

Evaluación de potencial de uso agrícola de las rocas evaporitas originarias de Los Santos,
Santander.

Aldo Julián Molano Sierra y César Arturo Vera Flórez

Trabajo de Grado para Optar Título de Geólogo

Director

Carlos Alberto Ríos Reyes

Geólogo MSc PhD

Codirector

Carlos Alberto Villarreal Jaimes

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

En primer lugar, agradecer a **Dios** por darme la oportunidad de poder realizar este proyecto, brindarme, salud, habilidades y las destrezas siempre para seguir adelante.

A mi **familia** por ser mi apoyo incondicional en todo momento, ser mis guías en la vida y ejemplo a seguir, a mi padre por ser mi guía en todo este proceso, orientación y mi aliento, a mi madre por siempre creer en mí y apoyarme en todos mis proyectos y a mi hermano que es mi compañía.

A todos los **maestros** que me apoyaron y transmitieron un poco de su sabiduría, enseñándome cada día algo nuevo y abriendo nuevas perspectivas a como ver la realidad.

A todas las personas con las que he compartido en mi proceso de formación y el desarrollo de este trabajo, cada experiencia vivida en conjunta llena de riquezas y enseñanzas para toda la vida.

A mis **amigos**, los cuales han dejado huella en mí, acompañándome en todos los procesos y siempre estando presentes, por su apoyo, compañía y consejo.

A aquella persona, que siempre saco lo mejor de mí en todo momento, mi compañía y mi luz, a pesar del tiempo, sigue estando allí *vc.*

A la **Universidad industrial de Santander**, la cuál me ha brindado no solo espacios académicos sino ciudadanos, críticos y éticos, enseñándome más allá de ser un buen profesional, también un ciudadano integro y crítico.

“¡Santandereanos siempre adelante, Santandereanos ni un paso atrás!” – **Himno de Santander.**

USO AGRICOLA POTENCIAL ROCAS EVAPORITICAS

3

A Dios, por estar siempre a mi lado y a mi familia, especialmente a mi Padre, mi Madre, mi Hermana y mis Abuelos, por su ánimo y soporte constante e incondicional a lo largo de mi vida, permitiendo que este momento sea posible.

A los verdaderos amigos de la carrera, por todo su apoyo, enseñanzas y por los buenos momentos.

A todos los docentes del colegio que hicieron despertar en mí esta pasión por la ciencia.

“Veni, Vidi, Vici” - Caius Julius Caesar (47 a.c)

Agradecimientos

A Germán Camargo y Patricia Ponce de León de Camargo, directivos y fundadores de la Fundación Guaya canal, por su disposición, orientación y ayuda.

Al MSc. Camilo Hernández Niño por su ayuda y guía a lo largo de todo el proceso.

A la Docente MSc. PhD. Sandra Milena Pinto Bohórquez de la escuela de química, por su colaboración en la interpretación de los resultados.

Al Docente MSc. PhD. José Antonio Henao Martínez, a la MSc. Leidy Ximena Calderón Cascavita y al profesional Cristian Camilo Rojas Sepúlveda por su ayuda y gestión en la toma y adquisición de datos.

Al Docente MSc. PhD(c) Germán David Patarroyo Camargo, por su apoyo y disposición en los albores del presente trabajo.

A la Docente MSc. Luz Yolanda Varga Fiallo y al Laboratorio de análisis de suelos y consultas industriales, por la colaboración en la adquisición de datos.

A Ángel Yesid Badillo Niño por su disposición, tiempo y guía a través de los sitios de interés en la mesa de Los Santos.

A nuestro director, docente MSc. PhD, Carlos Alberto Ríos Reyes y a nuestro codirector, geólogo Carlos Alberto Villareal Jaimes por su ayuda incondicional y guía en todo el proceso.

Al Docente MSc. PhD, Nelson Facundo Rodríguez López, por su orientación en los albores del proyecto.

A los Ingenieros Milton Hernandez y Gabriel Carvajal por su disposición y orientación.

Tabla de Contenido

1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General:	17
1.2 Objetivos Específicos:	17
2. Antecedentes	18
2.1 Diseño experimental para aplicación de sales en suelos	18
2.2 Métodos de recolección de muestras de suelos y evaluar efectos de aplicaciones de sales minerales	19
2.3 Utilización de rocas como insumo agrícola. Contexto local	22
3. Metodología	24
3.1 Fase Análisis del Estado del Arte	24
3.2 Fase de Campo	24
3.3 Fase de análisis de laboratorio	26
3.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)	26
3.3.2 Espectroscopía del Infrarrojo (FTIR/ATR)	29
3.3.3 Difracción de rayos X (DRX) y Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)	28
3.4 Fase de análisis e interpretación de datos.....	30
4 Marco teórico	33
4.1 Conceptos básicos sobre los depósitos evaporíticos.....	33

USO AGRICOLA POTENCIAL ROCAS EVAPORITICAS

6

4.1.1 Generalidades	33
4.1.2 Génesis y ambientes de formación	35
4.2. Generalidades sobre los suelos y fertilización.....	44
4.2.1 Agrogeología, una alternativa para el agro	44
4.3 Fertilización de suelos, macro, micronutrientes y propiedades.	46
4.3.1. Nutrientes esenciales. Importancia para los suelos, cultivos y especies vegetales.....	53
4.3.2 Funciones y beneficios en las plantas	61
4.4 Yeso para mejorar las propiedades del suelo.....	64
4.4.1 Criterios prácticos. Aditivos para el suelo a base de rocas y minerales	72
5 Resultados	73
5.1 Marco geológico regional.....	73
5.2 Litoestratigrafía	75
5.3 Ocurrencia de campo de depósitos evaporíticos.....	77
5.3.1 Rasgos a escala macroscópica.....	84
5.4 Caracterización por SEM/EDS, DRX/XRF y FTIR/ATR.....	87
5.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDS)	87
5.5 Difracción de rayos X (DRX) y Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	103
5.4.3 Espectroscopía del Infrarrojo (FTIR/ATR).	108
6 Conclusiones.....	116

USO AGRICOLA POTENCIAL ROCAS EVAPORITICAS

7

7 Recomendaciones 117

Referencias 118

Lista de figuras.

Figura 1. Esquema metodológico.	32
Figura 2. Cuenca evaporítica modelo, con direcciones de flujo, aporte marino y secuencia de cristalización.	33
Figura 3. Evolución generalizada de cuencas evaporíticas.....	34
Figura 4. Ciclo generalizado de progradación evaporita en una cuenca.....	37
Figura 5. Esquema general de distribución de depósitos evaporíticos.	39
Figura 6. Ciclos hipotéticos desde el margen al centro del lago (a-c, respectivamente).	40
Figura 7. Esquema sobre las lagunas salinas cercanas a la línea de costa.	41
Figura 8. Esquema sobre el ambiente de Sabkha.....	42
Figura 9. Esquema de cuencas oceánicas aisladas y la evolución de las sales precipitadas.	43
Figura 10. Modelos evaporíticos según el ambiente de formación.....	44
Figura 11. Relación del pH con los macronutrientes y micronutrientes disponibles.....	50
Figura 12. Ciclo del potasio en suelos.	55
Figura 13. Contraste de floculación en suelos arcillosos.....	59
Figura 14. Remediación de acidez en el suelo al aplicar yeso.....	60
Figura 15. Suelo y conductividad de agua de irrigación (EC) y ratio de adsorción de Na.	66
Figura 16. Yeso como aditivo para mejorar la producción de alfalfa. Excelente fuente de calcio y azufre.....	70
Figura 17. Declinación total de sulfatos en Ohio de 1979-2008.....	71
Figura 18. Mapa geológico del área de estudio. Adaptado y modificado por los autores a partir de las planchas 120 -Bucaramanga y 135 – San Gil.....	74

