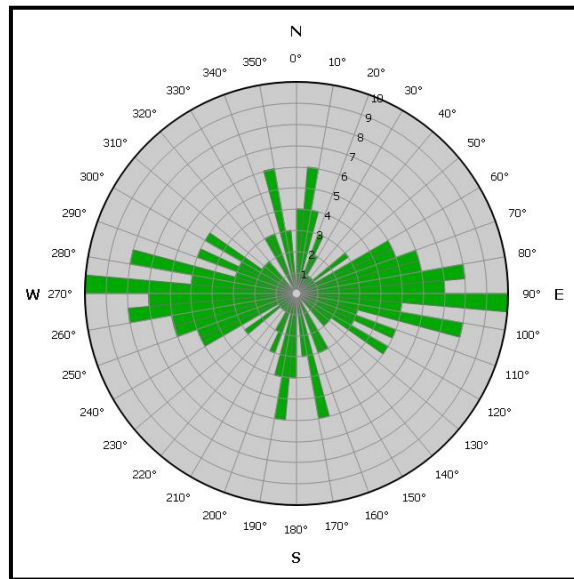


Figura 19. Diagrama de rosas correspondiente al rumbo dominante de 125 familias de diaclasas tomadas en el área de estudio. Elaborado en Georose.

El diagrama muestra mayor densidad de rumbo hacia el Noroeste, con azimut dominante 269 - 276°, que resulta ser casi perpendicular al rumbo de las fallas y los pliegues principales (Anticlinal y Sinclinal de Vanegas) en el área.

- **Pliegues:** Los pliegues son deformaciones dúctiles de la roca en respuesta a esfuerzos compresivos. En el área, se destacan dos estructuras importantes: A nivel local, Anticlinal de Vanegas ubicado hacia la parte más oriental del área, cuyo eje presenta un rumbo de 8° en azimut, y a nivel regional, el Sinclinal Nuevo Mundo, ubicado hacia la parte más occidental del área cuyo eje presenta un rumbo de 26° en azimut aproximadamente.

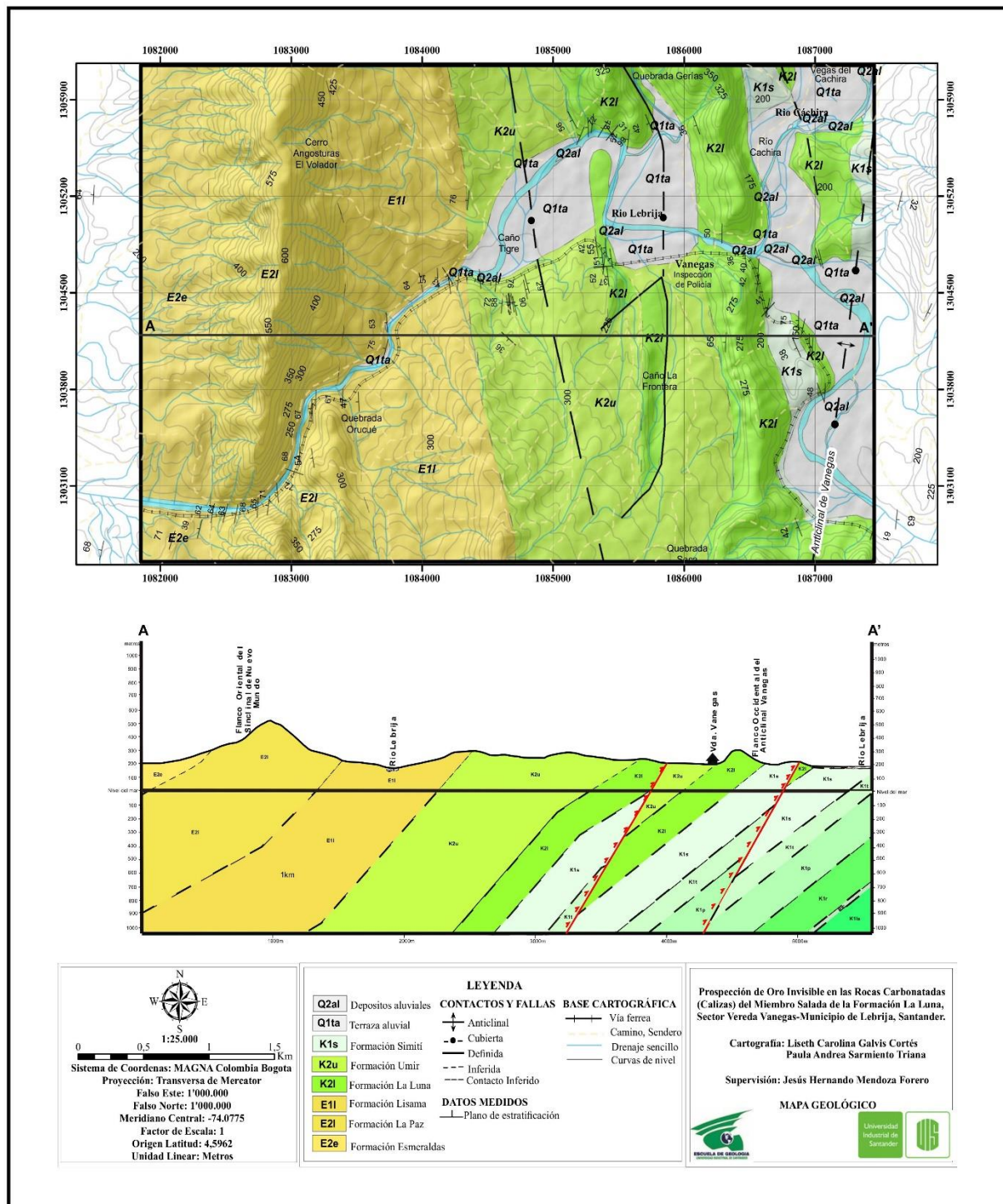


Figura 20. Mapa Geológico con su respectivo corte correspondiente a la sección A-A' en el área de estudio donde se pueden observar los flancos del Sinclinal Nuevo Mundo y del Anticlinal Vanegas.

Otros pliegues menores también se pudieron observar hacia el norte, lado derecho del Río Lebrija (aguas abajo) en La Formación La Luna y en la parte sur en la Formación Umir, como se ve en la figura 21.

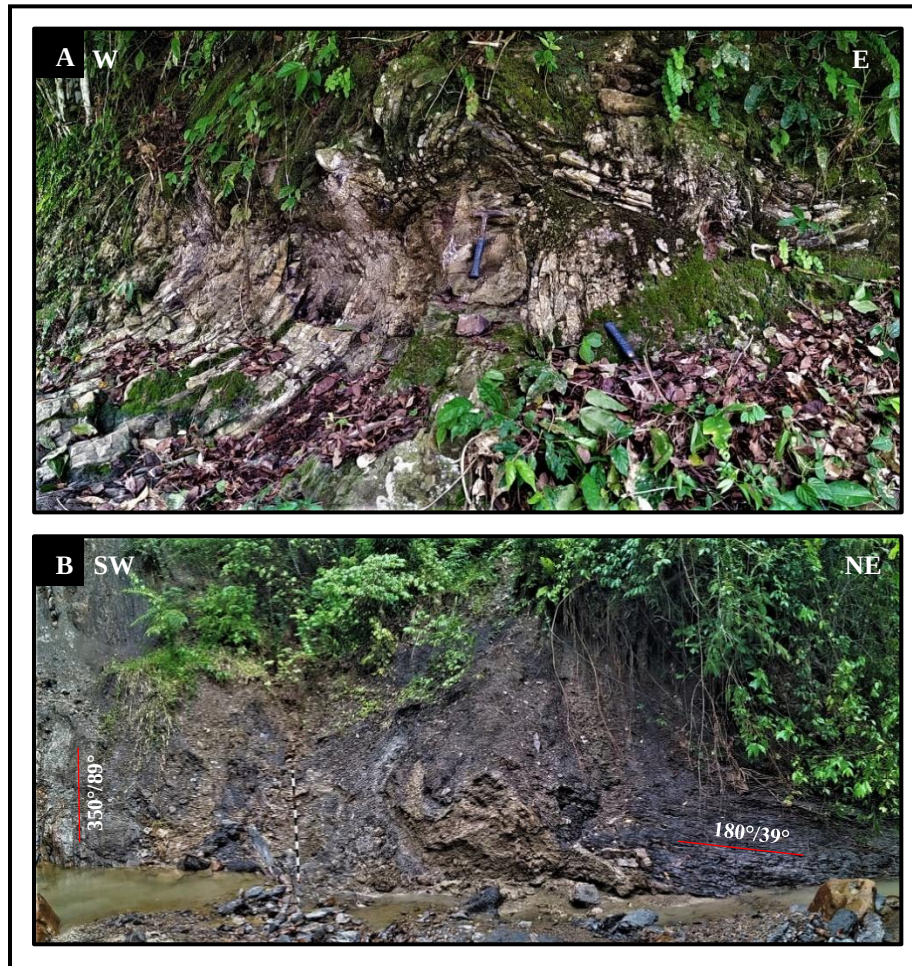


Figura 21. A) Pliegues en la Formación La Luna, Coordenadas: E: 1085456, N: 1305653, H: 194 ± 4 . B) Pliegue en la Formación Umir, Coordenadas: E: 1084665, N: 1304414, H: 188 ± 4 .

6. Estudios realizados en este Trabajo

6.1. Formación La Luna

6.1.1. Secciones Columnares Levantadas

- ***Columna Estratigráfica Quebrada Vanegas-Miembro Salada:*** Es un perfil muy escarpado de biomicrita de foraminíferos planctónicos (Wackestone/ Packstone) color gris oscuro con buzamiento suave hacia el noroeste ($181^{\circ}/40^{\circ}$) en capas tabulares medias a gruesas con laminación plano-paralela, siendo ondulosa paralela en ocasiones. Los rasgos más interesantes de esta sección están dados por la intercalación de las biomicritas de foraminíferos planctónicos con alto contenido en materia orgánica, con calizas claras, duras y recristalizadas (Pseudoesparita) con poco o nada de materia orgánica. También por los delgados niveles de bentonita? y su oxidación visible. Por tal razón, se tomaron dos muestras representativas para hacer análisis químico, que se complementaron con estudios de SEM.

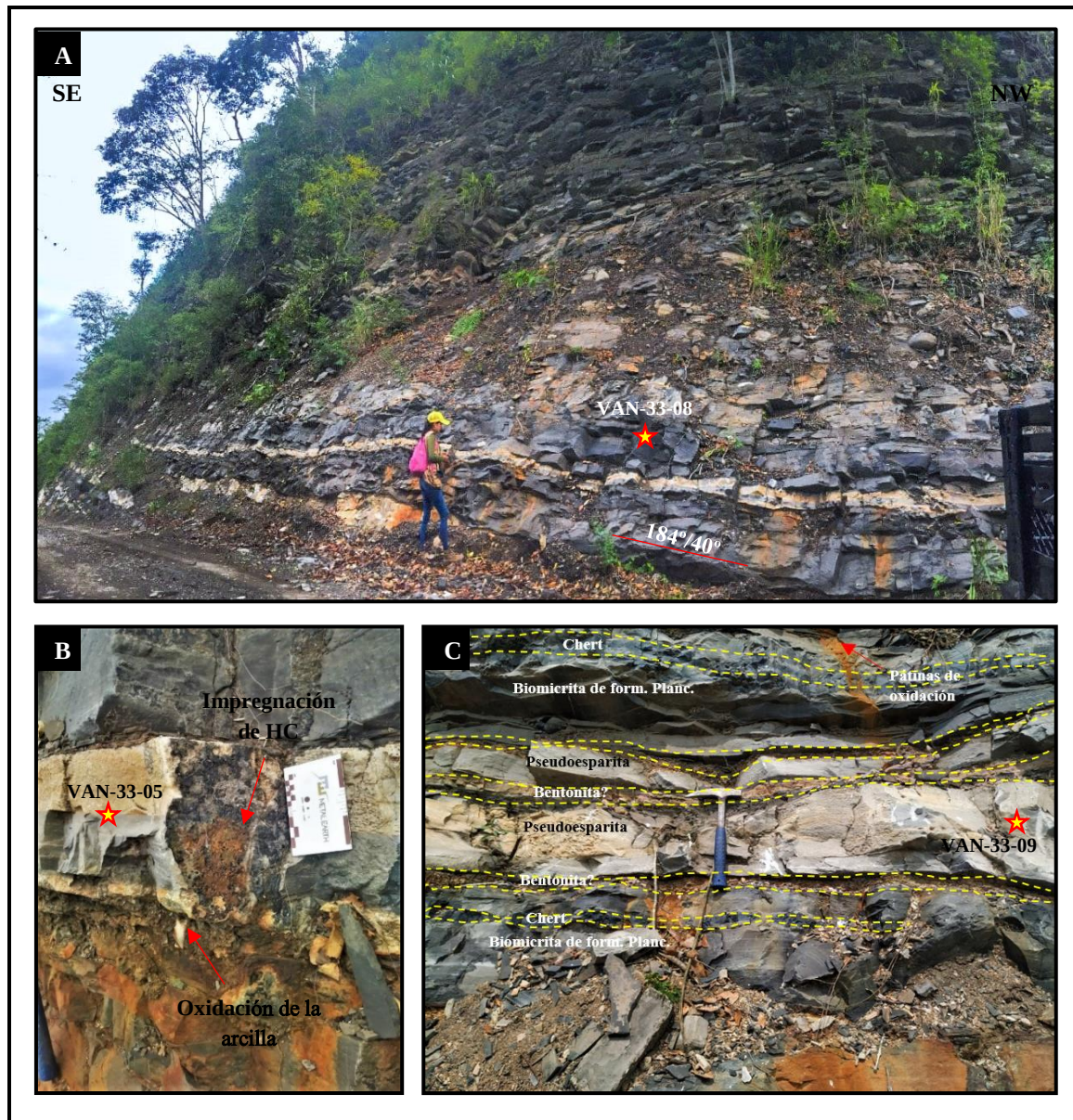


Figura 22. A) Afloramiento donde se tomaron las muestras para análisis químico y donde se puede observar claramente la intercalación de la pseudosparita con bentonita y biomicrofitas con gran contenido en M.O. B) Impregnación de hidrocarburo en diaclasas perpendiculares a la estratificación. C) Detalle de la intercalación de calizas, chert y bentonita. Se correlaciona en la Columna estratigráfica Sección Quebrada Vanegas con los bastones 11-14. Orientación de la foto: 260° N en azimut.

Con base en las características litológicas, el contenido de los aloquímicos constituyentes que son principalmente foraminíferos planctónicos del grupo Heterohelicedae en estas calizas, y por su ubicación estratigráfica próxima al contacto con la infrayacente Formación Simití, se asocia esta sección al Miembro Salada. Para un mayor detalle, remitirse a la Columna Estratigráfica, Sección Quebrada Vanegas, escala 1:100. Apéndice B

- Columna Estratigráfica Vereda Vanegas- Miembro Galembo:** La columna denominada sección Vereda Vanegas, lleva su nombre de acuerdo con la ubicación del afloramiento en la Vereda Vanegas, se describen 36m a escala 1:100. Presenta a la base 12 m de litología intercalada entre Mudstone, Wackestone, Wackestone Packstone en capas de 2 a 4cm con restos fosfáticos, laminación plano paralela preferente en las capas de Wackestone, y capas de Grainstone (Fosforita) de hasta 1.5m; 4m con predominio de Wackestone en capas de 2-7cm compactas sin estructura interna visible y foraminíferos hacia su base, con unas capas intermedias de Wackestone-Packstone, hacia el techo tiene una capa de fosforita de 35cm, los últimos 19m se pueden interpretar como intercalación de capas de Wackestone con mayor presencia hacia la base, con laminación plano paralela, y fosfatos, Mudstone y Mudstone-Wackestone con mayor aparición hacia la parte media y el techo, con presencia de laminación plano paralela; entre estos últimos 19m se reconocen niveles delgados de lodolitas, bentonita? y concreciones de hasta 60cm de diámetro. Se reconoce esta sección como parte del Miembro Galembo en consecuencia de su posición estratigráfica, el respectivo análisis petrográfico de la muestra 3-1-VAN en donde se reconoce la predominancia de foraminíferos bentónicos, además de sus niveles fosfóricos. Para un mayor detalle, ver Apéndice C.



Figura 23. Afloramiento donde fue levantada la Columna Estratigráfica, Sección Vereda Vanegas

6.1.2. Petrografía: Análisis petrográfico a las secciones de las muestras: VAN-33-08; 21-1 QV; VAN-33-09; VAN-33-05 (dos secciones), VAN-20-01; VAN-46-02; 3-1-VAN. Para ver mayor detalle, ver Apéndice E.

- **Sección muestra: VAN-33-08:** Caliza aloquímica microcristalina (caliza tipo II) de foraminíferos plantónicos de 0.06 a 0.52 y pocos bioclastos, dispuestos en una matriz de micrita y materia orgánica. Laminación plano-paralela continua a discontinua, marcada por láminas de microesparita y foraminíferos planctónicos. Clasificación según Folk (1959, 1962): Biomicrita de foraminíferos planctónicos. Clasificación según Dunham (1962): Wackestone con laminación Packstone.