Figura 19. Columna estratigráfica de la sección de la formación Paja aflorante en la mina “La Chivatera”	79
Figura 20. Vista general y frontal de la sección aflorante de la Formación Paja en la Mina La Chivatera.	80
Figura 21. Afloramiento en vista general y frontal en la mina La Vega.	81
Figura 22. Acercamiento a las capas de lodolita shale del afloramiento de la mina La Chivatera	83
Figura 23. Acercamiento del afloramiento de la mina La Vega	83
Figura 24. Muestras de roca más lentes evaporíticos de hasta 8 mm (A y B) y de la roca más laminillas evaporíticas de 1mm (C y D).	85
Figura 25. Acercamiento muestra 1 de lentes de yeso y lodolita shale, Mina La Chivatera.	89
Figura 26. Acercamiento muestra 2 lodolita shale más minerales carbonatados, Mina La Chivatera.	90
Figura 27. Espectro EDS de los lentes de yeso de la primera muestra (Chivatera).	91
Figura 28. Espectro EDS en roca lodolita shale primera muestra (Chivatera).	91
Figura 29. Espectro EDS de minerales carbonatados, de la segunda muestra (Chivatera).	92
Figura 30. Acercamiento primera muestra láminas de yeso más lodolita shale, óxidos de hierro y matriz de la roca, Mina La Vega.	95
Figura 31. Acercamiento segunda muestra ,láminas de yeso, matriz de roca y minerales del grupo de la arcilla, Mina La Vega.	96
Figura 32. Espectro EDS de lámina de yeso. primera muestra (La Vega)	97
Figura 33. Espectro EDS de un fragmento de roca compuesto de minerales del grupo de la arcilla, primera muestra (La Vega)	97
Figura 34. Espectro EDS de fragmento de roca, matriz, segunda muestra (La Vega).	98

Figura 35. Espectro EDS fragmento de matriz de roca más fragmentos de yeso, segunda muestra (La Vega)	99
Figura 36. Espectro EDS de un sulfato correspondiente a yeso, segunda muestra (La Vega) ..	100
Figura 37. Espectro EDS de un fragmento de sulfato mezclado con matriz de roca, segunda muestra (La Vega).	101
Figura 38. Difractograma obtenido por el análisis de DRX a la muestra de laminillas de yeso más matriz (Mina la Chivatera).	104
Figura 39. Diagrama dispersión elemental para la muestra de laminillas de yeso más matriz...	106
Figura 40. Representación gráfica de los análisis FTIR/ATR para la muestra de laminillas de yeso.	109
Figura 41 Esquema de evolución secuencial del ambiente de formación.	113
Figura 42. Diagrama de flujo, recomendaciones de uso de minerales como insumo agrícola. ..	115

Lista de Tablas.

Tabla 1. Minerales presentes en rocas evaporíticas.	36
Tabla 2. Rangos de pH en los tipos de suelos.	49
Tabla 3. Rangos esquemáticos de pH y su consecuencia.	51
Tabla 4. Relación de elementos y su movilidad.	52
Tabla 5. Estadísticas de producción y reservas estimadas de potasa (K ₂ O).	56
Tabla 6. Forma de absorción y expresión química de nutrientes en los fertilizantes	62
Tabla 7. Poder de floculación relativo de los principales cationes en suelos.	65
Tabla 8. Condiciones apropiadas para varios aditivos del suelo.	67
Tabla 9. Yeso requerido en toneladas por acre según la textura del suelo y Na intercambiable. .	69
Tabla 10. Composición molecular Wt% de fases minerales de las muestras de la Mina la Chivatera y Mina la Vega.	102
Tabla 11. Representa las fases cristalinas identificadas en base al difractograma, que conforman la muestra de laminillas de yeso más matriz de 1 mm.	105
Tabla 12. Grupos funcionales identificados en el diagrama de dispersión elemental	107

Resumen

Título: Evaluación de potencial de uso agrícola de las rocas evaporitas originarias de Los Santos, Santander. *

Autor: Aldo Julián Molano Sierra y César Arturo Vera Flórez**

Palabras Clave: Los Santos, Depósitos Evaporíticos, Uso agrícola, Yeso, Fertilización, Nutriente Mineral, Agrokeología.

Descripción:

El presente trabajo trata sobre la evaluación y caracterización de las rocas evaporíticas de Cretácico Inferior aflorantes en el municipio de Los Santos (Santander, Colombia). Se partirá del levantamiento de datos de campo como columna estratigráfica, caracterizaciones macroscópicas, toma de datos estructurales, adquisición y rotulado de muestras de dos frentes de explotación artesanales haciendo énfasis en los niveles de interés, teniendo en cuenta las relaciones de campo, la fábrica y la disposición de laminillas evaporíticas, así como su determinación composicional a detalle e identificación de especies minerales mediante el uso de las técnicas de análisis como son microscopia electrónica de barrido (SEM/EDS), espectroscopía de Infrarrojo (FTIR/ATR), difracción de rayos X (DRX) y espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), con el fin de tener certeza para dar una explicación desde el punto de vista geológico al origen y ambiente de formación de dichas láminas evaporíticas. A su vez se buscará realizar, teniendo en cuenta los análisis mineralógicos, microscópicos y químicos en conjunto con ejemplos generales y experiencias de la industria local de fertilizantes (las cuales han utilizado estos tipos de roca como parte de sus productos), una posible prognosis sobre el potencial uso que tienen estas rocas como insumo agrícola.

*Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes, PhD).

Abstract

Title: Evaluation of potential for agricultural use of evaporite rocks originating from Los Santos, Santander. *

Author: Aldo Julián Molano Sierra and César Arturo Vera Flórez **

Key Words: Los Santos, Evaporite Deposits, Agricultural Use, Gypsum, Fertilization, Mineral Nutrient, Agrogeology.

Description:

The aim of this work is the evaluation and characterization of the Lower Cretaceous evaporitic rocks outcropping in the town of Los Santos (Santander, Colombia). It will start from the gathering of field data such as stratigraphic column, macroscopic characterizations, structural data, acquisition and labeling of samples from two artisanal exploitation fronts, emphasizing the levels of interest, taking into account the field relationships, the factory and the arrangement of evaporitic lamellae, as well as their compositional determination in detail and identification of mineral species through the use of analysis techniques such as scanning electron microscopy (SEM / EDS), Infrared spectroscopy (FTIR / ATR), ray diffraction X (XRD) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF), in order to give an explanation from the geological scope of the origin and environment of formation of this evaporitic sheets. At the same time, it will seek to carry out, taking into account the mineralogical, microscopic and chemical analyzes in conjunction with general examples and experiences of the local fertilizer industry (which have used these types of rock as part of their products), a possible prognosis about the potential use of these rocks as agricultural input.

**Bachelor Degree.*

** *Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes, PhD).*

Introducción

La agricultura ha sido un hito importante de la humanidad puesto es la fuente tradicional de su alimentación (Universidad Autónoma de Centro América, 2009), las rocas que hacen parte del sustrato donde se realizan estas actividades repercuten de manera directa en las mismas y en los cultivos, puesto cada roca según su composición química tendrá disponible elementos claves para el desarrollo de las especies. Además, en las últimas décadas, la población mundial presenta un crecimiento acelerado (Manning, 2018) con lo cual la demanda de recursos se incrementará hacia 2050, mientras que las hectáreas cultivables y la productividad agrícola disminuirán. A modo de contexto (Sumpsi Viñas, 2012) destaca que según la FAO la perspectiva agrícola proyecta un incremento en la producción en un 90% por causa del aumento del rendimiento de los cultivos y solo en un 10% por aumento del área cultivable (países en vía de desarrollo). Lo cual deja en evidencia la brecha que hay entre los países desarrollados y aquellos en vía de desarrollo en base a la producción y acceso a fertilizantes y aditivos para el suelo. Así, la utilización de los recursos y áreas de forma óptima será crucial en el desarrollo humano a futuro, como lo sustentan (e.g., Van Straaten., 2006; Kemp et al., 2016) proponiendo la identificación y uso efectivo de fuentes alternativas a los fertilizantes convencionales, enfatizando específicamente en las rocas como insumo primordial y principal para los cultivos, siendo una solución potencial a esta problemática.

Asimismo, Van Straaten (2006) ahonda más en esta problemática y menciona el caso reciente de la denominada “revolución verde” en Asia, donde se le da protagonismo a la agricultura intensiva y se implementan una variedad de técnicas basadas en fertilizantes químicos, pesticidas y plantas modificadas genéticamente buscando mejorar la capacidad y fertilidad del suelo; llegando a contrastarlo con alternativas con una elevada concentración de mineralógica y mucho

más asequibles para las comunidades como lo son las rocas. Por un lado, las técnicas banderas de dicha “revolución verde”, son métodos nocivos para el medio principalmente por las emisiones de combustibles fósiles durante el transporte de los agroquímicos necesarios y la eutrofización y contaminación asociada a los fertilizantes químicos tradicionales (FAO, s.f), llegando incluso a ser nocivos para la salud humana. En contraste, como menciona dicho autor, las rocas tiene gran potencial de ser aditivos alternativos a los existentes en el mercado, de fácil acceso a las comunidades locales y que pueden llegar a beneficiar tanto al ambiente como a la población vulnerable de países en vía de desarrollo, llegando a desarrollar productos derivados de las mismas, los cuales serían naturalmente ricos en minerales y elementos de interés.

Por su parte, siendo tan amplio el espectro de rocas existentes y el potencial que tiene cada una de ellas como materia prima y fuente rica en minerales, para este proyecto se tendrá como eje central las rocas evaporíticas; las cuales son formadas en ambientes de alta evaporación, propiciando la formación de depósitos enriquecidos en sales con elementos primordiales para el desarrollo agrícola.

Con lo cual, se llevará a cabo un procedimiento de análisis científico experimental en el cual se reconocerán las condiciones *in-situ* de las rocas, se determinarán sus propiedades macroscópicas, así como su composición química principal y mineralógica, mediante SEM/EDS, DRX/XRF y FTIR/ATR, una prognosis para un potencial uso agrícola basados en los datos químicos, mineralógicos e industriales que tenga el tipo de roca caracterizada.

Descripción del problema

Debido al inminente aumento de la población global y la necesidad de encontrar fuentes alternas a los fertilizantes convencionales en el mercado, ha existido desde hace varios años la necesidad de satisfacer las crecientes demandas de alimentos, según lo expuesto en los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas. La presente iniciativa surge como una respuesta desde el punto de vista geológico para brindar soluciones con relación al suministro de nuevos insumos para la actividad agrícola que sustenta el desarrollo de las comunidades locales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General:

Caracterizar las rocas del período Cretácico inferior de la Formación Paja y evaluación de su potencial de uso agrícola como alternativa de fertilizantes inorgánicos.

1.2 Objetivos Específicos:

Realizar un levantamiento estratigráfico de la Formación Paja, haciendo énfasis en los niveles de interés.

Desarrollar la caracterización petrográfica a escala macro e identificar las relaciones de campo de las rocas de interés.

Determinar la composición mineralógica y química de las rocas de interés por difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de infrarrojo.

Plantear una prognosis de uso potencial de las rocas de interés como insumo agrícola a partir de la caracterización química, mineralógica de la roca y antecedentes locales de su uso.

2. Antecedentes

En la Mesa de Los Santos (Santander) aflora la secuencia sedimentaria del Cretácico inferior, dentro de la cual hace parte la Formación Paja (datada para entre el Barremiano inferior al Aptiano inferior) según Royero y Clavijo (2001). En Gonzalez y Espinosa, (2012) reportan, hacia la base de estos niveles de rocas evaporíticas, un enriquecimiento en potasio (K). Estas rocas se extraen artesanalmente, utilizadas a nivel local como insumo agrícola (denominándolo localmente como polihalita). Además González y Espinosa., (2012) indican la presencia de sales de potasio de la variedad Singenita ($K_2Ca[SO_4]_2 \cdot H_2O$), asociándose con minerales como carbonatos y yeso, las cuales se encuentran dispuestas en forma de red de laminillas paralela o subparalela a la estratificación, estos resultados llevan a los autores a concluir el hallazgo de una mineralización de potasio bastante extensa dentro de los shales de la Formación Paja, lo cual representa un valioso georecurso como expone el estado colombiano mediante documento CONPES 3577 de 2009 el cual plantea la necesidad de buscar fuentes de potasio (K), dada la escasez mundial y su potencial uso para la agricultura mediante el desarrollo de fertilizantes y para la industria química.

2.1. Diseño experimental para aplicación de sales en suelos

En cuanto a otros estudios sobre la aplicación de mineralizaciones y/o sales de potasio en suelos y en plantas como un aditivo para mejorar sus características y así mejorar la productividad y rentabilidad, se han propuesto una serie de diseños experimentales y metodologías de aplicación al suelo publicadas en artículos utilizando varios elementos importantes en los procesos de fertilización, destacándose las siguientes:

En Da Costa Mello et al (2018) plantean el diseño factorial 4x4 o 4x3, con una estructura de tratamiento individual organizada en un diseño de bloques aleatorios. Para este caso en particular, se evaluó muriato de potasio (MOP), sulfato de potasio (SOP), sulfato magnésico de potasio (SOPM), y polihalita (PH) como fuentes directas de K y en 4 diferentes tasas de K_2O . Posteriormente, se definieron las tasas de K_2O en kg/ha y al momento del sembrado 35% del total de K_2O de cada tratamiento fue aplicado junto con 100% de P_2O_5 y 20% del N total. El resto del N y del K_2O fueron agregados en 8 dosis divididas como agregado lateral en un intervalo de 15 días luego del trasplante.

Por su parte, el diseño del experimento propuesto por Rakkar et al., (2015) también fue un bloques aleatorios (“*randomized complete block desing*”) con un tratamiento de seis fertilizantes de potasio y cuatro repeticiones, experimentando con plantas de maíz; Del total de sitios nueve de ellos fueron aplicados con cloruro de potasio (KCl) a unas tasas de 0, 33.6, 67.2, 100.9, 168.1 kg de K_2O ha⁻¹, mientras que en el último sitio fue aplicado con K a unas tasas de 0, 67.2, 134.5, 201.7, 269.0, 336.2 kg de K_2O ha⁻¹. Las dimensiones de los sitios seleccionados para dichos experimentos fueron 9.14 m de largo x 3.05 m de ancho, con 1.52 m de espacio entre cada aplicación, posteriormente, las hileras de maíz, usadas en este experimento, fueron cortadas cuando la planta tenía de 8 a 12 hojas.

2.2. Métodos de recolección de muestras de suelos y evaluación de efectos de aplicaciones de sales minerales

Los métodos para recolectar y analizar muestras de suelos antes y luego de la aplicación de dichas mineralizaciones y/o sales de potasio, para así entender mejor el efecto de estas se describen a continuación:

El método de Peng et al, (2018), define un suelo tipo (“*background soil*”), el cual se caracteriza por haberse recolectado en un sitio con parámetros químicos y composicionales conocidos y posteriormente adecuado para poder cumplir con los requisitos básicos para hacer los distintos experimentos. Para este caso en particular, cuyo objetivo no era aplicar sales sino llegar a un mínimo de metales pesados para el suelo tipo, se aplicaron técnicas tales como aireado natural y remoción de gravas y grandes restos orgánicos. Posteriormente fue tamizado mediante una malla de nylon de 0.83 mm y para el diseño de la fase experimental, se prepararon distintos suelos (tomando como referencia el suelo tipo descrito anteriormente) con diferentes grados de contaminación. Así pues, cada muestra tipo de suelo de 1,5 kg fue dividida y almacenada en un vaso de precipitado de 2.0 L, en los cuales diferentes cantidades de los compuestos con metales pesados fueron añadiéndose para simular diferentes niveles de contaminación en suelos. Finalmente, resultaron un total de ocho grupos de prueba, los cuales fueron denominados desde S1 (sin metales pesados añadidos, suelo tipo) hasta S2, S3, S4, S5, S6, S7 y S8 cuyo contenido de metales pesados aumentaba progresivamente (Peng et al., 2018). Los vasos de precipitado fueron sellados y cubiertos con un papel conservante, revueltas 1 vez al día e incubadas a temperatura ambiente por 20 días, para llegar al equilibrio de adsorción. Si bien esta metodología no está directamente relacionada con las sales, indica un método válido y completo para analizar muestras de suelo con la adición de cierta cantidad de algún compuesto.

Por otro lado, el método propuesto por Da Costa Mello et al., (2018) se desarrolla en suelos limosos – margosos y margosos – arenosos, el primero en una localidad denominada Monte Mor y el segundo en la localidad de Cerquillo (Cerca de Sao Paulo, Brasil), teniendo un previo conocimiento de las condiciones ambientales y meteorológicas de cada región. La metodología se basó en la toma de 15 muestras de suelo de 0 a 20 cm de profundidad, buscando conseguir un

muestreo de suelo compuesto de cada sitio antes de poder llegar a la experimentación con las plantas. Se realizaron los siguientes análisis en los suelos, para pH (CaCl_2 0.01 mol^{-1}), P, K, Ca y Mg (extracción de resina de intercambio catiónico) y S-SO_4 ($\text{Ca} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0.01 mol L^{-1}) y conductividad eléctrica (EC) en un extracto 1:2 suelo – agua. Una vez catalogados, analizados y caracterizados los suelos, se definieron estándares de K, S, Ca, Mg para los suelos de cada localidad objeto de estudio (Da Costa Mello et al., 2018).