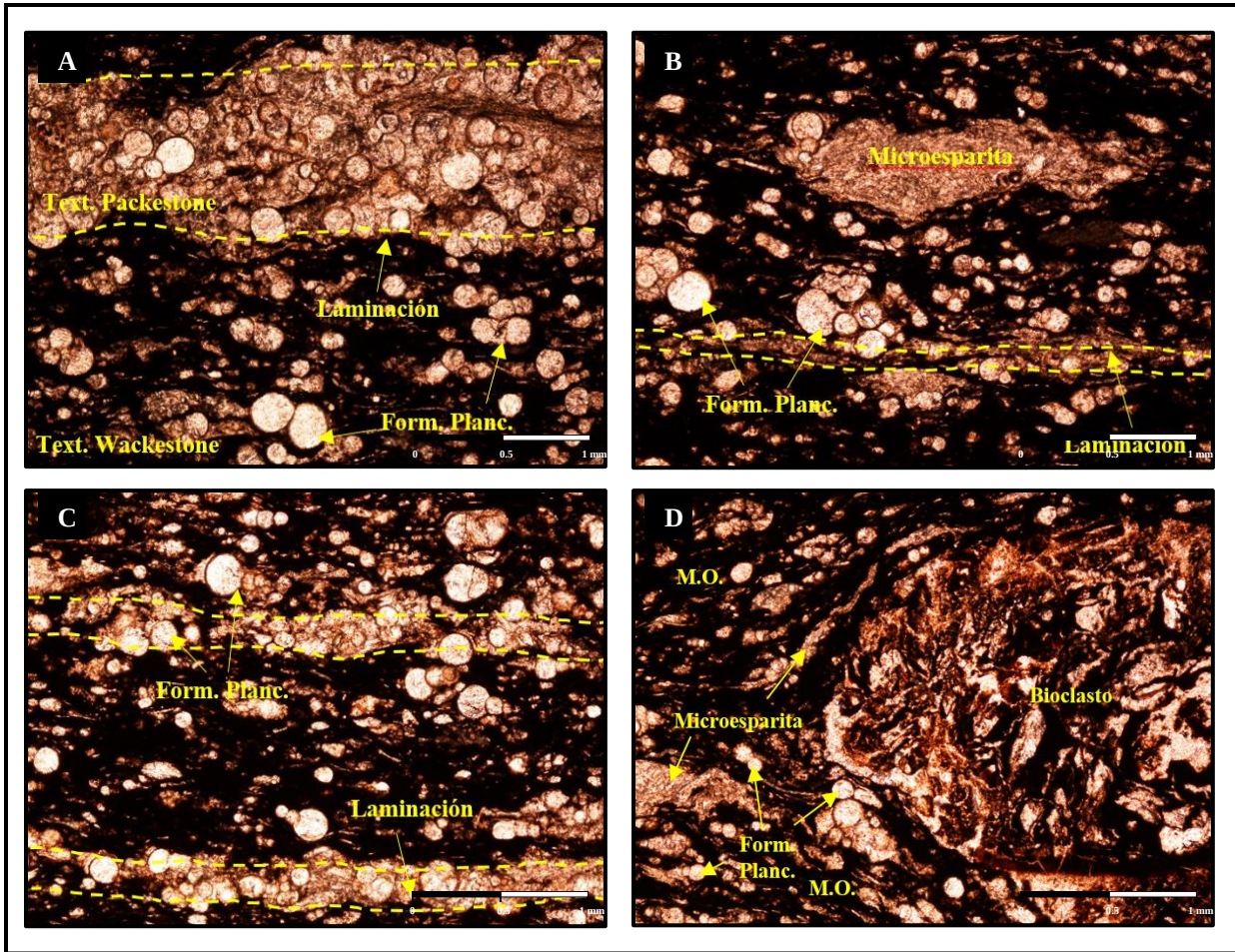


Figura 24. En las microfotografías A, B, C y D en nicoles cruzados, objetivo 5x, se observa laminación marcada por foraminíferos planctónicos y láminas de microsparita en una matriz de lodo calcáreo, rica en materia orgánica. En la imagen D se observa un bioclasto de 3.8 mm.

- **Sección muestra: 21-1 QV:** Caliza aloquímica microcristalina (caliza tipo II) de foraminíferos planctónicos de formas globosas y quilladas de 0.1 a 0.45 mm reemplazados por calcita y parcialmente por sílice microcristalina, restos fósiles de 0.5 a 2 mm, bioclastos fosfáticos con bordes de reemplazamiento de calcita de 1 a 2.6 mm y algunos pellets de 0.2 a 1.1 mm, dispuestos en una matriz de lodo calcáreo y materia orgánica. Clasificación según Folk (1959, 1962): Biomicrita de foraminíferos planctónicos. Clasificación según Dunham (1962): Packstone.

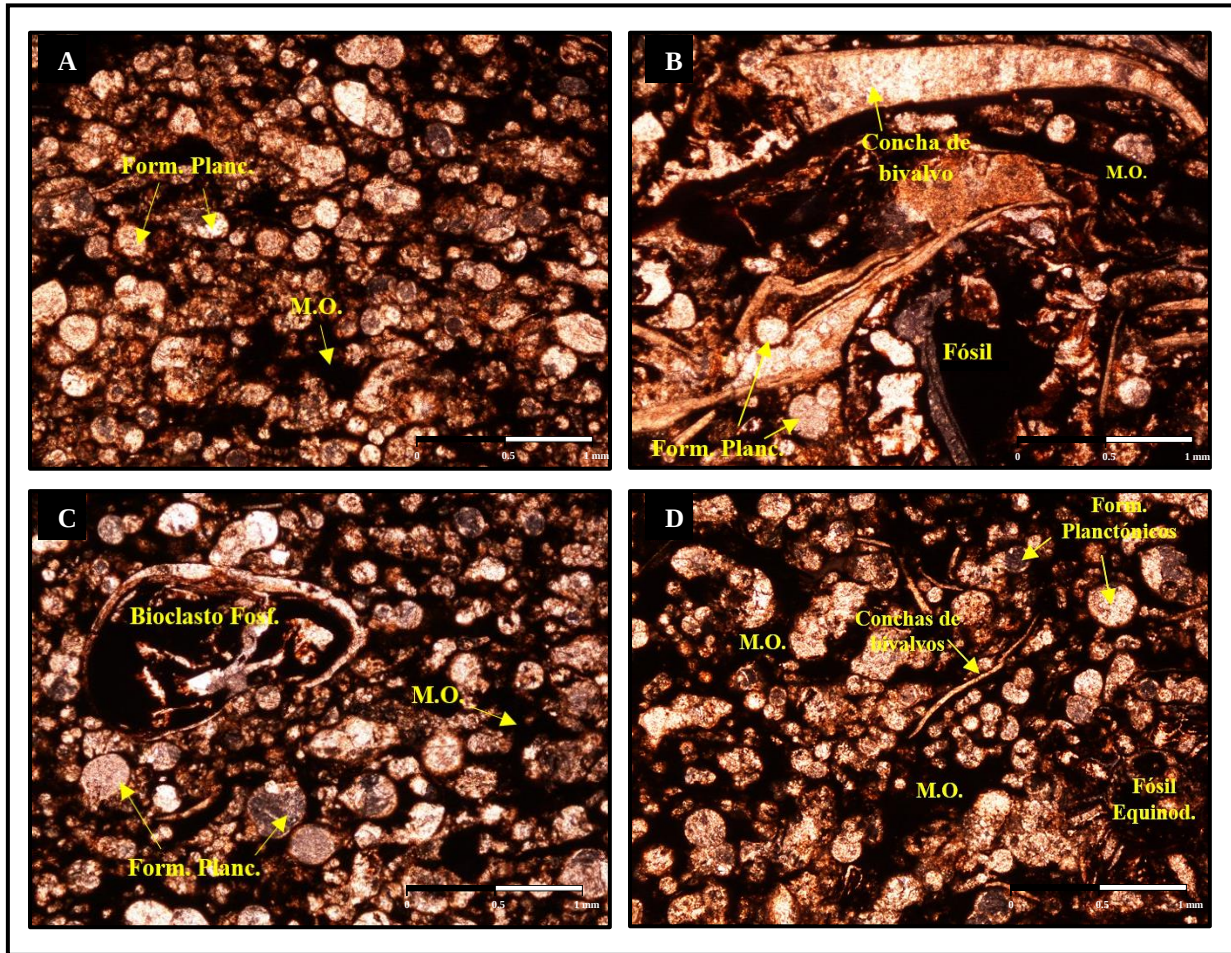


Figura 25. En las microfotografías A, B, C y D en nicols cruzados, objetivo 5x, se observan Foraminíferos planctónicos, bioclastos fosfáticos y restos fósiles en una matriz de lodo calcáreo, rica en materia orgánica.

- Sección muestra: VAN-33-09:** Caliza formada a partir de la recrystalización de la micrita, con una cantidad considerable de minerales opacos tanto euhedrales como anhedrales de 0.021 a 0.156 mm identificados en SEM como pirita y esfalerita. Pocos foraminíferos planctónicos de 0.144 a 0.288 mm reemplazados por pseudoesparita. Apatito, como mineral accesorio en granos subredondeados de 0.010 a 0.21 mm. Clasificación según Folk (1959, 1962): Pseudoesparita. Clasificación según Dunham (1962): Mudstone recrystalizada.

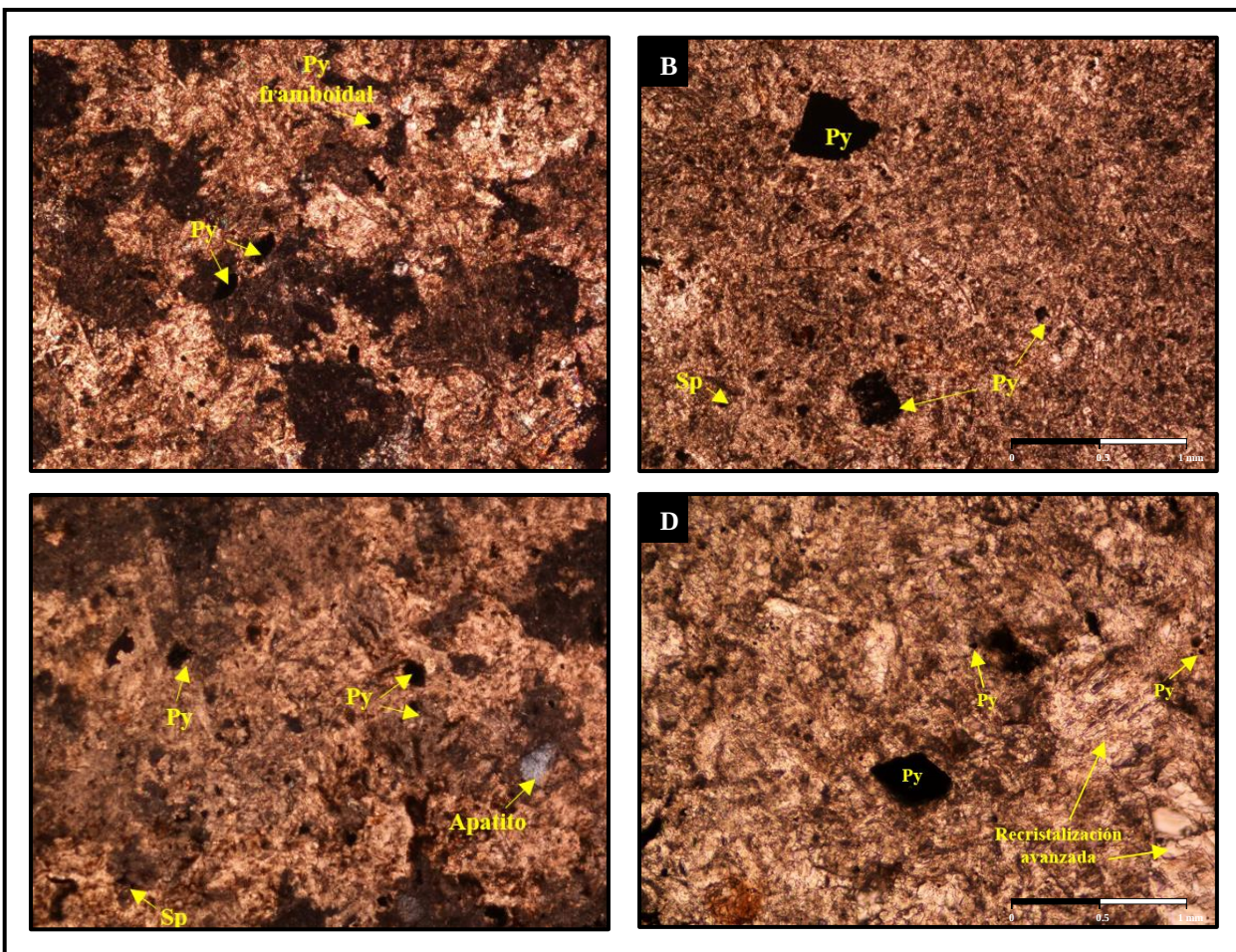


Figura 26. Las microfotografías A y C fueron tomadas en nicols cruzados, objetivo 5x, se observa mosaicos de pseudoesparita formados a partir de la recrystalización de la micrita, apatito como mineral accesorio. Las imágenes B y D fueron en nicols paralelos y muestra al igual que A y C opacos euhedrales y anhedrales identificados en SEM como pirita (Py) y esfalerita (Sp).

- **Sección muestra: VAN-33-05 (1):** Contacto gradacional entre: Caliza formada a partir de la recrystalización de la micrita observándose como mosaicos de calcita neomórfica que van desde 0.103 mm cerca al contacto y aumentan en tamaño hasta 1.38 mm en la medida que se aleja de este (hacia el tope). Materia orgánica proveniente de la biomicrita, ha sido atrapada dentro del mosaico de calcita. También tiene minerales opacos que en SEM fueron identificados como pirita y un pequeño porcentaje de terrígenos. Y caliza aloquímica microcristalina de foraminíferos

planctónicos de 0.1 a 0.3 mm, en una matriz de lodo calcáreo y materia orgánica, con un pequeño porcentaje de minerales opacos identificados en SEM como pirita (1.55%). Clasificación según Folk (1959, 1962): Contacto entre pseudoesparita y biomicrita de foraminíferos planctónicos. Clasificación según Dunham (1962): Contacto entre Mudstone recristalizada y Wackestone.

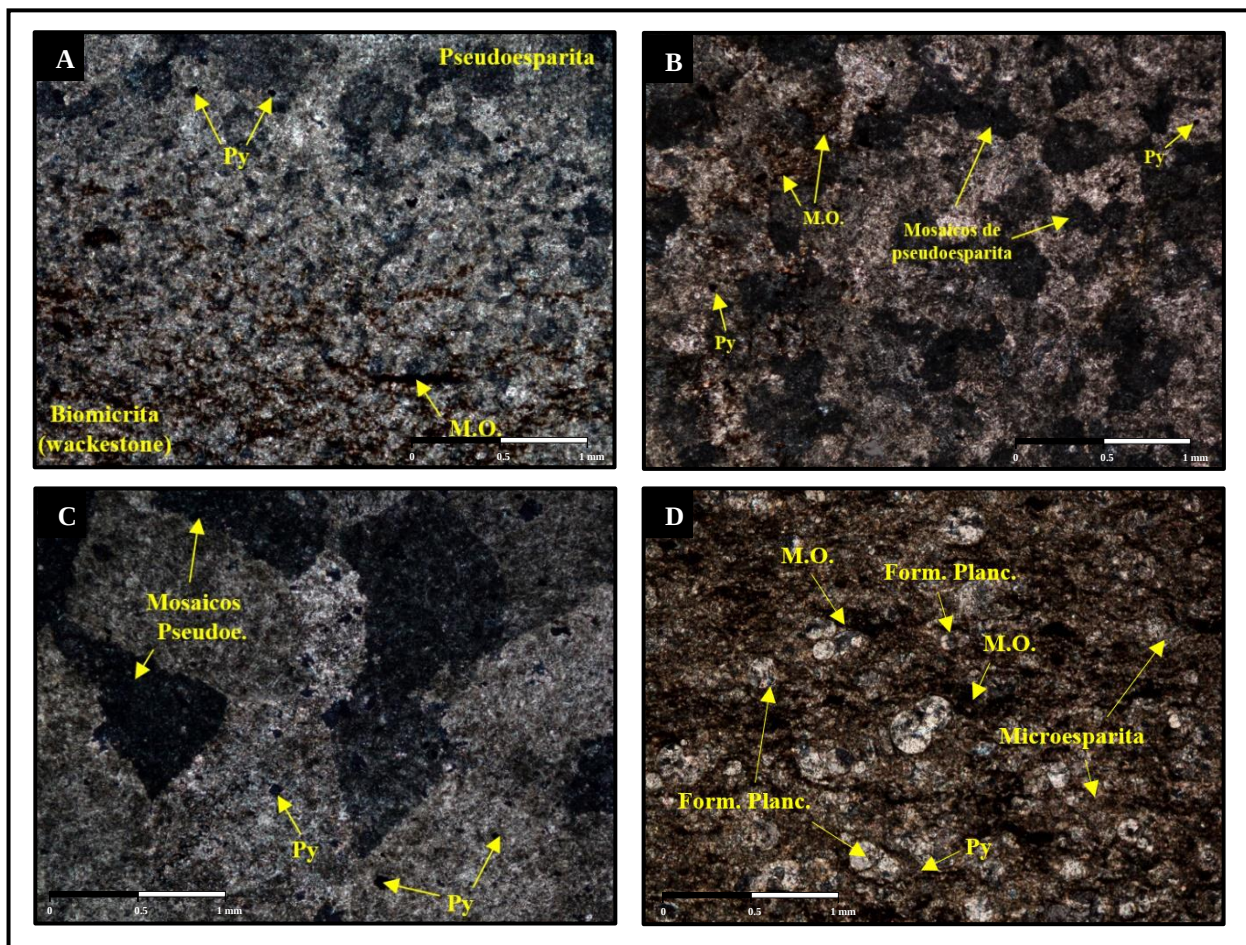
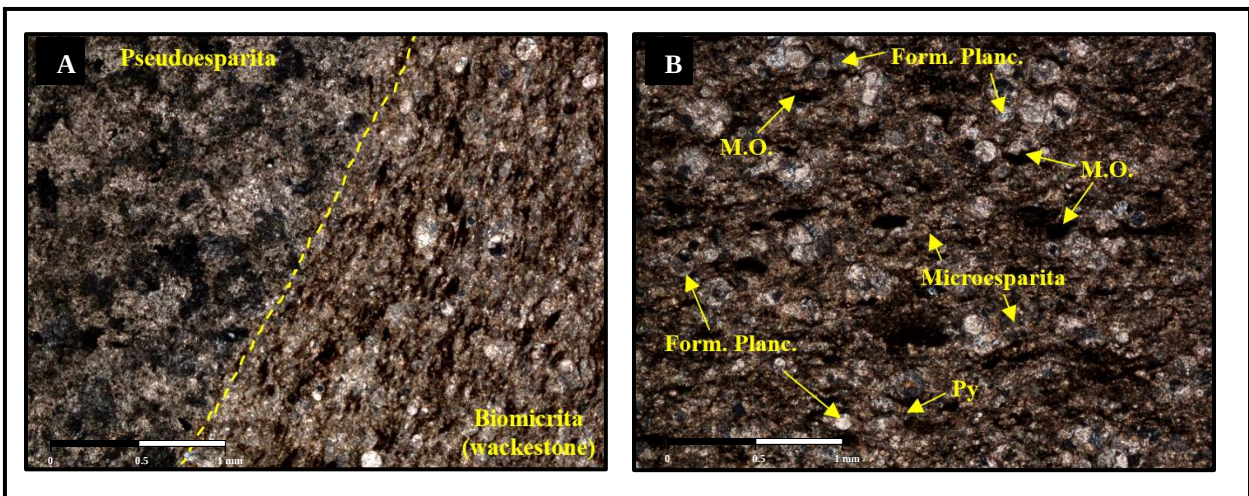