Finalmente, la metodología propuesta por Rakkar et al., (2015) se basa en una recolección de muestras de suelo de 0 - 15 cm de profundidad, para su posterior análisis en busca de nutrientes disponibles y evaluar otras propiedades básicas del suelo. Asimismo, durante las fases de crecimiento, se recolectaron muestras de los sitios de control (aquellos donde no se aplicaron fertilizantes de K) con una frecuencia de dos veces al mes en un intervalo de 15 días. Un “tubo de suelo Hofer” de 2,5 cm de diámetro fue usado para la toma de muestras de 0 – 15 cm y 15 – 30 cm de profundidad durante la fase de crecimiento; las muestras de suelo fueron colectadas tomando 4 a 5 muestras de núcleo por cada profundidad en cada sitio, para ser posteriormente almacenadas en bolsas “ziplock”, transportadas y almacenadas en refrigerador a 7°C por una a tres semanas (Rakkar et al., 2015). En cuanto a los análisis de laboratorio, destacan que estos se llevaron a cabo en las muestras iniciales de suelos, analizando pH, N, P, K, EC y materia orgánica por parte del laboratorio de testeo de suelos y agua NDSU. La textura del suelo fue hallada por un método hidrométrico, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue determinada por saturación del suelo con una solución 1 M de acetato de sodio y luego lavado con 90% de solución de etanol y reemplazando los iones de sodio usando acetato de amonio 1 M (Rakkar et al., 2015).

2.3 Utilización de rocas como insumo agrícola. Contexto local

Durante las últimas décadas en el área metropolitana de Bucaramanga y sus sectores aledaños se ha venido desarrollando investigaciones y aplicabilidades de rocas como fuente de nutrientes e insumos agrícolas directos, como lo es el caso de las rocas evaporíticas de la mesa de Los Santos, destacándose reportes como los de Royero y Clavijo, (2001) reportando “depósitos evaporíticos como yeso y polihalita” (P. 30) o Gonzalez y Espinosa, (2012) reportando los depósitos de yeso y también “venillas de sales de potasio concordantes a la estratificación” (P. 62), partiendo de estas referencias así como testimonios de gente de la zona rural del municipio de Los Santos, los cuales extraen estas rocas mediante prácticas de minería artesanal denominando a estas laminillas y mineralización de forma coloquial como “polihalita”; cerca a los límites del altiplano de Los Santos con el Rio Sogamoso y el Rio Chicamocha se encuentran varios frentes de explotación (mediante técnicas artesanales) ubicándose en las Veredas La Loma y Regaderos, siendo esto posible debido a la configuración geológica, estratos casi horizontales, poco deformados, haciendo posible su extracción y utilidad.

Derivado del uso de estas rocas pertenecientes a la secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior que aflora en Los Santos, compañías locales insignias, especializadas en desarrollo de abonos y fertilizantes como lo son Abimgra y Fertisol, llevando más de una década de experiencia, las cuales han usado propiamente las rocas denominadas habitualmente como “polihalita” como fracción de sus insumos agrícolas.

Según Abimgra (2017) expresan que “Se elaboro un abono a partir de gallinaza y minerales derivados de rocas aportando fosforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, con lo cual restituyera

los elementos perdidos de la fertilidad natural del suelo”. En Abimgra (s.f) reporta el uso en su producto (“potasio”) de materias primas en proporcionales iguales de gallinaza compostada y “polihalita”, así como roca fosfórica y sulfato de potasio, describiendo un aumento de los coloides del suelo debido a la polihalita (lo que incrementan la capacidad de intercambio catiónico), suministro de potasio (K) e incentiva la “economía del agua” en la planta.

Según (Hernandez, 2021) expone diversos factores a tomar en cuenta para realizar prácticas y análisis utilizando estas rocas provenientes de la secuencia sedimentaria del Cretácico en Los Santos como el pH del suelo, las concentraciones en ppm o el % Wt, la respuesta experimental de la especie vegetal, las relaciones de dosis con el área de aplicación, los nutrientes principales aportados por el material mineral en cuestión; también se comentó que es importante tener como un referente a la industria y sus porcentajes de concentración, haciendo la claridad que a medida que avanza el frente de explotación en la mina, el material variara muy poco en la composición con lo cual estas relaciones de dosis y concentraciones en el producto pueden llegar a variar mínimamente.

Desde su perspectiva (Carvajal, 2021), comparte su experiencia, los productos de su compañía Fertisol S.A.S. son orgánico-mineral, siendo la fracción mineral roca fosfórica y la roca denominada “polihalita” (la cual es el centro de este estudio), el manejo de este compuesto ha sido un éxito y mediante estas materias primas se ha logrado acondicionar los suelos de Santander; a su vez recomienda su dosificación sea tanto el compuesto como la roca, según el método de aplicación, siendo al “boleo” aproximadamente uno 300 a 500 gramos, según el tipo de suelo, aplicándose mayores cantidades a suelos arenosos, agregando para iniciar una experiencia tener

caracterizado el lugar de realizarla, puesto cada factor y decisión significa tanto tiempo como dinero a la hora de realizar prácticas agrícolas, teniendo en cuenta la modalidad de cultivo que se vaya a desarrollar (por temporada o intensivo), requerimientos del suelo y tipo de especies vegetales a cultivar, trazando un plan de fertilización a mediano y largo plazo que supla las necesidades específicas del ejercicio.

3. Metodología

3.1. Fase Análisis del Estado del Arte

Consistió en la recopilación de información bibliográfica del área de estudio a modo de antecedentes y reconocimiento geológico local. Posteriormente, se identificaron los niveles evaporíticos de interés y la formación geológica donde se han reportado. Además, se consultó y corroboró con locales los datos acerca del sitio de interés. Posteriormente se definió fecha para realizar las actividades de campo teniendo los implementos como brújula, bastón de Jacob, libreta, mapa geológico de la zona, martillo geológico, bolsas para muestras, entre otros, para poder realizar el levantamiento y adquisición de los datos.

3.2. Fase de Campo

La fase de campo consistió en dos jornadas, en la primera se llegó al área de interés por la vía que conduce del casco urbano de Los Santos a la mina “El Carrancho”, la cual es un carretable que baja hasta el río Sogamoso y llega hasta Zapatoca; mientras que en la segunda se tomó la vía

de Los Santos a la mina El Toro, en inmediaciones de la vereda La Loma. Para el presente trabajo se visitaron dos sitios con buena exposición de la Formación Paja en la zona (ver figura 20 y 21), los cuales corresponden a la mina “La Chivatera” y “La Vega”, la primera situada en las coordenadas: $06^{\circ} 47' 52''$ N y $073^{\circ} 10' 35''$ W; a la que se accede por la vía de Los Santos a la mina El Carrancho, donde antes de llegar a dicha mina se desvía a la izquierda unos 500 m, situándose en la vereda Regaderos. Por otro lado, la segunda se localiza en las coordenadas: $06^{\circ} 45' 50''$ N y $073^{\circ} 08' 41''$ W; accediendo por la vía de Los Santos a la mina El Toro, situada a unos 300 m de una planta procesadora de yeso y de la mina de “Abimgra”, a la que no se pudo acceder ya que es una explotación privada de la misma roca en la Formación Paja. Al llegar a dichas minas, se realizaron todos los procedimientos de campo según los protocolos y metodologías adquiridos en experiencias anteriores, como tomar datos de coordenadas GPS, ubicación del punto de interés en el mapa geológico, reconocimiento y posterior descripción general del afloramiento. Posteriormente se seleccionó un sitio con buena exposición de los estratos y se procedió a tomar los datos de rumbo y buzamiento de estos y a describir las secciones expuestas. Para el caso de la mina La Chivatera, al contar con una mejor exposición del afloramiento, se procedió a levantar de forma detallada una columna estratigráfica de una sección aproximadamente de 10 m de base a tope, siguiendo la metodología expuesta en (Cruz, Mier, y Uribe, 2012) con el apoyo del bastón de Jacob para medir los espesores y luego tomando las muestras representativas para su descripción y clasificación según (FOLK, 1974). Es importante aclarar que se seleccionaron muestras donde estuvieran bien expuestas esas laminas y lentes evaporíticos los cuales son el interés de este trabajo. Finalmente se terminó la descripción del afloramiento en campo, el dibujo esquemático, la elaboración de la columna y la toma de apuntes en la libreta, con lo que se procedió a la rotulación y almacenamiento de las muestras. En la jornada siguiente, se llegó a otro sitio de

interés ubicado por la vía de Los Santos a la vereda La Loma, llegando al afloramiento y frente de explotación artesanal, denominado en este trabajo mina La Vega (debido a que se encuentra en un predio homónimo), donde también se explota de forma artesanal las rocas de interés y donde se realizó la misma metodología anteriormente descrita (exceptuando el levantamiento de la columna estratigráfica), para documentar y describir la sección expuesta, así como la toma de muestras para verificar que en efecto era la misma litología.