Figura 27. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicols cruzados, objetivo 5x. Se observa el contacto gradacional (A) entre la biomicrita (Wackestone) y los mosaicos de la pseudoesparita que aumentan en tamaño desde el contacto al tope de la sección como se ve en las imágenes B y C. En la imagen D se observa biomicrita de foraminíferos planctónicos reemplazados por calcita y sílice microcristalina con matriz de micrita, microesparita y materia orgánica. Esta sección corresponde al tope de la muestra VAN-33-05.

- Sección muestra: VAN-33-05 (2):** Contacto neto entre: Caliza aloquímica microcristalina (biomicrita) de foraminíferos planctónicos de 0.1 a 0.3 mm, en una matriz de lodo calcáreo y materia orgánica, con un pequeño porcentaje de minerales opacos identificados en SEM como pirita. Cerca al contacto, la textura es modificada por recrystalización de la matriz micrítica (microesparita). Y caliza recrystalizada que se ve como mosaicos de calcita neomórfica que van desde 0.12 mm cerca al contacto y aumentan en tamaño gradualmente hasta 1.38 mm en la medida que se aleja de este (hacia la base). Materia orgánica proveniente de la biomicrita ha sido atrapada dentro del mosaico de calcita. También tiene minerales opacos que en SEM fueron identificados como pirita. Clasificación según Folk (1959, 1962): Contacto neto entre biomicrita de foraminíferos planctónicos y pseudoesparita. Clasificación según Dunham (1962): Contacto neto entre Mudstone recrystalizada y Wackestone.



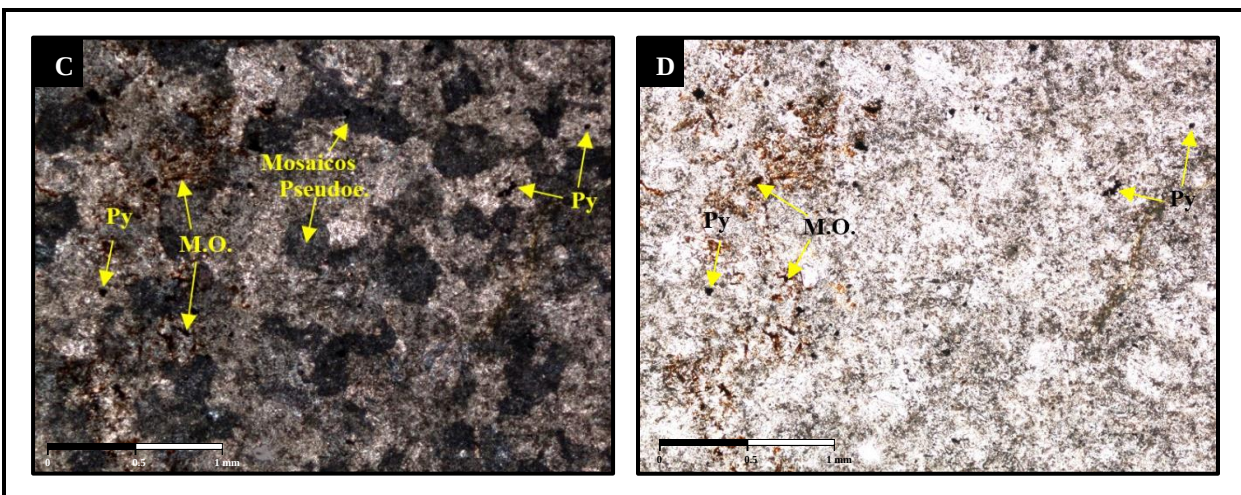


Figura 28. Las microfotografías A, B y C fueron tomadas en nicoles cruzados, objetivo 5x. La imagen A, muestra el contacto neto entre la biomicrita (B) y la pseudoesparita (C) que corresponde a la base de la muestra VAN-33-05. La imagen D fue tomada en nicoles paralelos y muestra como la materia orgánica en la pseudoesparita se limita a rellenar porosidad secundaria.

- **Sección muestra: VAN-20-01:** Caliza microcristalina micrítica parcialmente recrystalizada (Caliza tipo III) con foraminíferos planctónicos con neomorfismo de 0.08 a 0.23 mm y algunas microconchas de bivalvos de 0.1 a 0.21 mm. Se encuentran opacos de forma diseminada, también formando cúmulos que en SEM fueron identificados como pirita. Se observa un reemplazamiento a sílice que no es uniforme, y por ende se observa el contraste con una matriz de grano fino de colores de birrefringencia más ocres a naranjas que fue identificada composicionalmente en SEM como sílicea; contiene foraminíferos planctónicos, algunos braquiópodos y minerales opacos. Venillas de calcita perpendiculares a la estratificación de 0.10 y 0.25 mm de grosor atraviesan toda la muestra; incluyen opacos que fueron identificados en SEM como materia orgánica. Clasificación según Folk (1959, 1962): Micrita con foraminíferos planctónicos con reemplazamiento de sílice. Clasificación según Dunham (1962): Mudstone/Wackestone.

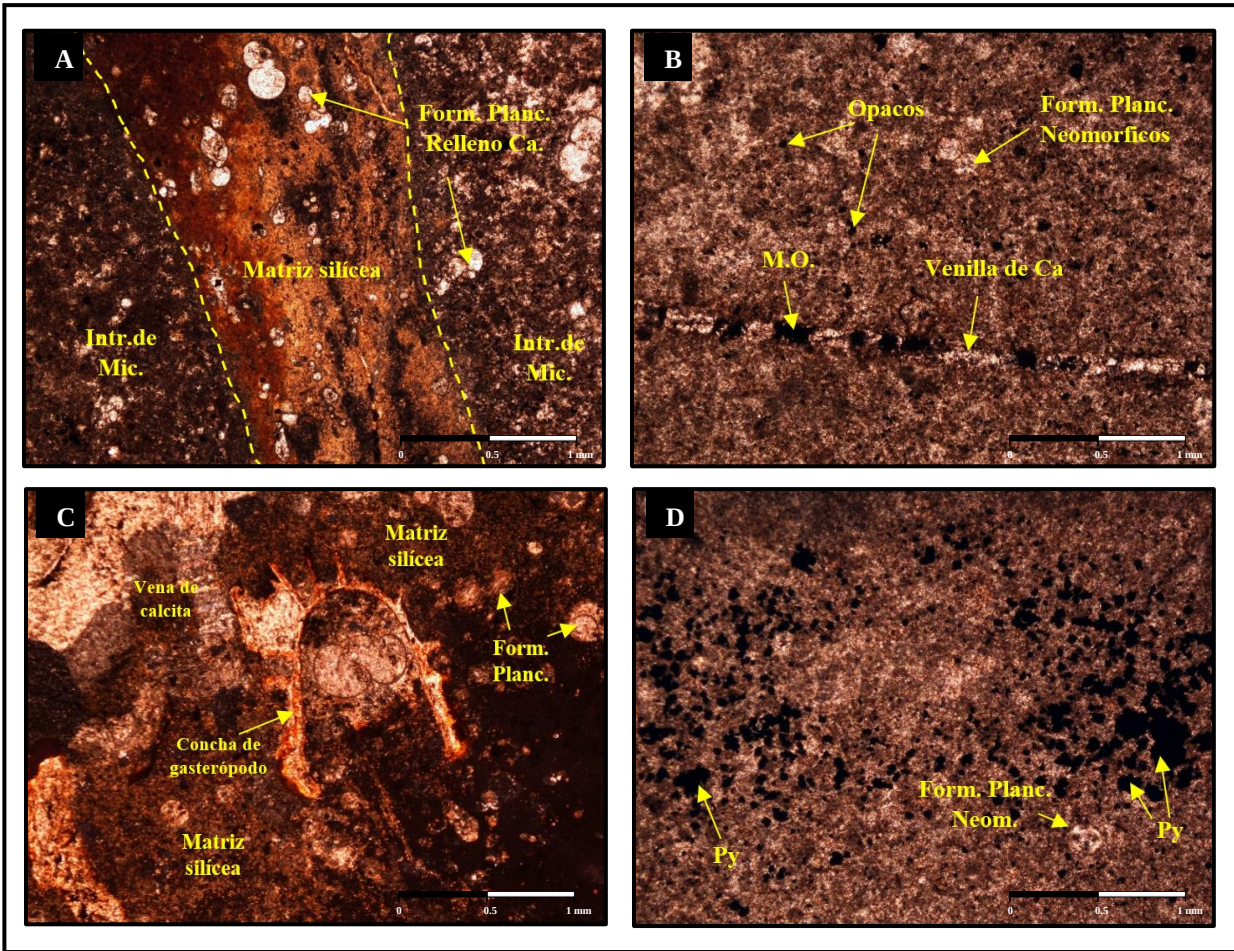


Figura 29. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicols cruzados, objetivo 5x. Se observa el contraste entre una caliza de foraminíferos con neomorfismo de matriz micrítica en proceso de reemplazamiento a sílice, y una matriz netamente sílicea con foraminíferos planctónicos y algunos fósiles de gasterópodos. La imagen B, muestra una venilla de calcita con materia orgánica y la imagen D, cúmulos de pirita identificados en SEM.

- **Sección muestra: VAN-46-02:** Caliza aloquímica microcristalina (caliza tipo II) de foraminíferos planctónicos de 0.1 a 0.4 mm y bentónicos de 0.12 a 0.64 mm algunos reemplazados por sílice microcristalina, y microconchas de bivalvos en una matriz de lodo calcáreo y materia orgánica. La muestra presenta múltiples fracturas que han sido rellenadas por calcita (0.02 a 1.9 mm de grosor) y removilización de algunos fragmentos de la misma roca. Laminación plano-paralela marcada por orientación de los foraminíferos, las conchas y delgadas

láminas de microesparita. Clasificación según Folk (1959, 1962): Biomicrita de foraminíferos planctónicos y bentónicos. Clasificación según Dunham (1962): Wackestone.

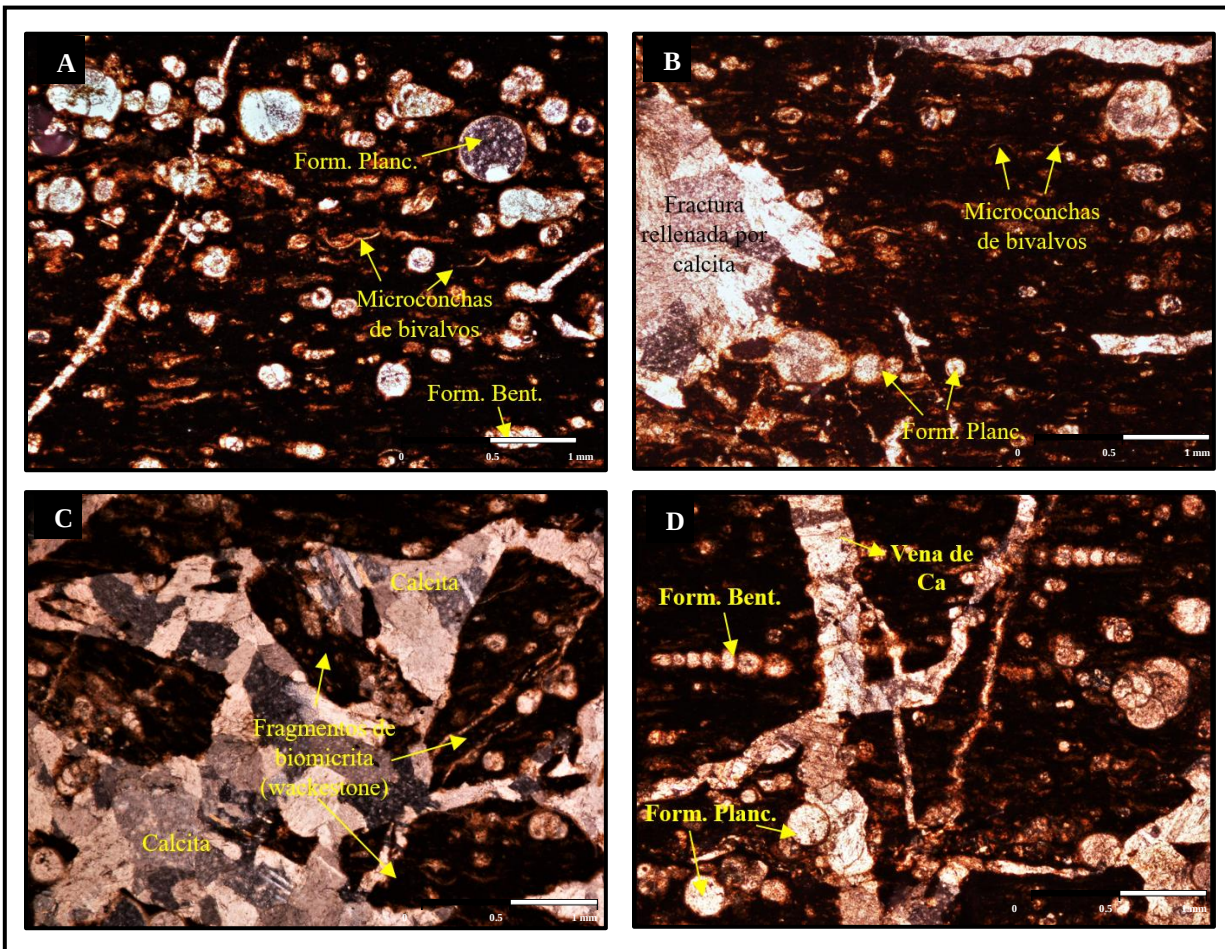


Figura 30. Las microfotografías A, B, C y D fueron tomadas en nicols cruzados, objetivo 5x. Se observa una caliza de foraminíferos planctónicos y bentónicos que han sido reemplazados por calcita y algunos por sílice microcristalina, microconchas de bivalvos, ésta se encuentra bastante fracturada y presenta algunos fragmentos removilizados. Las fracturas se ven rellenas de calcita y van desde 0.02 a 1.9 mm de grosor.

- **Sección muestra: 3-1 VAN:** Contacto neto entre caliza microcristalina micrítica (caliza tipo III) con laminación plano-paralela constituida principalmente de micrita y materia orgánica con pocos foraminíferos bentónicos de 0.31 a 1.07 mm y terrígenos tamaño limo y arena muy fina desde 0.0104 a 0.104 mm, subangulares y subesféricos. También contiene algo de minerales

opacos de 0.052 mm aproximadamente. Y caliza aloquímica microcristalina (caliza tipo II) de foraminíferos bentónicos y pellets, en una matriz fosfática y micrítica, con un pequeño porcentaje de minerales opacos. Clasificación según Folk (1959, 1962): Contacto neto entre micrita con foraminíferos y biomicrita de foraminíferos bentónicos. Clasificación según Dunham (1962): Contacto neto entre Mudstone y Packstone/Grainstone.

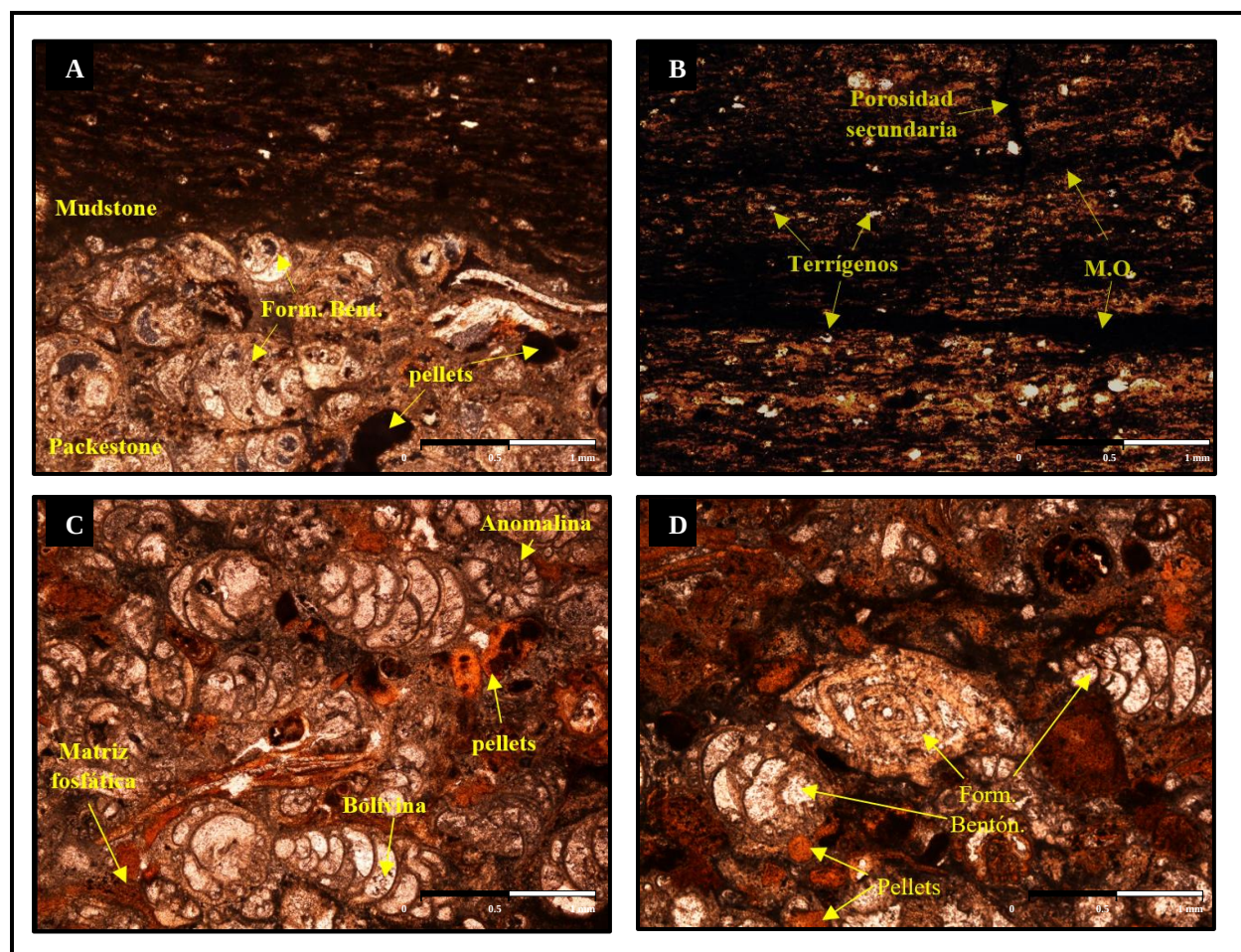


Figura 31. Las microfotografías A y B fueron tomadas en nicols cruzados, C y D en nicols paralelos, objetivo 5x. Se observa el contacto entre una caliza lodosa con laminación plano-paralela y terrígenos de grano limo a arena muy fina y una caliza con abundantes foraminíferos bentónicos y pellets en una matriz de lodo calcáreo y fosfático.

6.1.3. Espectrometría de masas (ICP-MS, Ultratrace 1): Análisis geoquímico por espectrometría de masas en los laboratorios de Actlabs Colombia S.A.S., para la detección de 63 elementos de las muestras: VAN-33-09, VAN-33-08, CFA-01.

Tabla 5. Resultados del análisis geoquímico para 4 muestras realizado por Actlabs Colombia S.A.S.

Analyte Symbol	Unit Symbol	Detection Limit	Analysis Method	VAN-33-09	VAN-33-08	CFA-01
Au	ppb	0,5	AR-MS	56,8	< 0.5	< 0.5
Ag	ppm	0,002	AR-MS	0,202	0,191	0,236
Cu	ppm	0,2	AR-MS	5,3	26,5	40,2
As	ppm	0,1	AR-MS	16,7	24,3	17,7
Sb	ppm	0,02	AR-MS	0,74	3,93	6,11
Hg	ppb	10	AR-MS	20	30	50
W	ppm	0,1	AR-MS	< 0.1	0,4	0,2
Mo	ppm	0,01	AR-MS	4,09	72,2	80,7
Tl	ppm	0,02	AR-MS	0,95	1,73	1,38
Rb	ppm	0,1	AR-MS	1,4	4,4	5,5
Zn	ppm	0,1	AR-MS	61,2	339	1340
Sr	ppm	0,5	AR-MS	695	1210	1310
Ba	ppm	0,5	AR-MS	104	265	185
Ti	%	0,001	AR-MS	< 0.001	0,002	0,002
Al	%	0,01	AR-MS	0,44	0,41	0,43
B	ppm	1	AR-MS	7	8	9
Be	ppm	0,1	AR-MS	0,2	0,5	0,6
Bi	ppm	0,02	AR-MS	0,08	0,08	0,05
Ca	%	0,01	AR-MS	33,6	29,1	30,8
Cd	ppm	0,01	AR-MS	0,56	5,98	36,5
Ce	ppm	0,01	AR-MS	15,2	7,98	4,38
Co	ppm	0,1	AR-MS	0,5	0,7	0,4
Cr	ppm	1	AR-MS	3	37	45
Cs	ppm	0,02	AR-MS	0,07	0,34	0,28
Dy	ppm	0,1	AR-MS	1,1	1,1	0,6
Er	ppm	0,1	AR-MS	0,6	0,9	0,5
Eu	ppm	0,1	AR-MS	0,2	0,2	0,1
Fe	%	0,01	AR-MS	0,74	0,27	0,18
Ga	ppm	0,02	AR-MS	0,59	0,12	1,07
Gd	ppm	0,1	AR-MS	1,2	1,1	0,6
Ge	ppm	0,1	AR-MS	< 0.1	0,1	0,4

Hf	ppm	0,1	AR-MS	< 0.1	0,1	< 0.1
Ho	ppm	0,1	AR-MS	0,2	0,3	0,2
In	ppm	0,02	AR-MS	< 0.02	< 0.02	< 0.02
K	%	0,01	AR-MS	0,04	0,08	0,11
La	ppm	0,5	AR-MS	7,1	5	3,4
Li	ppm	0,1	AR-MS	1,5	1,5	1,8
Lu	ppm	0,1	AR-MS	0,1	0,1	< 0.1
Mg	%	0,01	AR-MS	0,71	0,22	0,19
Mn	ppm	1	AR-MS	133	158	46
Na	%	0,001	AR-MS	0,019	0,023	0,027
Nb	ppm	0,1	AR-MS	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Nd	ppm	0,02	AR-MS	7,4	4,14	2,95
Ni	ppm	0,1	AR-MS	3,8	101	138
P	%	0,001	AR-MS	0,02	0,196	0,128
Pb	ppm	0,1	AR-MS	9,8	4,9	4,1
Pr	ppm	0,1	AR-MS	1,9	1,1	0,7
Re	ppm	0,001	AR-MS	0,002	0,204	0,204
S	%	1	AR-MS	< 1	< 1	< 1
Sc	ppm	0,1	AR-MS	2,3	1,5	0,8
Se	ppm	0,1	AR-MS	4,2	12	14,2
Sm	ppm	0,1	AR-MS	1,5	0,8	0,5
Sn	ppm	0,05	AR-MS	0,33	0,58	0,8
Ta	ppm	0,05	AR-MS	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Tb	ppm	0,1	AR-MS	0,2	0,2	< 0.1
Te	ppm	0,02	AR-MS	0,02	0,1	0,04
Th	ppm	0,1	AR-MS	2,8	1,1	1,1
Tm	ppm	0,1	AR-MS	< 0.1	0,1	< 0.1
U	ppm	0,1	AR-MS	0,6	12,7	11,7
V	ppm	1	AR-MS	44	642	> 1000
Y	ppm	0,01	AR-MS	5,05	9,82	7,07
Yb	ppm	0,1	AR-MS	0,6	0,9	0,5
Zr	ppm	0,1	AR-MS	6,9	9,3	5,2

6.1.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM): Para mayor detalle ver Apéndice F.

Tabla 6. *Minerales identificados para cada muestra con sus observaciones correspondientes*

Muestra	Tipo de roca	Formación	Mineral	Observaciones
VAN-33-09	Pseudoesparita	La Luna (Miembro Salada)	Pirita	Tamaños medidos según la escala: desde 1.2 a 93 μm . Contenido en peso de Au: 0.59 a 4.31%.
			Esfalerita	Tamaños medidos según la escala: de 19.25 y 39 μm .
			Caolinita	Aparece llenando parcialmente poros.
			Calcita	Aparecen morfologías de recristalización.
			Apatito	Mineral accesorio.
VAN-33-08	Biomicrita de foraminíferos planctónicos	La Luna (Miembro Salada)	Pirita	Tamaños medidos según la escala: 18 y 57 μm . Contenido en peso de Au: 1.43 y 1.60%.
			Esmectita	Aparece llenando parcialmente poros.
VAN-33-05	Contacto entre biomicrita de foraminíferos planctónicos y pseudoesparita	La Luna (Miembro Salada)	Pirita	Tamaños medidos según la escala: desde 1.12 a 52 μm . Contenido en peso de Au: 2.91 a 3.27%.
			Caolinita	Aparece llenando parcialmente poros.
			Materia Orgánica	Aparece llenando parcialmente poros.
VAN-20-01	Biomicrita de foraminíferos planctónicos	La Luna (Miembro Pujamana)	Pirita	Tamaños medidos según la escala: desde 7.5 a 195 μm . Contenido en peso de Au: 1.87%.
			Materia Orgánica	Aparece en venillas perpendiculares a la estratificación.
			Sílice	Aparece en sectores localizados cuyo origen posiblemente sea por cenizas volcánicas.

- **Muestra: VAN-33-09 (Pseudoesparita)**

Pirita (FeS₂): Los minerales de las figuras se identificaron como pirita de acuerdo con el espectro EDX que muestra alto contenido de los elementos Fe y S, y por la morfología en framboides y cubos que la caracterizan. Cabe resaltar que cada una de las piritas, marcó contenido en Au.

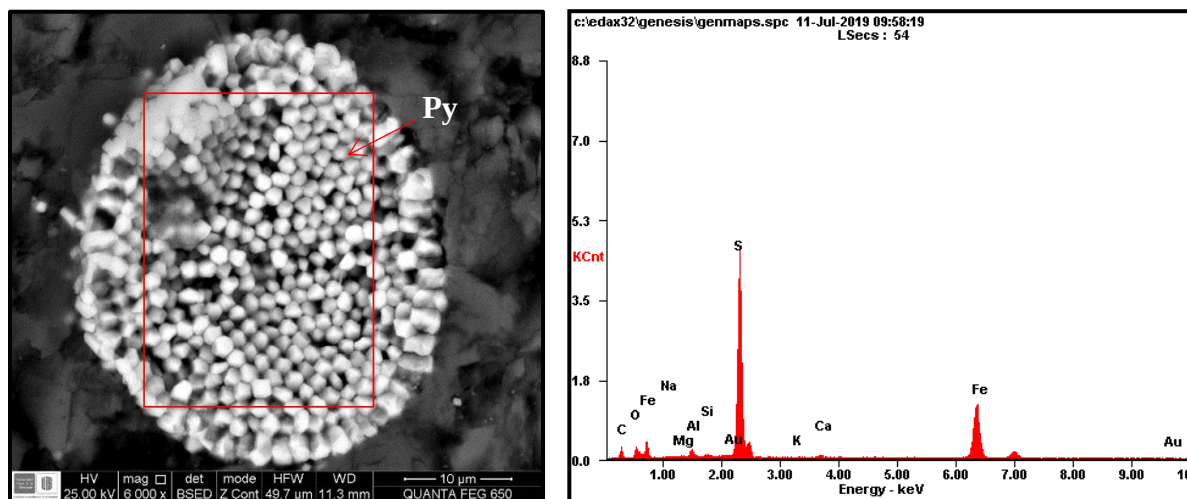


Figura 32. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 6000x de pirita framboidal de 41 μm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

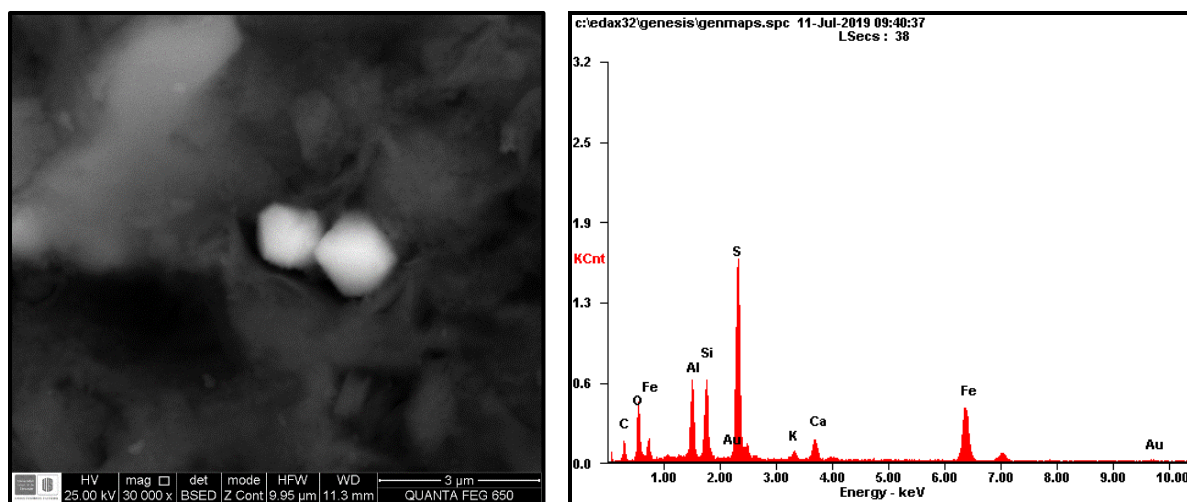


Figura 33. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 30000x de cubos de pirita de 1.2 y 1.4 μm . Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

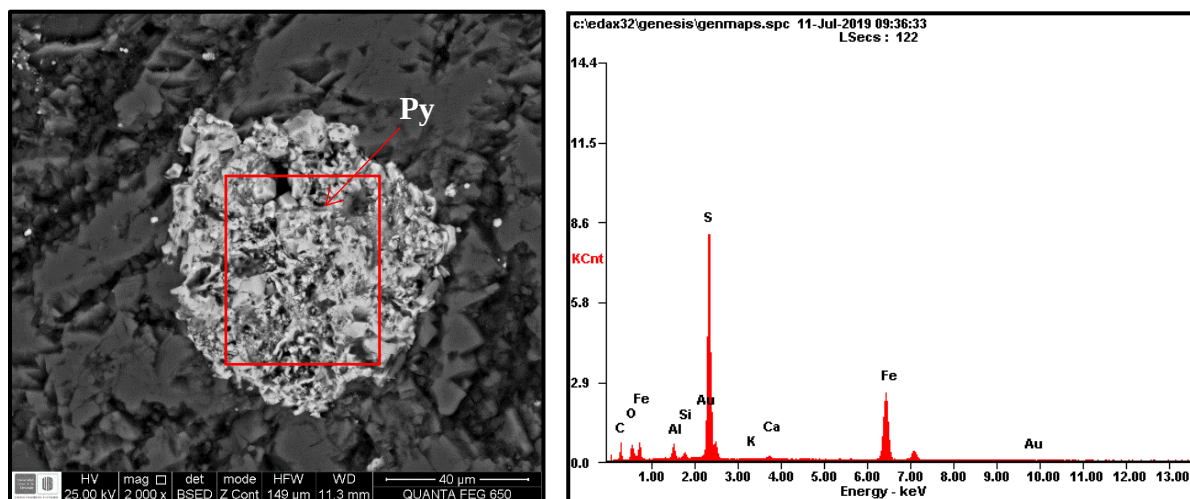


Figura 34. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de pirita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Esfalerita (Zn, Fe) S: La identificación del mineral como esfalerita se basó en su morfología cúbica y el espectro EDX que muestra alto contenido en Zn y S.