3.3. Fase de análisis de laboratorio

Las muestras de mano se seleccionaron y se separaron cuidadosamente los lentes más gruesos (de 1 a 8 mm), las laminillas más pequeñas (de 1 mm) y la roca con algunas laminillas. Para este trabajo se apartaron fragmentos de los lentes y de la roca de unos 5 cm para SEM-EDS y se pulverizaron los fragmentos restantes para difracción de rayos x (DRX/XRF) y para infrarrojo (FTIR/ATR), siguiendo la siguiente metodología.

3.3.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)

Se realizó este análisis para caracterizar el mineral por su aspecto textural y conocer la composición química principal. El procedimiento consistió en colocar las muestras sobre “stubs metálicos” con cinta adhesiva de carbón y recubrirlas con carbono, para la posterior toma de imágenes y análisis químico usando un microscopio electrónico de Barrido FEG (Fiel Emission Gun) Quanta Feg 650 (análisis llevados a cabo en el parque tecnológico UIS – Guatiguará, laboratorio de SEM). La toma de imágenes se realizó en alto vacío, con un voltaje de aceleración de 15kV, como detectores de imágenes se usaron un Everhart Tornley detector EDT para

electrones secundarios (SE) y así observar la morfología. También se usó un Back scattered electron detector (BSED) de tipo SSD para detectar los electrones retrodispersados (BSE) y así observar variaciones en la composición. En cuanto al análisis químico, se realizó también con un voltaje de aceleración de 15kV, usando un detector EDAX APOLO X con una resolución de 126.1 eV (en. Mn Ka) para realizar análisis del tipo EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) y usando el software EDX Genesis para obtener información semicuantitativa de los elementos químicos.

Interpretación de resultados.

En particular para el SEM, se realizaron análisis puntuales y en área en zonas de la muestra con alto contraste de escalas de grises y formas, para así identificar las especies minerales más representativas y teniendo también como guía la composición química elemental. Como medida estándar, los datos se recalcularon en porcentaje de peso molecular (Wt%) excluyendo al carbono, debido al recubrimiento de dicho mineral de la sección delgada. Finalmente, los Wt% indicados por los análisis puntuales y en área del SEM se compararon con los Wt% de los principales constituyentes estequiométricos teóricos, los cuales se basan en las fórmulas químicas de las principales fases minerales, como se indica en (Barthelmy, 2014) logrando caracterizar cada fase mineral.

Corrección ZAF. La corrección ZAF se aplica a las mediciones EDX en el método SEM para convertir concentraciones aparentes en concentraciones semicuantitativas corregidas para efectos de matrices entre elementos. La rutina ZAF se realiza automáticamente y necesita básicamente información de las concentraciones para realizarse, valores que se obtienen luego de

la primera iteración y así sucesivamente hasta que se alcanza un límite estadísticamente satisfactorio (Slipper, 2014).

3.3.2. Difracción de rayos X (DRX) y Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)

Para este análisis se seleccionó una muestra de laminillas evaporíticas de yeso más matriz de roca (de la mina La Chivatera), la cual se pulverizó y tamizó antes de ser enviada al laboratorio, donde inicialmente fue molturada y homogenizada en un mortero de ágata. Posteriormente, fue montada en un porta muestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. El análisis se realizó en un difractómetro de polvo marca “BRUKER” modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci (análisis llevados a cabo en el parque tecnológico UIS – Guatiguará, laboratorio de Rayos-X) bajo las siguientes condiciones: voltaje (kV) 40, corriente (mA) 40, rendija de divergencia (mm) 0.6, rendijas soller primario ($^{\circ}$) 2.5, tamaño de paso ($^{\circ}2\theta$) 0.02035, tiempo por paso (s) 0.4, rango de registro ($^{\circ}2\theta$) 1 a 15, radiación $\text{CuK}\alpha_1$, filtro de Níquel, uso de anti-dispersor de aire, detector Lineal LynxEye, tipo de barrido a pasos y DRX-06 (registro de datos en el rango de $2^{\circ}(2\theta)$, tiempo por paso 0.6 s, paso: $0.02035^{\circ}(2\theta)$, tiempo de duración medida de 30 minutos por difracción de rayos X). Esta técnica permite analizar tanto cuantitativa como cualitativamente las fases cristalinas de la muestra, analizando su mineralogía total (CAI, 2021).

Interpretación de resultados.

Los resultados fueron arrojados en un difractograma en términos de intensidad vs 2θ (ver figura 38) donde se disponen diversos picos de acuerdo con el contenido mineralógico de la muestra, los cuales deben ser interpretados y comparados con bases de datos para asignarles una fase mineral. Sin embargo, a priori no fue posible asignarles una fase a ciertos picos. Como

solución, se planteó realizar un análisis adicional a la misma muestra, particularmente un **Análisis Elemental de Fluorescencia (XRF)**.

Dicho análisis fue realizado en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X de Longitud de Onda Dispersiva de 4KW marca “BRUKER” modelo S8 TIGER (análisis llevados a cabo en el parque tecnológico UIS – Guatiguará, laboratorio de rayos X), usando un detector de Centelleo (elementos pesados) y de Flujo (elementos livianos), con un Tubo de Rodio (Rh) como fuente de rayos-X y un goniómetro de alta precisión para ángulos theta y 2 theta. Esta técnica se caracteriza por ser rápida y precisa para identificar la composición de un material, siendo compatible con muestras sólidas, líquidas y pulverizadas (Ardebili & Pecht, 2009). Asimismo, el modo de análisis material del espectrómetro XRF se caracteriza por su carácter cualitativo y micro-analítico (Ramón, 2010), pues el rango cuantificable de las concentraciones está comprendido entre las ppb y las ppm (Ramón, 2010), siendo posible abarcar un amplio rango de análisis, desde el sodio ($Z = 11$) hasta el uranio ($Z = 92$) (Ramón, 2010) y (Ardebili & Pecht, 2009).

Interpretación de resultados.

Los resultados se muestran en forma gráfica en un diagrama elemental (ver figura 39), donde se observan los espectros cualitativos de los elementos emisores de la muestra en cuestión, los cuales son presentados en términos de Intensidad (Kcps) vs energía (KeV) (Ramón, 2010).

3.3.3. Espectroscopía del Infrarrojo (FTIR/ATR)

De la muestra correspondiente a las laminillas de yeso más matriz de roca (provenientes de la mina La Chivatera), una vez tamizada y empacada, fue enviada al laboratorio. El análisis se

realizó en un equipo is50 FT-IR Nicolet. Thermo Scientific (análisis llevados a cabo en el parque tecnológico UIS – Guatiguará, laboratorio de Espectroscopía), con un rango de adquisición de $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$, realizando 32 scans con una resolución de 4. La velocidad óptica fue de 0.4747 cm/s y el modo de toma de datos fue Reflectancia Total Atenuada (ATR).

Interpretación de resultados.

Los resultados se analizaron directamente desde las tablas de datos recibidas, los cuales están en Transmitancia (%) vs. Frecuencia en unidades de número de onda (cm^{-1}). En vista que no se cuenta con los espectros de absorbancia, los datos se graficaron en Excel (ver figura 40) para poder analizarlos más fácilmente e identificar los intervalos de frecuencia donde hay picos para correlacionarlos con las bandas de absorción de los principales grupos funcionales inorgánicos (Rubinson & Rubinson, 2000) y (Nakamoto, 2006).

3.4. Fase de análisis e interpretación de datos

La fase de oficina consistió en una síntesis de la bibliografía disponible acerca del origen, distribución, explotación e importancia de los yacimientos evaporíticos, así como la importancia y aprovechamiento de las rocas y su contenido mineral para el mejoramiento de la fertilidad de los suelos, enfatizando en el caso de los macronutrientes aprovechados por las especies vegetales, como el potasio (K) y otros nutrientes esenciales como el calcio (Ca). Posteriormente se analizó y sintetizó la bibliografía relacionada con dichos elementos, así como su importancia a nivel global. Por su parte, todos los datos recopilados en campo se digitalizaron usando programas como Sedlog 3.1, GlobalMapper, Qgis v2.18, Google Earth, CorelDraw 2020 y las herramientas ofimáticas de Office 365 para poder sintetizar y documentar los aspectos llamativos e importantes vistos en

campo a modo de resultados y que representan aspectos importantes de la geología del área de estudio; destacándose como innovaciones un mapa geológico a escala 1:40000 y una columna estratigráfica del miembro inferior de la Formación Paja que aflora en ese sector.

Figura 1.

Esquema metodológico.



4. Marco teórico

4.1 Conceptos básicos sobre los depósitos evaporíticos

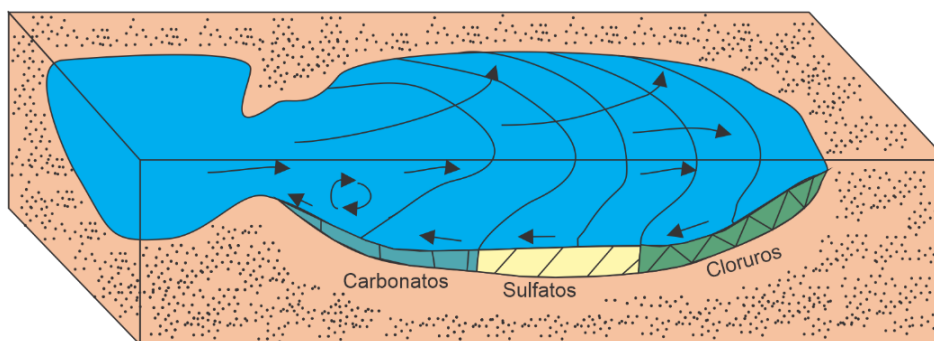
4.1.1 Generalidades

Acerca de los depósitos evaporíticos tienen ciertas características individuales propias según cada caso, no obstante, guardan cierta relación en que su formación se debe a evaporación de aguas salinas en diferentes ambientes como pueden ser lagos, mares someros entre otros, asociados a condiciones de aridez altas, con poca tasa de precipitación pluvial (Jiménez y Rodríguez, 2012); con lo cual las condiciones como clima árido, una alta tasa de evaporación, falta de aportes clásticos y de aguas dulces, así como aislamientos parciales de la cuenca son factores propicios para su formación.

Se denota que en cuencas evaporíticas se tiende a la cristalización de las sales según su concentración, química general y su producto de solubilidad, con lo cual según sean las condiciones puntuales de cada caso se propiciara la formación de ciertas especies minerales.

Figura 2.

Cuenca evaporítica modelo, con direcciones de flujo, aporte marino y secuencia de cristalización.



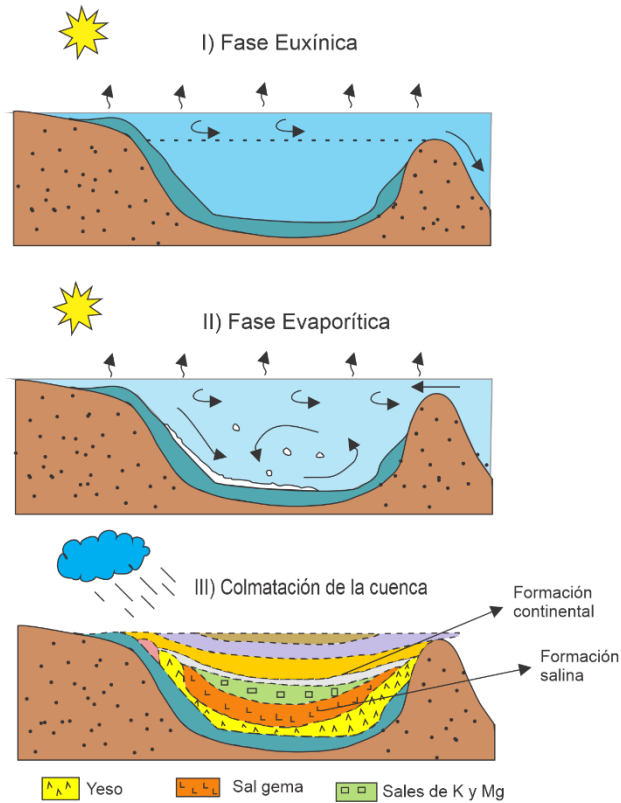
Nota: Tomado de Gamboa, A., & Gonzalez de Juana, C. (2014). DEPOSITOS DE YESO EN LA PENINSULA DE PARIA ESTADO SUCRE, VENEZUELA. *Asociacion Venezolana de Geologia, Minería y Petróleo (AVGMP) and Datapages, Inc.*, 125-132.

Las determinaciones genéticas de los depósitos evaporíticos y su clasificación se fundamenta principalmente en características propias del yacimiento como las variedades de formas (cristales individuales y agregados de cristales), tipos de cristales (simples, maclados, con crecimiento sintaxial), hábitos (hemipiramidal, prismático o clástico), fábricas (incorporativa, poiquilítica o displaciva) y de estructuras (maciza, grumosa y de intercrecimiento) (Arakel, 1980).

Según Dangavs & Blasi (2002) la existencia de más de un proceso de formación de las evaporitas, con fenómenos alternantes de precipitación primaria, disolución-precipitación y diagénesis posterior, es sumamente frecuente en los depósitos evaporíticos continentales.

Figura 3.

Evolución generalizada de cuencas evaporíticas.



Nota: Modificado y adaptado de uclm.es. (s.f.). 8.- Rocas y yacimientos de precipitación química.

Obtenido de: https://previa.uclm.es/_users/higuera/yymm/YM8.html

4.1.2 Génesis y ambientes de formación

La precipitación de sales en una solución requiere superar su punto de saturación (entrando en un estado de sobresaturación), para lo cual se necesitan condiciones propicias como las que se muestran por ejemplo tanto en las cuencas aisladas como en las cuencas con circulación restringida, donde la tasa evaporación sobrepasa la tasa de precipitación y escorrentía juntas, con lo cual se mantiene el medio a solución en estado sobresaturado (Gamboa y Gonzalez de Juana, 2014).

Tabla 1.

Minerales presentes en rocas evaporíticas.

Tipo de compuesto salino	Mineral Evaporítico	Formula química
Cloruro	Halita	NaCl
Cloruro	Silvita	KCl
Sulfato	Anhidrita	CaSO ₄
Sulfato	Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O
Sulfato	Polihalita	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ .2H ₂ O
Carbonatos	Trona	Na ₃ (CO ₃)(HCO ₃).2H ₂ O
Carbonatos	Natrón	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O

Nota: Adaptado de EcuRed. (2011). *EcuRed*. Obtenido de Evaporita: <https://www.ecured.cu/Evaporita> Edwards, M., Smith, G., Bowling, D. (1988). Guard cells extrude protons prior to stomatal opening