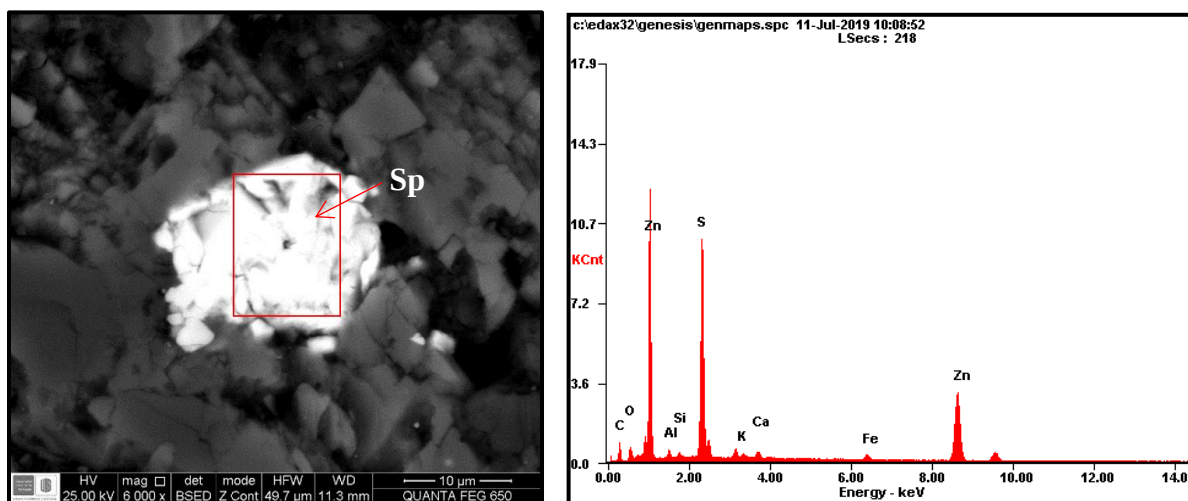


Figura 35. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 6000x de esfalerita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Caolinita ($Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$): Esta arcilla aparece llenando parcialmente los poros. Identificada por la típica morfología de pilas de placas o libros pseudo hexagonales y el espectro EDX que muestra los elementos principales que la conforman.

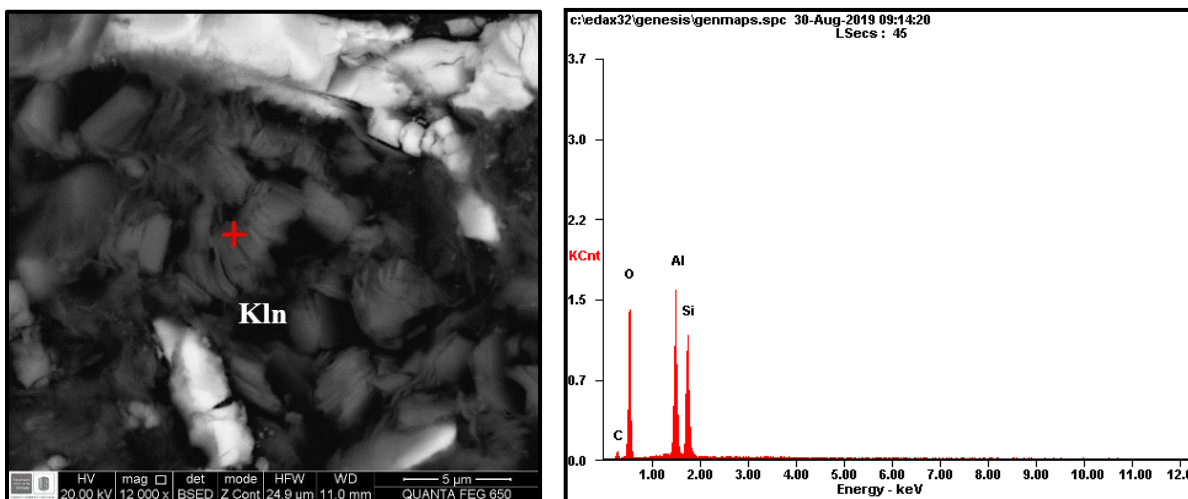


Figura 36. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 12000x de caolinita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Calcita ($CaCO_3$): Conforman la mayor parte de la matriz de la muestra por tratarse de una caliza y se puede observar como esta presenta recristalización.

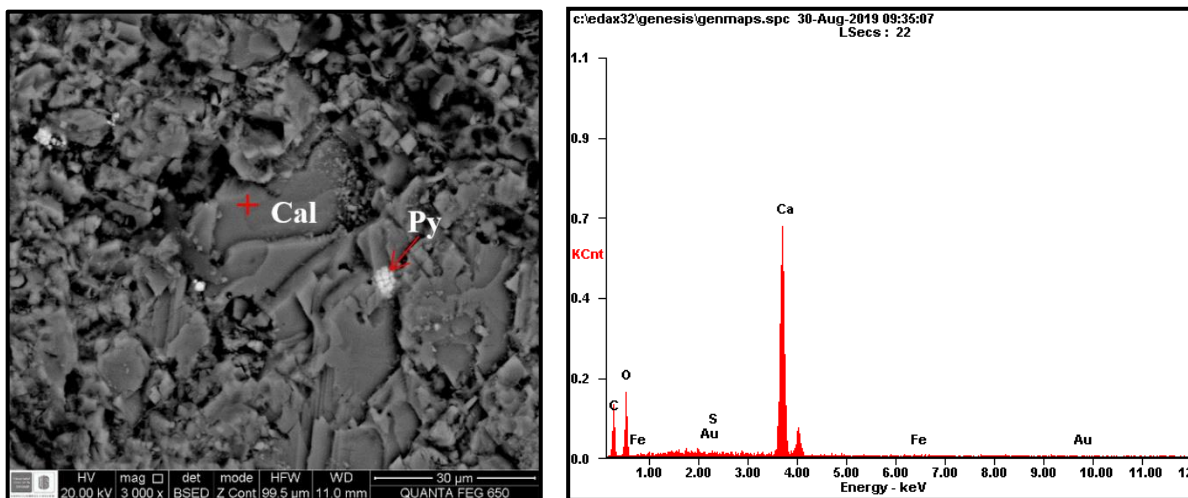


Figura 37. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 3000x de calcita que muestra recristalización y un pequeño framboide de pirita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$): Mineral identificado como apatito de 103 μm aproximadamente, su identificación se basa en el análisis EDX que muestra altos contenidos de P y Ca.

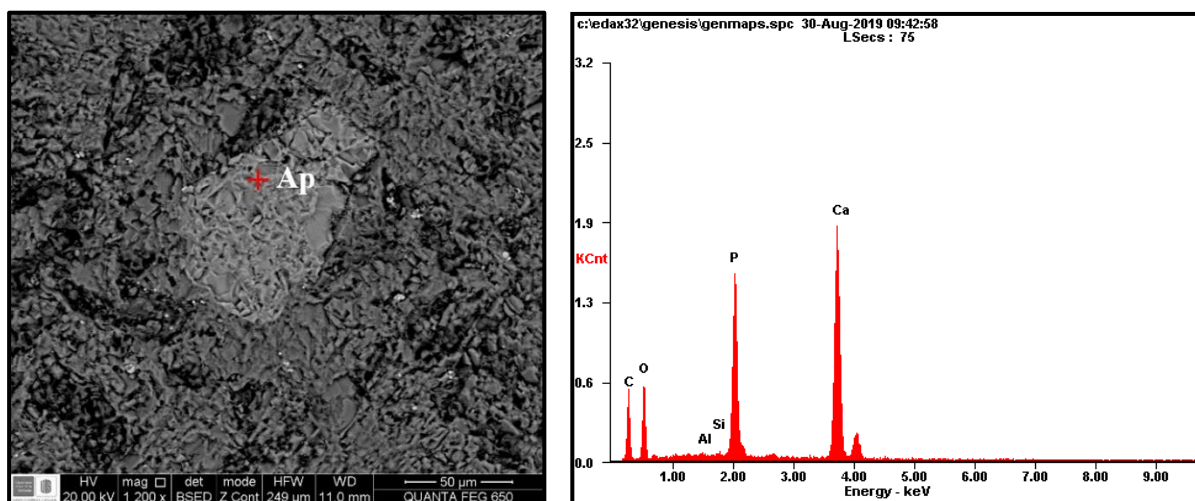


Figura 38. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 12000x de apatito, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

- **Muestra: VAN-33-08 (*Biomicrota de foraminíferos planctónicos*)**

Pirita (FeS_2): Se identifica este mineral como pirita de acuerdo con el espectro EDX que muestra alto contenido de los elementos Fe y S. El espectro marcó cierto contenido en Au.

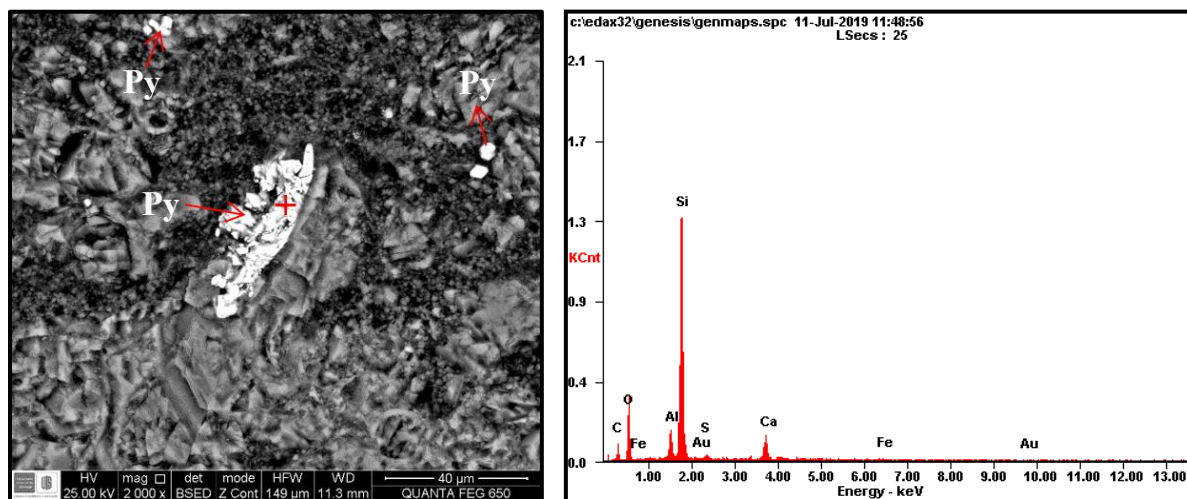


Figura 39. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de pirita de 57 µm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Esmectita $(1/2Ca, Na)0.7(Al, Mg, Fe)_4[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_4 \cdot n H_2O$: Esta arcilla aparece llenando parcialmente los poros. Identificada por el espectro EDX que muestra los elementos principales que la conforman.

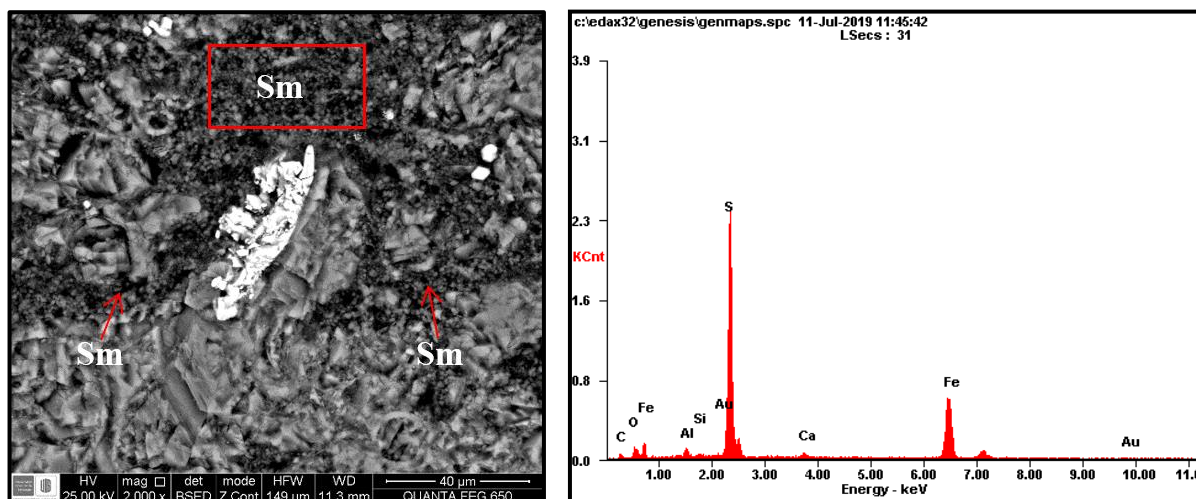


Figura 40. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x. Se señala cavidades que han sido rellenadas por esmectita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

- **Muestra: VAN-33-05 (Contacto entre biomicrita de foraminíferos planctónicos y pseudoesparita)**

Pirita (FeS_2): Se identifica este mineral como pirita de acuerdo con el espectro EDX que muestra los picos más altos de los elementos principales que la conforman: Fe y S. El espectro marcó cierto contenido en Au.

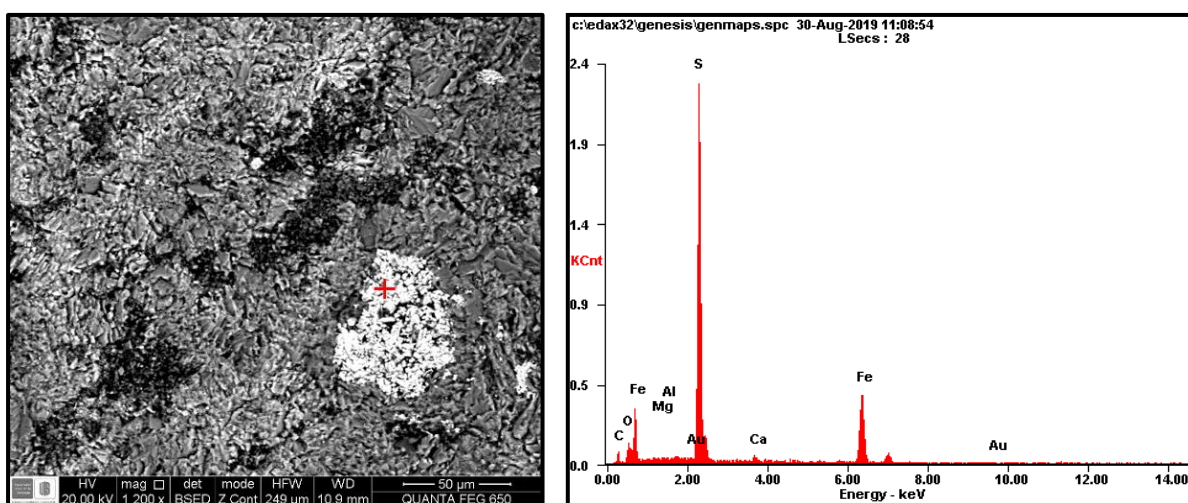


Figura 41. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x de pirita de 52 μm con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Caolinita ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$): Este tipo de arcilla se identificó mediante su espectro en el análisis EDX que muestra los picos más altos y semejantes de Al y Si.