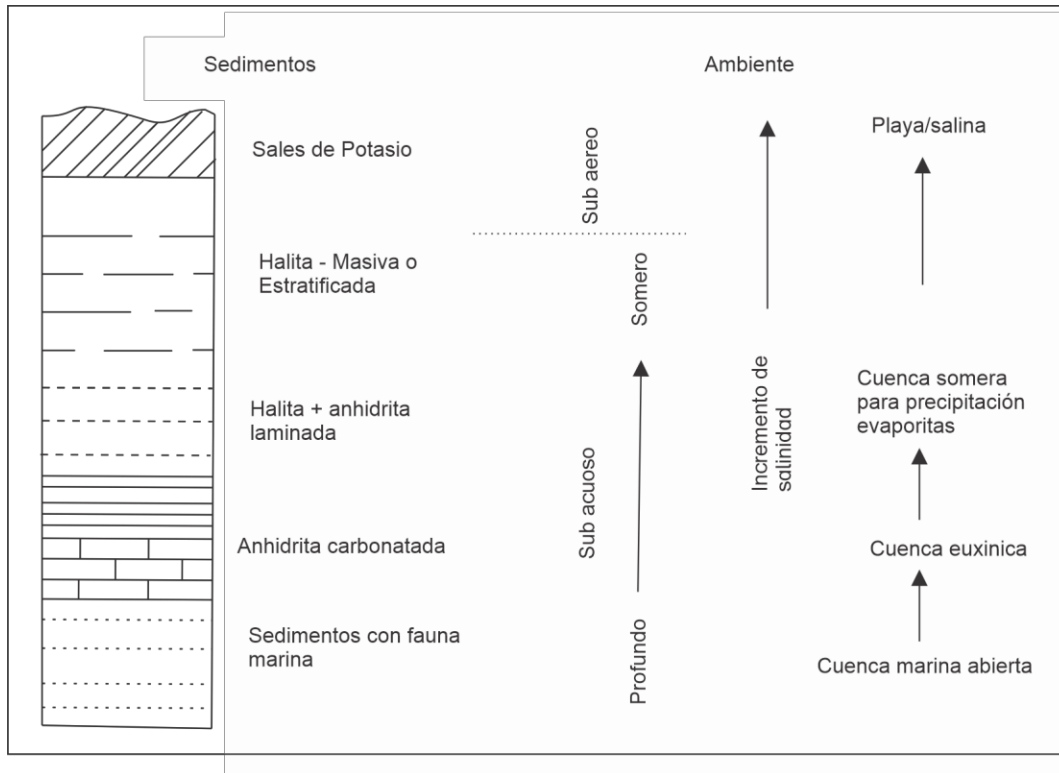
En la solución salina común se da la deposición de cristales en función inversa a sus solubilidades dando lugar a una evolución en la precipitación química, esquema propuesto por Jiménez y Rodríguez (2012) para las especies minerales más comunes en una cuenca evaporíticas, dando normalmente precipitaciones sucesivas:

- Carbonatos (calcita y dolomita) se precipitan cuando la solución reduce su volumen a la mitad.
- Sulfatos (Yeso y Anhidrita) se precipita cuando el volumen de agua es la quinta parte.

- Cloruros (halita) se precipita cuando el volumen es la décima parte de la inicial.

Figura 4.

Ciclo generalizado de progradación evaporita en una cuenca.



Nota: Adaptado y modificado de Tucker, M.E., Wright, V.P., y Dickson, J.A., 2003, Carbonate Sedimentology, Blackwell Publishing Company, UK, 214-216 pp.

Así mismo estos pueden ser el producto de la interacción de las aguas superficiales y subterráneas, que reflejan en sus facies clásticas y evaporíticas según las oscilaciones climáticas, estas pueden precipitar intrasedimentariamente en distintos niveles en uno o varios ciclos de aridez (Dangavs & Blasi, 2002).

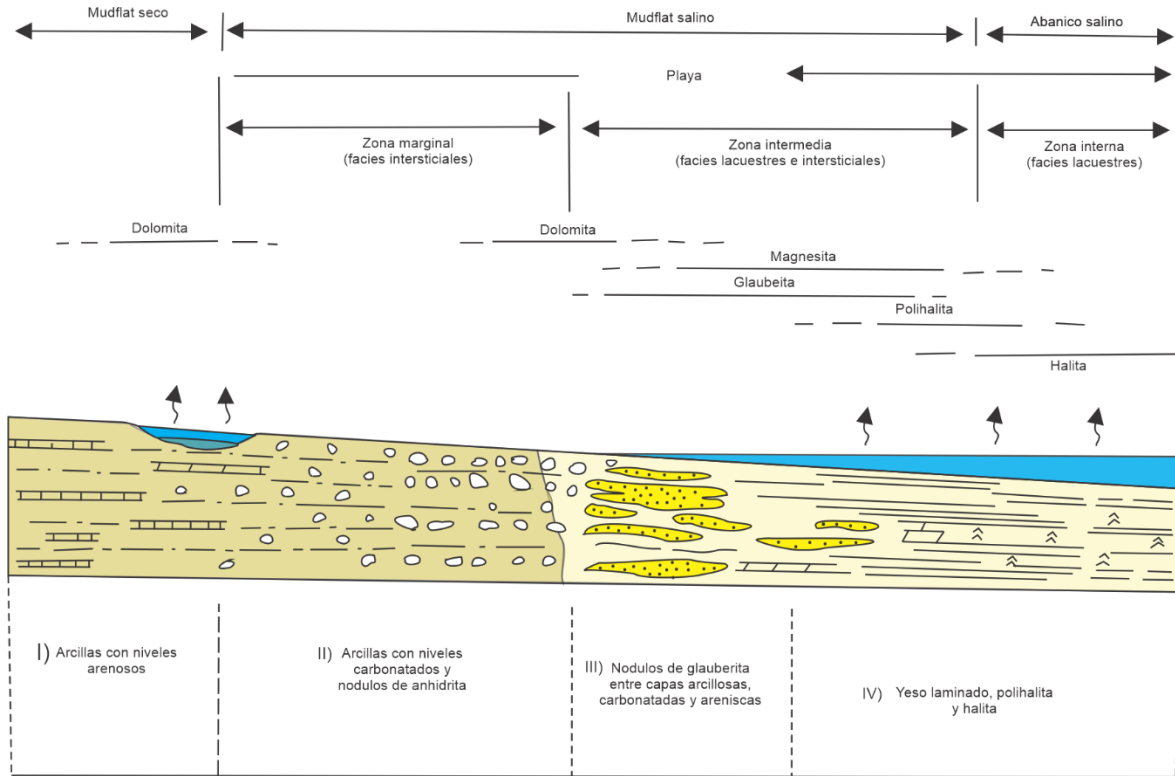
Los ambientes sedimentarios adecuados para la formación de estos depósitos evaporíticos son, sean marinos (ejemplo: sabkhas y lagos costeros) o continentales (lagos salinos y perfiles de suelo en regiones áridas) (Calvo, 1997).

Según Calvo (1997) explica casos como los ambientes marinos, donde el descubrimiento de llanuras costeras evaporíticas (sabkhas) a lo largo de las costas del Golfo Pérsico las propuso como punto clave para comprender el ambiente de formación; estas zonas presentan una tasa alta de evaporación donde el agua cubre extensas zonas del orden de kilómetros. A nivel mundial las lagunas costeras (saladas) son propicias para la formación de cristales evaporíticos, sea desde la zona profunda de la solución salina o sobre la superficie. Referente a los ambientes continentales como lagos salinos (con dimensiones variables), presentan cierta similitud en cuanto a los “sabkhas” costeros, aunque se tendrá una mayor variabilidad composicional, donde los depósitos estarán interstratificados con otras sales (ejemplo: halita o sulfatos sódicos).

Serna (1969) afirma que existe una relación entre el yeso y las sales de potasio en cuanto a su ocurrencia, aunque con diferencias genéticas tales como concentraciones en soluciones y origen de esta y la tasa de evaporación-concentración. En estos depósitos es ideal su conservación en sitios donde no queden expuestos a la erosión y zonas poco deformadas. Nota: Investigación de una formación terciaria continental en la Cuenca del Ebro. Tomado de Salvany (1990) en (Calvo, 1997).

Figura 5.

Esquema general de distribución de depósitos evaporíticos.