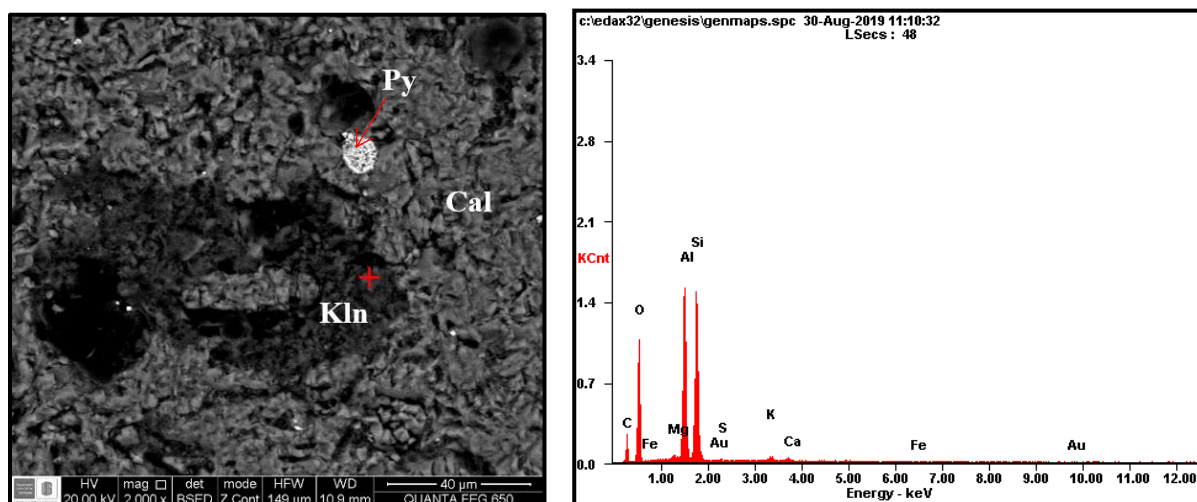


Figura 42. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x de caolinita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Materia Orgánica (C)

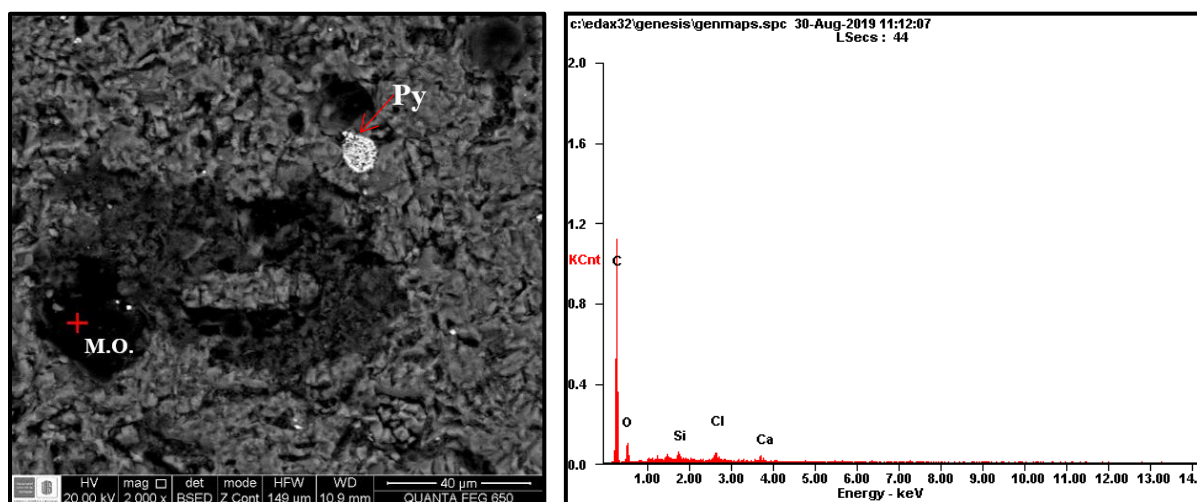


Figura 43. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 2000x que muestra materia orgánica llenando parcialmente poros de la caliza con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

- **Muestra: VAN-20-01 (Biomicro de foraminíferos planctónicos)**

Pirita (FeS_2): Pirita diseminada identificada por los principales elementos formadores: Fe y S.

Se observan también reemplazando conchas de foraminíferos.

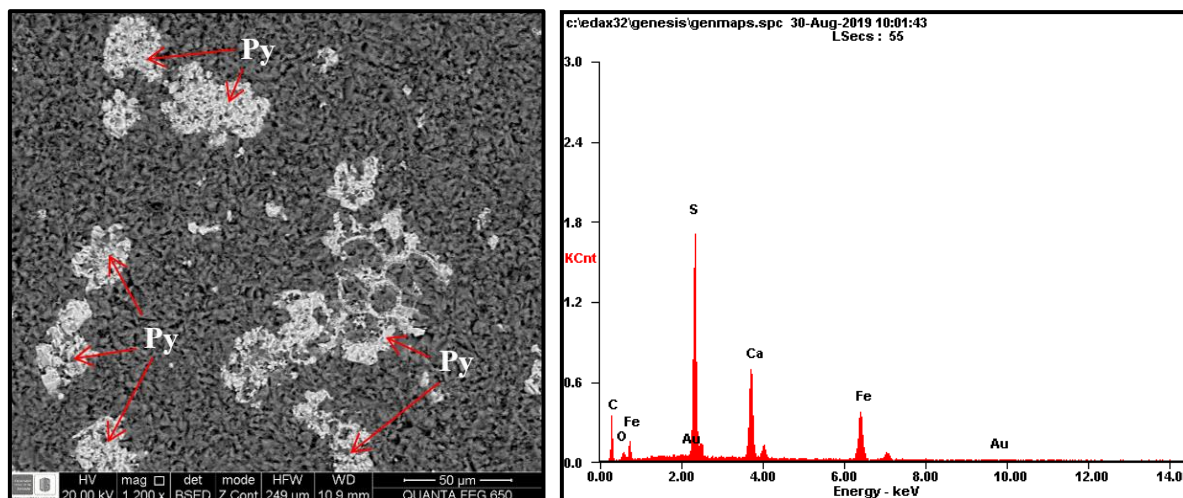


Figura 44. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x de pirita con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Materia Orgánica (C): Venilla rellena por calcita (Cal) y materia orgánica (M.O.) identificada por el espectro EDX que muestra el principal elemento formador: C.

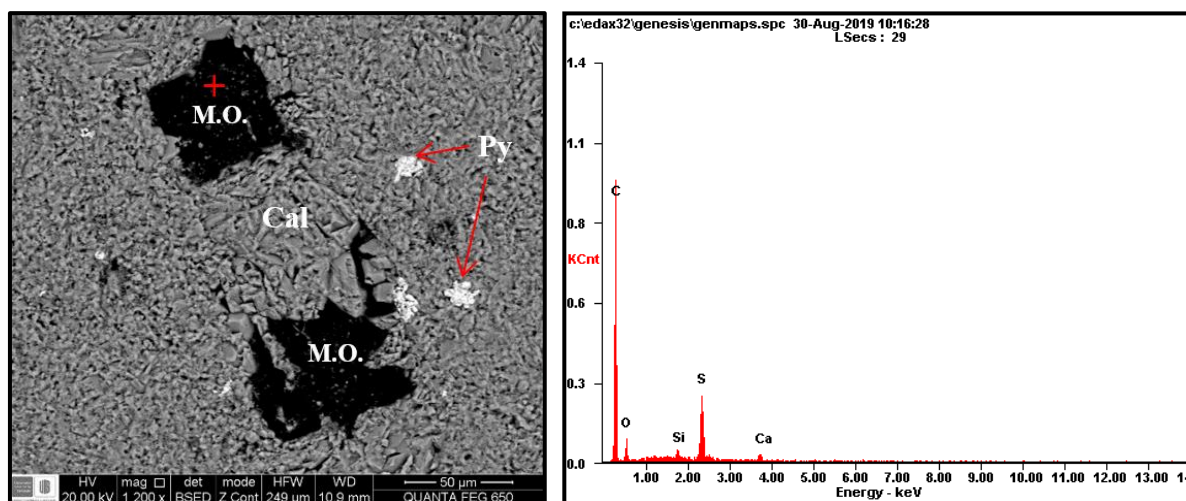


Figura 45. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 1200x que muestra materia orgánica relleno una venilla con calcita, con su correspondiente espectro EDX. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

Sílice (SiO_2): Reemplazamiento de la matriz carbonatada por sílice, por posible aporte de cenizas volcánicas. El espectro EDX muestra el predominio del elemento Si y nada de Ca, en esta parte de la caliza (donde muestra la marca roja).

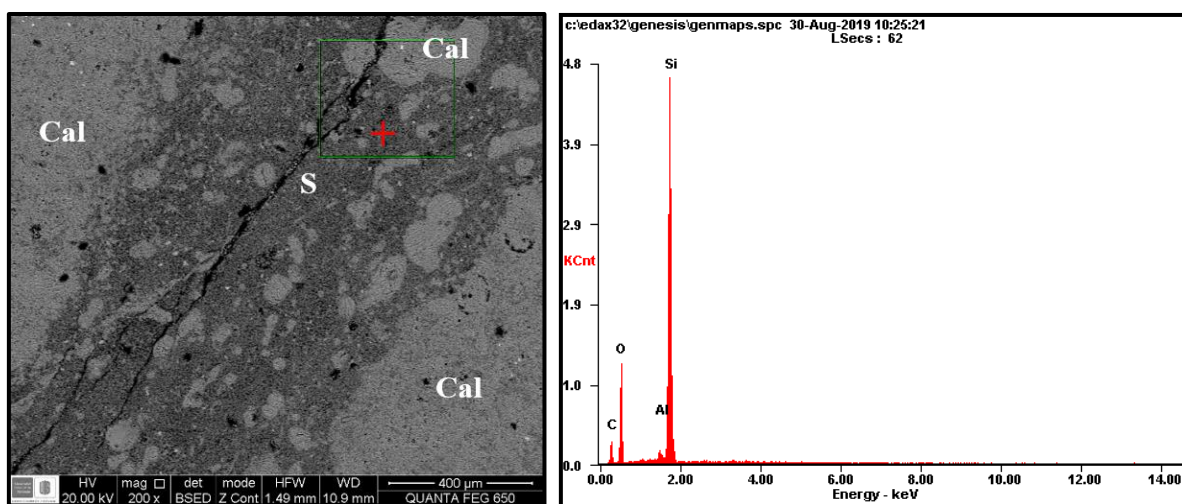


Figura 46. Imagen de electrones retrodispersados (para composición) con aumento de 200x que muestra el contraste entre una matriz calcárea VS una silícea, con el correspondiente espectro EDX de la matriz silícea. Laboratorio de microscopía electrónica de barrido, UIS.

6.1.5. Difracción de rayos x (DRX): Mediante este método se estudiaron las muestras de pseudoesparita y arcilla que respectivamente son VAN-33-09 con código interno 19322001 y VAN-33-11 con código interno 19322002 y 19322003 (a este último, se le adicionó etilenglicol). El propósito de este análisis consistió en identificar las fases minerales para cada muestra que complementa los análisis petrológicos, petrográficos y de SEM. Se utilizó un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander. Las fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 2004 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

- **Muestra: VAN-33-09 (Cód. 19322001), Pseudoesparita**

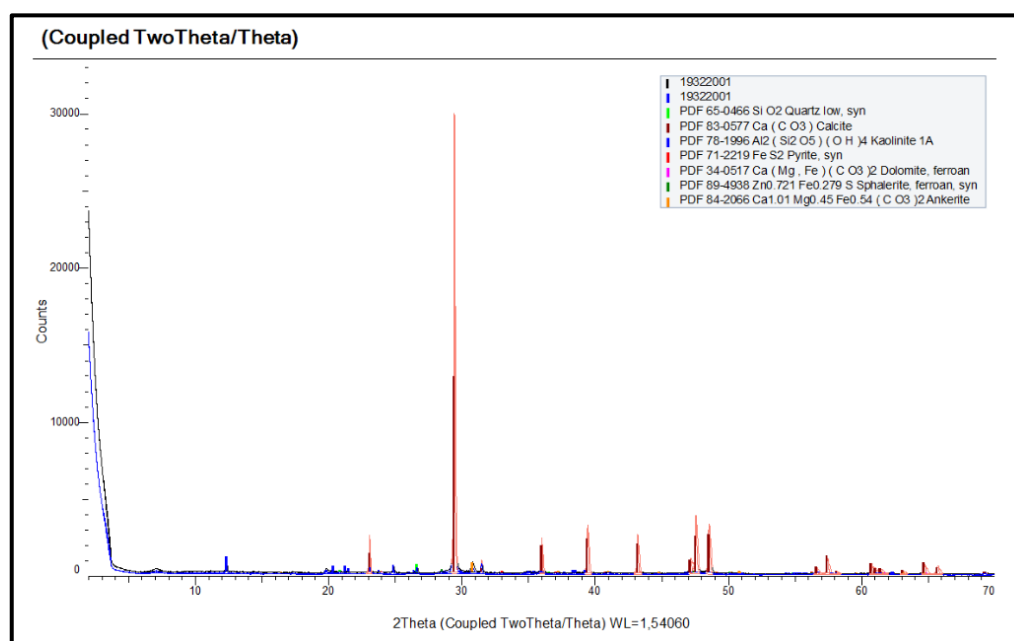


Figura 47. Difractograma de rayos X de la muestra VAN-33-09 que muestra 7 fases minerales (ver tabla.) identificadas mediante análisis comparativo con la base de datos PDF-2 2004 utilizando el software EVA, Universidad Industrial de Santander.

Tabla 7. Fases minerales identificadas en la muestra VAN-33-09 (Cód. 19322001).

Nombre del mineral	Fórmula	Sistema	Número de patrón
Quartz low, syn	SiO ₂	Hexagonal	PDF 65-0466
Calcite	Ca (CO ₃)	Rombohedral	PDF 83-0577
Kaolinite 1A	Al ₂ (SiO ₅) (OH) ₄	Anórtico (triclínico)	PDF 78-1996
Pyrite, syn	FeS ₂ , syn	Cúbico	PDF 71-2219
Dolomite, ferroan	Ca (Mg, Fe) (CO ₃) ₂	Rombohedral	PDF 340517
Sphalerite, ferroan, syn	Zn _{0.721} Fe _{0.279} S	Cúbico	PDF 89-4938
Ankerite	Ca _{1.01} Mg _{0.45} Fe _{0.54} (CO ₃) ₂	Rombohedral	PDF 84-2066

Nota: Fases minerales identificadas en la muestra VAN-33-09 (Cód. 19322001).

- **Muestra: VAN-33-11 (Cód. 19322002 y 19322003), Arcilla:** Superposición de difractogramas de la muestra VAN-33-11 (Arcilla) en seco y con etilenglicol solvatado, que muestra expansión de 1 Å de la arcilla, correspondiente a un interestratificado de arcilla no expansiva/ expansiva (illita/ smectita).

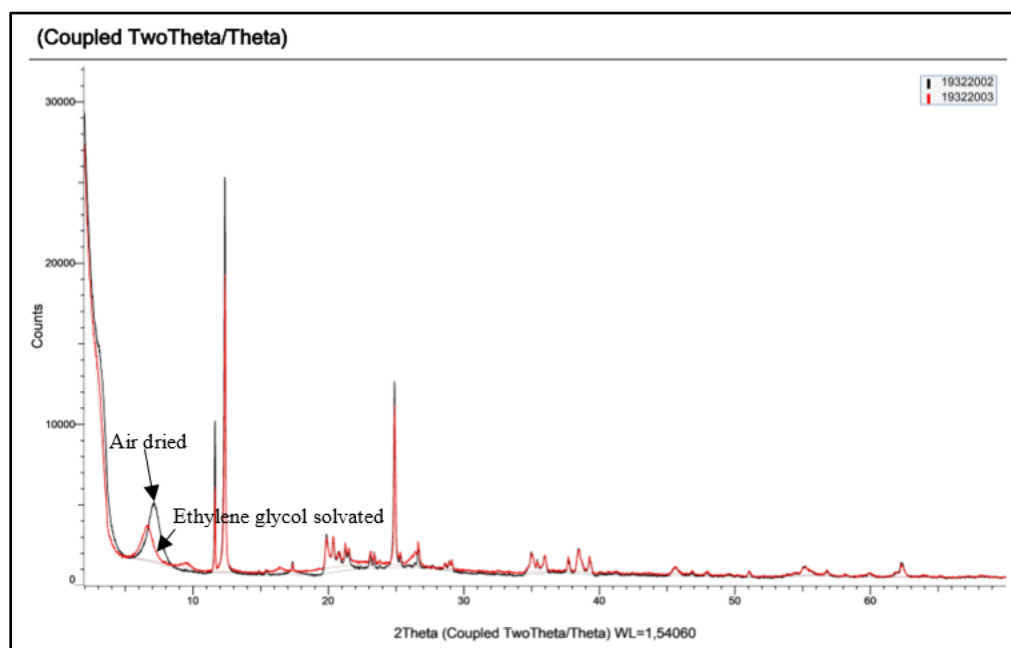


Figura 48. Difractograma de interestratificado de illita/ esmectita, correspondiente a la muestra VAN-33-11 (Cód. 19322002 y 19322003). Laboratorio de rayos X, Universidad Industrial de Santander.

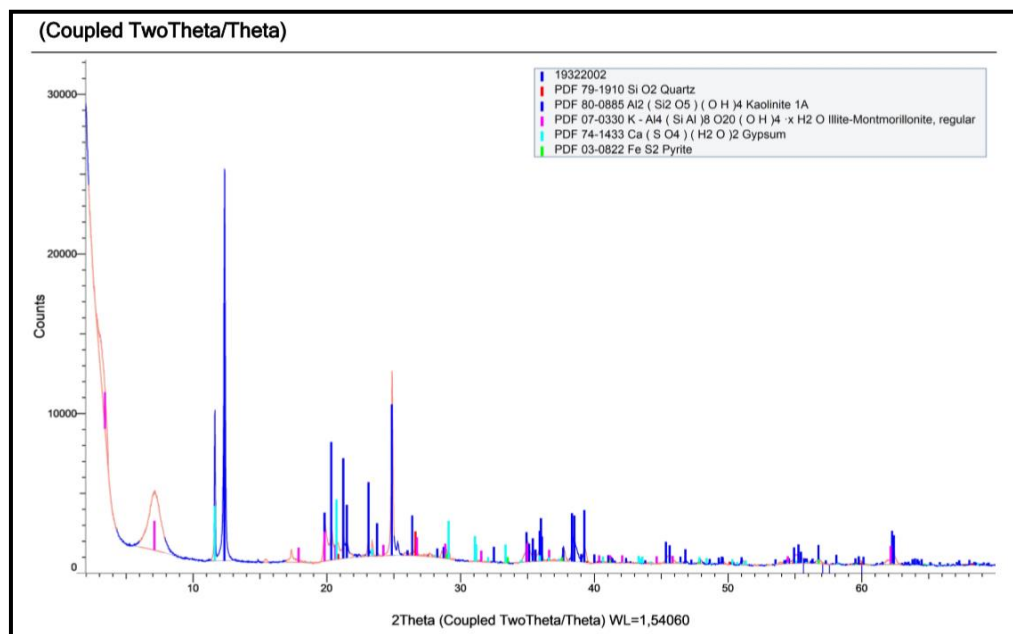


Figura 49. Difractograma de rayos X de la muestra VAN-33-11 que muestra 5 fases minerales (ver tabla.) identificadas mediante análisis comparativo con la base de datos PDF-2 2004 en el software EVA, Universidad Industrial de Santander.

Tabla 8. Fases minerales identificadas en la muestra VAN-33-11 (Cód. 19322002 y 19322003).

Nombre del mineral	Fórmula	Sistema	Número de patrón
Kaolinite	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Anórtico (triclínico)	PDF 80-0885
Illite-Montmorillonite, regular	$\text{K-Al}_4 (\text{Si Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_4 \times \text{H}_2\text{O}$	No asignado	PDF 07-0330
Quartz	Si O_2	Hexagonal	PDF 79-1910
Gypsum	$\text{Ca} (\text{SO}_4) (\text{H}_2\text{O})_2$	Monoclinic	PDF 74-1433
Pyrite	Fe S_2	Cubic	PDF 03-0822

7. Discusión

De manera general, el Miembro Salada de la Formación La Luna en el área de estudio, está constituido por la intercalación de capas de biomicritas de foraminíferos planctónicos con alto contenido de materia orgánica (Kerógeno?), intercaladas con capas de caliza recristalizada (pseudoesparita) que particularmente Sarmiento, (2015) ha asociado al aporte de cenizas volcánicas durante la etapa de diagénesis de la roca, que fomenta además la silicificación parcial de las capas adyacentes.

Para análisis químico, las muestras VAN-33-08 Y CFA-01 son representativas de las biomicritas ricas en materia orgánica anteriormente mencionadas, y la muestra VAN-33-09 de la pseudoesparita. De acuerdo con los resultados, se obtuvo que la pseudoesparita presenta valores anómalos de Au correspondiente a una concentración de 56,8 ppb sobrepasando el contenido de Au en la corteza de 4 ppb, según Li (1976). En contraste, las muestras de biomicrita presentan valores relativamente insignificantes de <0,5 ppb. Con base a esto, son los niveles de pseudoesparita los que representan un interés desde el punto de vista de mineralización aurífera.

Macroscópicamente, esta litología resalta por su color gris claro ligeramente verdoso relacionado con el bajo a nulo contenido de materia orgánica, por su grado de recristalización, y alta dureza. En afloramiento, se observaron capas de 6 a 50 cm de espesor normalmente limitadas por niveles delgados entre 1 a 4 cm de arcilla color verdoso (Bentonita?).

Microscópicamente, además de los mosaicos de calcita neomórfica, es apreciable el contenido de minerales opacos observados mediante microscopía de luz transmitida y cuantificados por el método de conteo de puntos entre 15 a 19.37 %, razón por la cual, se realizaron estudios de

análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) para complementar su composición mineralógica.

La integración de los resultados de estos análisis permitió la interpretación de una asociación mineral compuesta por: pirita (framboidal, cúbica y anhedral), esfalerita, caolinita, calcita, apatito, cuarzo, ankerita y dolomita.

Por medio del estudio en SEM, se pudo determinar que el oro se encuentra dentro de la estructura de las piritas en concentraciones de hasta 4,31 %W. Este resultado puede ser comparado con las piritas de arsénico en el depósito de oro tipo Carlin llamado Deep Star las cuales contienen hasta 0.37 %W de Au (Fleet & Mumin, 1997). Este trabajo hace relación a oro invisible debido a que los tamaños de las piritas medidas en SEM varían de 1,2 a 93 μm , por tal razón, el oro presente debe ser de dimensiones mucho más pequeñas, ya que aun a 30000x aumentos fue imposible ver alguna partícula de oro.

El termino de oro invisible fue introducido por Bürg (1930) para denotar oro en solución sólida y de tamaño coloidal o según Cook y Chryssoulis, (1990) se refiere a tamaños menores a 250 nm. Ambas formas físicas son comunes en algunos depósitos epitermales y de tipo Carlin (Palenik et al., 2004; Reich et al., 2005; Deditius et al., 2011).

Una de las limitaciones de este trabajo radica en el número insuficiente de análisis químicos, además de la falta de otros estudios complementarios como estudios isotópicos y geofísicos, que puedan ayudar a explicar la procedencia del oro; pero a pesar de esto, con la información obtenida y los antecedentes acerca de la posible mineralización de oro tipo Carlin a la que se refiere la empresa Alicanto Colombia S.A.S. se pueden hacer algunas consideraciones.

Teniendo en cuenta que en campo no se observaron cuerpos de rocas ígneas o metamórficas, no es posible relacionar la procedencia del oro con fluidos mineralizantes derivados directamente

de magmas o de la desvolatilización metamórfica de las rocas sedimentarias adyacentes. Por otro lado, esta ausencia pudiera ser relacionada con la geología de los depósitos tipo Carlin en China mencionados por Rui-Zhong en el 2002, quien basado en estudios isotópicos, sugiere que el agua en los fluidos mineralizantes es de agua meteórica; propone que el oro fue transportado como un complejo de bisulfuro, y por esta razón la fuente de H_2S_2 cuya procedencia se deriva en gran medida de la disolución de piritita diagenética, es muy importante para imponer restricciones a la fuente de oro. Rui-Zhong menciona que el oro en este caso tuvo que haber venido de algún lugar entre los sitios de generación de H y los sitios de precipitación mineral.

Hunt, (1996) propone que la materia orgánica pudo haber sido una fuente directa y un ingrediente crítico para la formación de H_2S mediante la reducción termoquímica de sulfato, además, Hofstra y Cline, (2000) afirman que la materia orgánica mantiene una condición reducida en el fluido, y, por tanto, el H_2S como la forma predominante de S en el fluido permite que las soluciones hidrotermales eliminen y transporten el Au a los sitios de formación de mineral.

En los depósitos de oro al oeste de la región de Qinling en China, Liu et al. (2015) menciona que los fluidos mineralizantes ascendían y se enfriaban, y progresivamente el H_2CO_2 se disociaba, generando fluidos cada vez más ácidos (pH 4-6) que disolvían el carbonato y los feldespatos hidrolizados en caolinita, dickita o illita.

La silicificación es una característica importante a causa de la alteración hidrotermal en este tipo de depósitos. Existen dos tipos: la silicificación tipo 1, cuyo rasgo distintivo es el cambio en el color de las rocas de gris oscuro a gris claro, la materia orgánica incluso se destruye y se altera a colores blancos grisáceos; la silicificación tipo 2 es sílice que en la etapa inicial de mineralización hidrotermal, se manifiesta como una vena o capas delgadas que se llenan en la

zona de corte frágil-dúctil. Las características litológicas de las rocas o minerales hospedantes silicificados son duros, densos y en su mayoría de color gris claro o gris (Liu et al. 2015).

Por otro lado, la asociación mineral en la etapa de mineralización según Arehart et al. (1993b), Arehart (1996), Hofstra y Cline (2000), incluye la pirita de Arsenio que contiene oro, la marcasita, el cuarzo, caolinita, dickita e illita, cuya granulometría es fina y típicamente aparece en volúmenes menores a insignificantes en comparación con los minerales de la roca huésped que incluyen cuarzo, micas, minerales de arcilla, dolomita, calcita, pirita y diversas formas de carbono.

Según Liu et al. (2015), la mineralización de oro en los depósitos tipo Carlin de China, en la etapa temprana es débil con concentraciones de Au entre 0.01 y 0.1 g/t. En la etapa tardía, los minerales presentes son generalmente macroscópicos y precipitan en cavidades o fracturas transversales cuando los sistemas hidrotermales colapsan y se enfrían (Hofstra et al., 1991). Generalmente, se encuentra calcita, pirita y/o marcasita, cuarzo, oropimente, rejalgar y estibina, con rejalgar y calcita que típicamente han precipitado en último lugar. Otros minerales, como galkhaita, fluorita, cinabrio, esfalerita y telururos, están presentes en algunos, pero no en todos los depósitos (Hofstra y Cline, 2000); la calcita y la ankerita se desarrollaron en la mineralización tardía y se distribuyen en un área limitada (Liu et al. 2015).

Contrastando lo anteriormente mencionado, la ausencia de cuerpos ígneos o metamórficos, la naturaleza dominante en materia orgánica de la Formación La Luna, la posible silicificación tipo 1 relacionada con los niveles de caliza recrystalizadas y la asociación mineral mencionada por Liu et al. (2015), Arehart et al. (1993b), Arehart (1996), Hofstra y Cline (2000), las calizas objeto de este estudio guardan alguna similitud con lo propuesto por los mencionados autores.

La concentración en Au de 0.056 g/t Au presente en la pseudoesparita, de acuerdo a los datos proporcionados por Liu et al. (2015) se correlacionaría a una etapa pre-mineralización a evento Carlin temprano, sin embargo es una aproximación y se necesitan mayor cantidad de análisis complementarios.

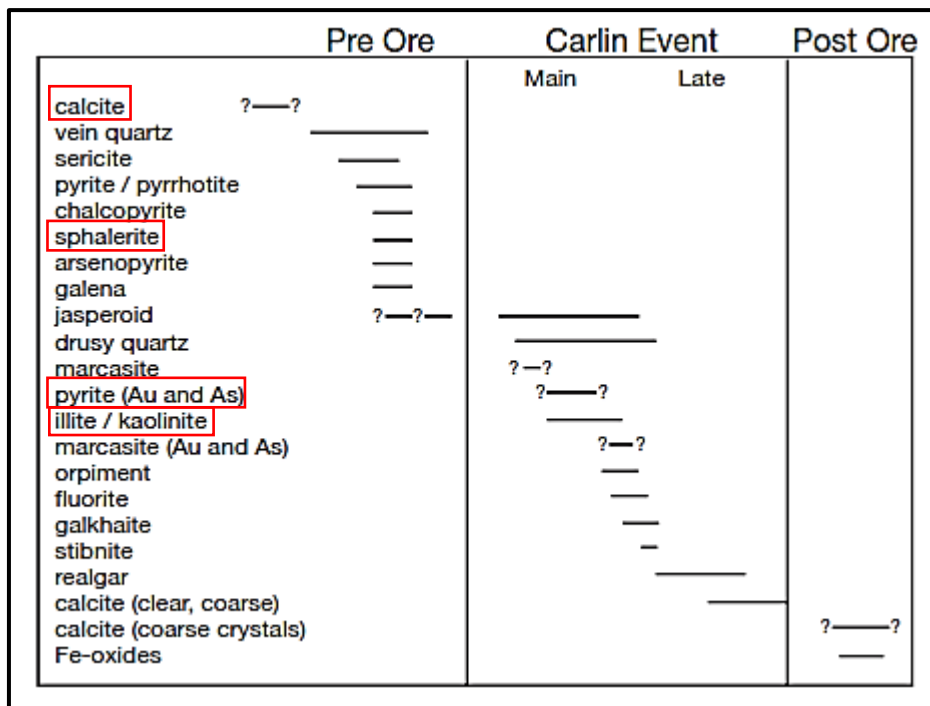


Figura 50. Secuencia paragenética de minerales pre-mineralización, evento Carlin y post-mineralización, determinados para el depósito Getchell-Nevada. (Modificado de Cline y Hosfra, 2000). En rojo se marcan los minerales presentes en la muestra VAN-33-09.

Entender el dominio estructural que caracteriza a los depósitos tipo Carlin y la forma de sus cuerpos mineralizados podría significar un aporte o contradicción a la correlación de los resultados obtenidos en este trabajo con la ocurrencia de este tipo de yacimiento.

De acuerdo con Cline, et al, (2005) los depósitos tipo Carlin tienen diversas formas en sus cuerpos mineralizantes, pueden presentarse tabulares, ligado a estratos, en forma de zanahoria, forma de T, e irregulares, estas características están reflejadas por zonas locales de porosidad y

permeabilidad que resultan de características litológicas favorables como unidades de carbonato reactivo, depósitos de flujo de escombros, cambio de facies, entre otras. Generalmente están cubiertos por horizontes menos permeables, y las mejores calidades de mineralización se concentran comúnmente debajo de domos o anticlinales donde las estructuras de ángulo alto actúan como alimentadores en un estilo similar al de los yacimientos de petróleo, sin embargo, existen cuerpos relacionados con fallas de bajo ángulo y estratiformes que pueden tener zonas de raíz que se proyectan hacia fallas de alimentación de ángulo alto (Cline, et al, 2005). Regularmente los depósitos tipo Carlin pueden estar en un rango de 0.3 a 3 km de profundidad, aunque los depósitos más profundos suelen encontrarse a 5 km (Hofstra y Cline, 2000, y referencias allí; Hickey et al., 2003a; Nutt y Hofstra, 2003).

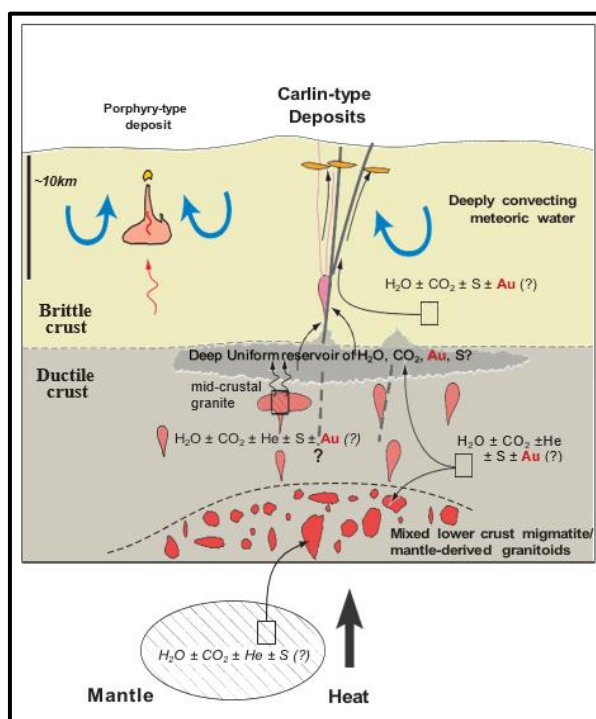


Figura 51. Modelo que ilustra los procesos asociados con la generación de fluidos hidrotermales que evolucionaron para convertirse en fluidos minerales para depósitos de tipo Carlin, mostrando ubicaciones dentro de la corteza que pueden haber contribuido con Au y otros componentes de fluido mineralizante. Adaptado de Cline, 2005.

Con respecto a la firma geoquímica de los depósitos Tipo Carlin, investigaciones realizadas por varios autores sobre elementos traza en los depósitos tipo Carlin, como, Akright, Radtke y Grimes (1969), Joralemon (1951), Radtke, Dickson y Rytuba (1974), Wells, Stoiser y Elliott (1969), y Wrucke y Armbrustmacher (1975), han establecido que los elementos oro (Au), mercurio (Hg), arsénico (As) y antimonio (Sb) siempre aparecen en este tipo de depósitos.

Harris y Radtke (1936) proponen que el oro y el mercurio se transportaron en la misma solución y se precipitaron simultáneamente, asociándose a la fase de eliminación de calcita, precipitando con materiales orgánicos o recubriendo granos de pirita junto con arsénico y antimonio.

West ore body		Main ore body		East ore body	
Element pair	Correlation coefficient	Element pair	Correlation coefficient	Element pair	Correlation coefficient
Sb to As	0.87	Au to Hg	0.62	Au to Hg	0.48
Au to Sb	.85	Au to Sb	.62	Au to As	.23
Au to As	.81	Sb to As	.47	As to Hg	.19
Au to Hg	.68	As to Hg	.41	As to Sb	.19
Sb to Hg	.56	Sb to Hg	.40	Au to Sb	.08
As to Hg	.54	Au to As	.34	Sb to Hg	.00

Figura 52. Coeficientes de correlación lineal entre oro, mercurio, arsénico y antimonio para los cuerpos de mineral de West, Main y East en los depósitos de oro de Carlin. Estadística realizada con base en los análisis de 239 muestras de roca. Adaptado de Harris, M. & Radtke, A. (1936).

En los estudios acerca de los depósitos de oro tipo Carlin en Nevada, Harris y Radtke (1936) mencionan que el cuerpo mineral The West está asociado con la escasez de arsénico, antimonio, sulfuros de mercurio y carbono orgánico, correspondiente a la etapa temprana de mineralización. Esta interpretación podría relacionarse con los datos obtenidos de la muestra de pseudoesparita (VAN-33-09) en los que se tiene escasez de Hg, As, Sb, mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Elementos químicos (Au, Hg, As, y Sb) obtenidos del ICP-MS para las calizas de la Formación La Luna.

Muestra	Litología	Au,ppb	Hg,ppb	As,ppm	Sb,ppm
VAN-33-09	Pseudoesparita	56,8	20	16,7	0,74
VAN-33-08	Biomicrita	< 0.5	30	24,3	3,93
CFA-01	Biomicrita	< 0.5	50	17,7	6,11

La correlación de los elementos químicos se realiza mediante diferentes métodos estadísticos, que pueden brindar datos muy importantes en el conocimiento de la paragénesis geoquímica de los depósitos de oro, pero para ello, es necesario tener una gran densidad de análisis químicos; por esta razón, este tratamiento de datos no fue posible hacerlos en este trabajo debido a los escasos análisis realizados, sin embargo, se sugiere que en trabajos futuros esta sección se pueda llevar a cabo, en busca de sustentar o refutar su relación con los depósitos de oro tipo Carlin.

“La arcillosidad no sólo es indicadora de somerización, también lo es de episodios asociados a acumulación de cenizas volcánicas que generan arcillas, sílice microcristalina, cristales de cuarzo, feldespatos y otros minerales” (Sarmiento, 2015, p.32). En la sección levantada del Miembro Salada, fueron identificados delgados niveles de arcilla color verde oliva claro, los cuales autores como Rangel et al., 2000 describen como capas de bentonitas.

Los resultados obtenidos por medio de análisis DRX realizados a la arcilla antes mencionada, clasifican a la muestra como una arcilla interestratificada de illita/ montmorillonita, con minerales de cuarzo, kaolinita, pirita, y yeso; siendo la montmorillonita parte del grupo de las esmectitas.

Entre las variedades de la bentonita, la bentonita potásica o metabentonita es definida por Cingolani, (1997) como un interestratificado de illita-esmectita, cuya estructura está relacionada con las condiciones de enterramiento de la roca durante la diagénesis, transformando de manera progresiva la esmectita a illita en la medida que aumenta la profundidad de enterramiento (Bonilla

Osorio, Sarmiento Pérez, & Gaviria Melo, 2011). De esta manera, los niveles de arcilla encontrados en la sección del miembro Salada tienen gran relación con las bentonitas potásicas, anteriormente descritas.

Las bentonitas, también pudieran ser un aporte de mineralización, ya que un estudio de cenizas en Rusia se encontró oro nativo en las cenizas del volcán Eyjafjallajkull de 10 nm, encontrándose con otros metales nobles como plata, platino y rodio, además de hierro, carbono y silicio. (Baturin, Dubinchuk y Manevich, 2012).

La génesis de los yacimientos tipo Carlin es muy complicada, y presenta gran variedad de características geológicas en cada uno de los yacimientos reconocidos en el mundo. Si bien, en este trabajo se especula acerca de posibles similitudes con algunos modelos de este tipo de mineralización, realmente es necesario respaldar la información con otros estudios que permitan dar una mejor claridad acerca de la proveniencia del oro.

8. Conclusiones

Las calizas clasificadas como pseudoesparitas, según resultados de este trabajo, corresponden a la litología más favorable para eventuales procesos de mineralización de Au invisible.

Los datos de campo y los resultados con las técnicas analíticas utilizadas muestran cierta analogía con la información obtenida de las fuentes consultadas y relacionadas con los depósitos de oro tipo Carlin.

Las condiciones geológicas y geoquímicas de formación de las rocas carbonatadas de la Formación la Luna son propicias para adelantar trabajos de exploración de Au tipo Carlin.

La presencia de interposiciones de láminas y capas delgadas de arcillas (bentonitas) que se han reconocido en otros estudios con estas rocas, e interpretados como cenizas volcánicas, permiten suponer e involucrar fuentes externas con aporte de material detrítico y contenidos de sílice, apatito, feldespatos e incluso de Au. (Cenizas de volcanes con presencia de Au tamaño 10 nanómetros).

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio sistemático en el que se incluya un mayor número de análisis químicos en los niveles calcáreos que se plantearon como favorables para la existencia de oro.

Complementar los estudios realizados en este trabajo, con los respectivos análisis que permitan obtener una base más sólida acerca de los criterios que pudieron favorecer la formación del oro en las pseudoesparitas.

Caracterizar la Formación La Luna en el área de estudio con el fin de reconocer la extensión de estos niveles de roca en el Miembro Salada.

Estudios magnéticos y gravimétricos que complementen la información estratigráfica y estructural en profundidad, así también para detectar la presencia de cuerpos ígneos que no afloran.

Realizar estudios de isotopos de hidrogeno y oxígeno en los minerales que se encuentran en los cuerpos de roca de pseudoesparita con el fin de reconocer la procedencia del agua dentro de los fluidos que depositaron estos minerales y comprobar o refutar la influencia del agua meteórica como modelo de mineralización.

Efectuar estudios de composición de inclusiones de vidrio en la bentonita para correlacionar los eventos volcánicos que tuvieron simultaneidad con la depositación de la Formación La Luna y a su vez si estos tuvieron relación con el contenido de oro en las capas de pseudoesparita.

Realizar estudios con enfoque hacia el oro invisible en nuevas zonas con características favorables para su posible formación.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Lebrija (2003). Esquema de Ordenamiento Territorial Lebrija. Lebrija, Colombia
- ANH,. (2012). Cuenca Valle Medio del Magdalena, integración geológica de la digitalización y análisis de Núcleos. Bogotá. Colombia: *Agencia Nacional de Hidrocarburos*.
- Arehart, G.B., Chrysoulis, S.L., and Kesler, S.E. (1993b). Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: Implications for depositional processes: *Economic Geology*, v. 88, p. 171–185.
- Arehart, G.B. (1996). Characteristics and origin of sediment-hosted disseminated gold deposits: *A review: Ore Geology Reviews*, v. 11, p. 383–403.
- Arias, A. (1978). Geología de las planchas 86 Abrego, y 97 Cáchira; Departamento de norte de Santander. Colombia: *Ministerio de Minas y Energía- INGEOMINAS*.
- Akright, R. L., Radtke, A. S., and Grimes, D. J. (1969). Minor elements as guides to gold in the Roberts Mountains Formation, Carlin gold mine, Eureka County, Nevada, in Canney, F. C., and others, eds., Proc. Internat. Geochem. Explor. Symposium, 1968: *Colorado School of Mines Quart.*, v. 64, no. 1, p. 49-66.

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH - Edited and compiled by: *ANH and B&M Exploration Ltda.* Bogotá.
- Baturin, G. N., Dubinchuk, V. T., y Manevich, T. M. (2012). Species of graphite, phosphorus, and some heavy metals in volcanic ashes: *Doklady Akademii Nauk*, v. 451, No. 3, p. 318-322.
- Bonilla O, G.E., Sarmiento P, G. A., y Gaviria M, S. (2011). Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos del Maastrichtiano – Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia: *Geología Colombiana, Edición Especial*, 36 No. 1, 179-196
- Bürg, G.H. (1930): Die Sichtbarmachung des feinverteilten Goldes in göldhoffingen Erzen und ihre wirtschaftliche Bedeutung: *Metall, Erz* 27, 333-338
- Boinet, T., Bourgois, J., y Mendoza, H. (1985). Tectónica de sobrecojrimiento y sus implicaciones estructurales en el área Pamplona-Cordillera Oriental de Colombia. *Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología, UIS*, 15 (29): 81-97.
- Bonilla O, G.E., Sarmiento P, G. A., y Gaviria M, S. (2011). Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos del Maastrichtiano – Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia: *Geología Colombiana, Edición Especial*, 36 No. 1, 179-196

- Caballero, V., Parra, M. & Mora, A.R. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología* 32. 45-77.
- Campbell, C. J. (1965). The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting. Fourth Caribbean Geological Conference. *Trinidad. Memoir*: 247-261.
- CDMB (2010). Estudio Ambiental para el Ordenamiento y Manejo de la Subcuenca Cáchira Sur. Bucaramanga. Colombia: *Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga*.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental: Servicio Geológico Nacional (Colombia): *Bol. Geológico*, v. XVI, p. 5-96
- Cingolani, C. A., Huff, W., Bergstrom, S., y Kolata, D. (1997). Bentonitas potásicas ordovícicas en la Precordillera de San Juan y su significación tectomática. *Revista de la Asociación Geológico Argentina*, 52(1): 47-55.
- Cline, J. S., Hofstra, A. H., Muntean, J. L., Tosdal, R.M., y Hickey, K. A. (2005). Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geological Characteristics and Viable Models.: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 451-484.

Cook, N.J. y Chryssoulis, S.L. (1990) Concentration of “Invisible Gold” in the common sulfides: *Canadian Mineralogist*, v-28, p. 1-16.

Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Buchelli, F., Sotelo, C. (2001). Proyecto evaluación regional del Valle Medio del Magdalena y Cordillera: *Ecopetrol*, informe interno: Bogotá

Cruz, L. E. y Caballero, V. M. 2007. Guías de Laboratorio de Sedimentología para Geólogos. *Publicaciones UIS*, 89 p.

Cruz M., J., Valls Álvarez, R. A., & Jones Navas, F. (2015). PTO Contrato de Concesión JG3-16392. Bucaramanga.

Cuellar C., M. A., López, J., Naranjo, J., y Carrillo, E. (2012). Análisis Estructural del Segmento Bucaramanga del Sistema de Fallas de Bucaramanga (SFB) entre los Municipios de Pailitas y Curumaní, Cesar-Colombia: *Boletín de Geología*, v. 34, p. 73-101

Deditius, A.P., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S.E., Ewing, R.C., Hough, R., and Walshe, J. (2011). Trace metal nanoparticles in pyrite: *Ore Geology Reviews*, v. 42, p. 32–46.

Dunham, R.J. 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional textures: *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 1: p. 108–121.

- Fabre, A. (1987). Tectonique et Generation: un modele de l'évolution de la Cordillerie Orientale de Colombia et du basin des Llanos pendant le Cretace et le Tertiaire: *Archive de Science, Geneve*, 40: 145-190.
- Fleet, M.E. y Mumin, A. H. (1997). Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis: *American Mineralogist*, v. 82, p. 182-193.
- Folk, R.L., 1959, Practical petrographic classification of limestones: *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* v. 43/1, p. 1–38.
- Folk, R.L. 1962, Spectral subdivision of limestone types, *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 1, p. 62–84.
- Guerrero, C. (2012). Descripción petrográfica y análisis diagenético y proveniencia de la Formación Umir. Trabajo de Grado, *Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia*, Bogotá.
- Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S., & Heizler, M. (2003). Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia: *GSA Bulletin*, v. 115, p. 131–147.

- Harris, M. & Radtke, A. (1936) Statistical study of selected trace elements with reference to geology and genesis of the Carlin gold deposit, Nevada: *Geological Survey Professional Paper 960*, p. 20-21.
- Hedberg, H. (1931). Cretaceous limestone as petroleum source rock in Northwestern, Venezuela: *AAPG vol. 15. No. 3*, pp 229-247.
- Hettner A. (1892).-Die Kordillere von Bogota: Gotha, Patermans Mitteil., *Bd. 22*, *Erganzungsheft 104*, 131 p.
- Hickey, K.A., Donelick, R.A., Tosdal, R.M. and McInnes, B.I.A., (2003^a), Restoration of the Eocene landscape in the Carlin-Jerritt Canyon mining district: Constraining depth of mineralisation for Carlin-type Au-deposits using low-temperature apatite thermochronology [abs.]: *Geological Society of America Abstracts with Program*, v. 35, no. 6, p. 358.
- Hofstra, A.H., Leventhal, J.S., Northrop, H.R., Landis, G.P., Rye, R.O., Birak, D.J., and Dahl, A.R.. (1991). Genesis of sediment-hosted disseminated gold deposits by fluid mixing and sulfidization: Chemical-reactionpath modeling of ore-depositional processes documented in the Jerritt Canyon district, Nevada: *Geology*, v. 19, p. 36–40.
- Hofstra, A.H., and Cline, J.S. (2000). Characteristics and models for Carlintype gold deposits: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 163–220.

- Huff, W.D., Bergstrom, S.M. y Kolata, D.R. (1992). Gigantic ordovician volcanic ash fall in North America and Europe: Biological tectonomagmatic, and event-stratigraphic significance: *Geology*, 20; 20: 875-878
- Hunt, J.M. (1996) Petroleum geochemistry and geology: *New York, Freeman*, 743 p.
- Jaramillo, C.A. & Dilcher, G. (2001). Middle Paleogene palynology of central Colombia, South America: A study of pollen and spores from tropical latitudes: *Paleontographica, Abt. B. Bd.* 258: 87 213.
- Joralemon, P. (1951). The occurrence of gold at the Getchell mine, Nevada: *Econ. Geology*, v. 46, no. 3, p. 267-310.
- Julivert, M.. (1958.)La infraestructura de la zona de Mesas al SW de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología, UIS*, 1: 7-44.
- Laverde, F. (1985). La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del Cretácico. *Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, (16) Capítulo XX. p. 1-22. Bogotá.
- Li, T., (1976), Chemical element abundances in the earth and its major shells: *Geochimica*, 3, p. 300-310 (in Chinese with English abstract)

- Lozano, H., y Pulido, O. (1986). Situación Actual del Oro y la Plata en Colombia. Geología, genesis, aspectos mineros, reservas y producción: *Boletín de Geología Ingeominas*, v. 27. No. 3, pp. 1-56.
- Mantilla, F.L.C., Mendoza, H., Bissig, T., y Hart C. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33 (1): 41-56.
- Mantilla, F.L.C., Bissig, T., Mendoza, H., Rueda, J., Cruz, N., Pinilla, O., Reyes, S., Mendoza, M., Suarez, G., Sánchez, S., Palacio, A., Rojas, J., Reyes, J., Mendoza, G., Carrillo, J., León, H., y Hart, C. (2013b). Consideraciones sobre el magmatismo Neógeno en el Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia) y su relación con la metalogénesis del Au ($\pm$ Ag, Mo, Cu): XIV Congreso Colombiano de Geología y Primer Simposio de Exploradores. *Memorias Digitales del Congreso* ISBN-978 958-57950-0-6. Bogotá.
- Morales, L. G. Podesta, D. J., Hatfield, W. C., Tanner, H., Jones, S. H., Barker, M. H., O'donoghue, D. J., Moler, C. E., Dubois, E. P., Jacobs, C., And Goss, C. R. (1958) General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: *Habitat of Oil. Symposium, American Association of Petroleum Geologists*. P. 641-695.
- Nutt, C.J., and Hofstra, A.H.. (2003). Alligator Ridge district, east-central Nevada: Carlin-type gold mineralization at shallow depths: *Economic Geology*, v. 98, p. 1,225–1,241.

- Palenik, C.S., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S.E., Wang, L., and Ewing, R.C. (2004)
“Invisible” gold revealed: Direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit:
American Mineralogist, v. 89, p. 1359–1366
- Radtke, A. (1936). Geology of the Carlin gold deposit, Nevada: *Geological Survey profesional paper*; 1267, p.120
- Radtke, A. S., Dickson, F. W., and Rytuba, J. (1974). Genesis of disseminated gold deposits of the Carlin type: *Geol. Soc. America Abs. with Programs*, v. 6, no. 3, p. 239-240.
- Rangel, A., Parra, P. (2000). The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic Facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry* 31. p 1267 – 1284
- Reich, M., Kesler, S.E., Utsunoyiya, S., Palenik, C.S., Chrysoulis, S., and Ewing, R.C. (2005). Solubility of gold in arsenian pyrite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Renzoni, G., 1969. Geología del Cuadrángulo J-12, Tunja. Ingeominas. *Boletín Geológico*. 24 (2) (1981), p. 31-48. Bogotá.
- Royero, J. Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa mapa geológico generalizado departamento de Santander. Bogotá: *Ministerio de Minas y Energía- INGEOMINAS*.

- Rui-Zhong, H., Wen-Chao, Su., Xian-Wu, B., Guang-Zhi, Tu., y Hofstra, A. H. (2002). Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China: *Mineralium Deposita*, 37, p. 378-392.
- Sarmiento, G. (2015). Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. Bogotá: *Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia*.
- Sarmiento, L. F. (2002). Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Ph.D. thesis, 295 pp., Vrije Univ., Amsterdam.
- Tschanz C.; Marvin R.; Cruz B.; Mehnert H. and Cebulla C. (1974). Geologic Evolution of Sierra Nevada de Santa Martha, Northerastern Colombia, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85: 273-284.
- Van der Hilst, R. and Mann, P. (1994). Tectonic implication of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology* 22: 451–454.
- Ward, D. G. (1973). Memoria Explicativa: Cuadrángulo H-12 Bucaramanga Planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga. Bogotá: *Ministerio De Minas Y Energía Instituto Colombiano De Geología y Minería*.
- Weaver, C. E. (1963). Interpretive value of heavy minerals from bentonites. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33, 343–9.

Wells, J. D., Stoiser, L. R., and Elliott, J. E. (1969). Geology and geochemistry of the Cortez gold deposit, Nevada: *Econ. Geology*, v. 64, no. 5, p. 526-537.

Welton, J.E. (2003). SEM Petrology Atlas. Methods in Exploration Series No. 4. *The American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, Oklahoma, 240 p.

Wheler, O., (1929): Report on the Palmira series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama, and La Paz formation near the eastern part of the Mares concession. *Int Emp. Col. Petr.* (inédito)

Wrucke, C. T., and Armbrustmacher, T. J. (1975) Geochemical and geologic relations of gold and other elements at the Gold Acres open pit mine, Lander County, Nevada: U.S. *Geol. Survey Prof. Paper* 860, 27 p.