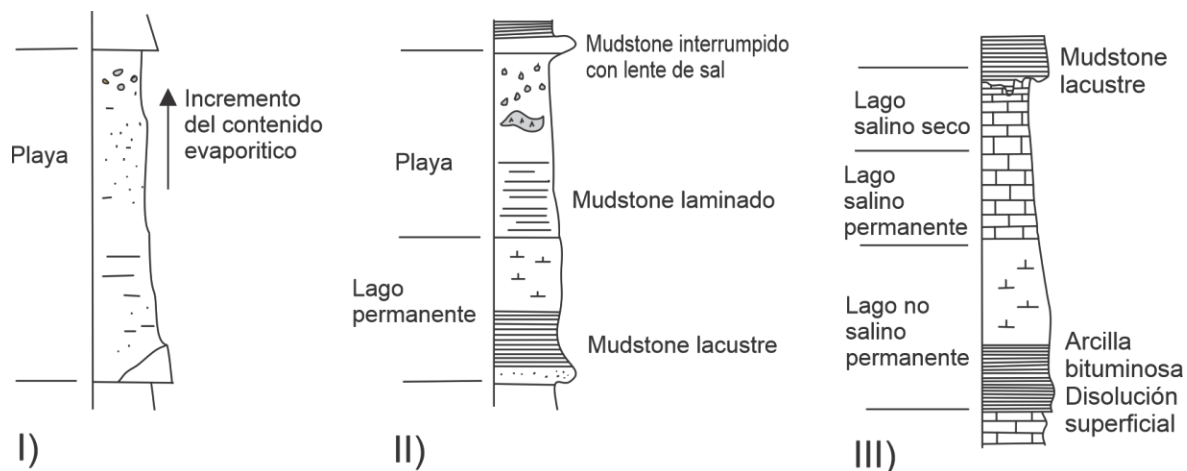
Nota: Adaptado y modificado de Investigación de una formación terciaria continental en la Cuenca del Ebro. Tomado de Salvany, J. (1990). Formaciones evaporíticas de la cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante; nuevas aportaciones y guía de superficie. ENRESA; Departamento de Geoquímica, Petrología; Prospección Geológica, Universidad de Barcelona ENRESA, 54-58.

A continuación, se explicará los ambientes generales en los cuales se puede dar la precipitación química de soluciones acuosas salinas a hipersalinas, dando lugar a depósitos evaporíticos:

Cuencas lacustres evaporíticas (continentales). Depósitos salinos del tipo lago son típicamente asociados con facies de abanicos aluviales y eólicos, sin embargo, su precipitación depende del balance acuoso y minerales salinos presentes. Como tendencia se ve que las evaporitas se encuentran en el centro del lago (Reading, 1996).

Figura 6.

Ciclos hipotéticos desde el margen al centro del lago (a-c, respectivamente).



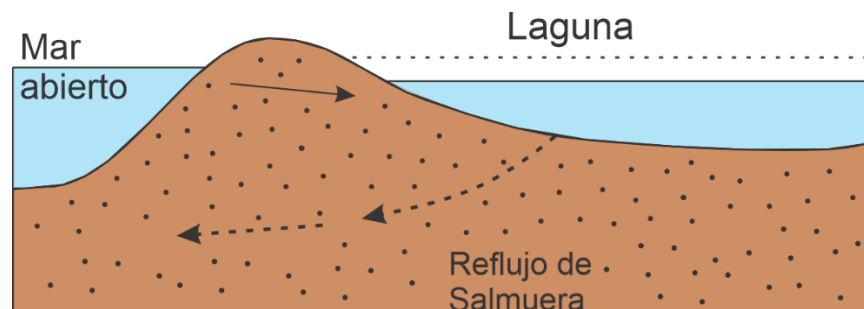
Nota: Adaptado y modificado de Kendall, A.C., 1984. Evaporites. Geosci. Can., Reprint Ser., 1: 259-296.

Laguna salina (cerca de la línea de costa). Al tener un intercambio con el mar de forma esporádica a través de un canal permeable provocando flujo pequeño de agua de mar y reflujo de salmuera y la reducción en el volumen de la solución causado por las altas tasas de evaporación genera la precipitación de cristales. En este ambiente sus espesores evaporíticos se encuentran en función del tiempo de precipitación que tenga las sales y del aporte de agua salina; Las lagunas pueden presentar diferentes fases de desarrollo, teniendo un sistema dinámico de evaporita

deposición, en el que las sales son transportadas adentro y fuera de la cuenca (Jiménez y Rodríguez, 2012).

Figura 7.

Esquema sobre las lagunas salinas cercanas a la línea de costa.

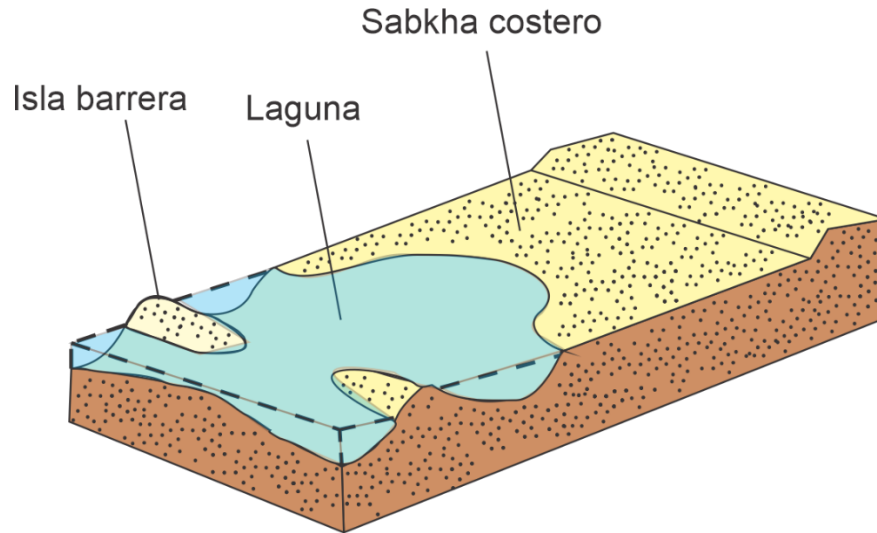


Nota: Adaptado y modificado de Kendall, A.C., 1984. Evaporites. Geosci. Can., Reprint Ser., 1: 259-296.

Sabkhas costeros. Zonas supra mareales que se inundan esporádicamente durante mareas altas, se desarrollan atrás de las islas barreras, estas son formadas por sedimentos marinos transportados en tierra, su superficie es controlada por el nivel freático. La precipitación de sales se da por el bombeo evaporíticos de aguas subterráneas hasta la superficie del Sabkha (Jiménez y Rodríguez, 2012).

Figura 8.

Esquema sobre el ambiente de Sabkha.

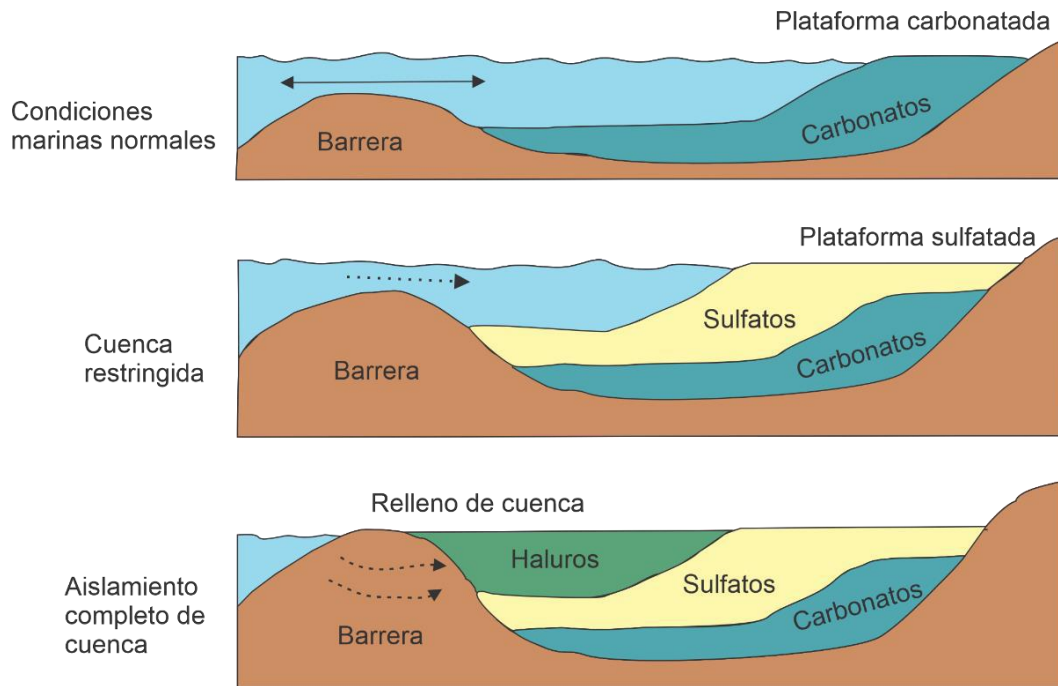


Nota: Adaptado y modificado de Kendall, A.C., 1984. Evaporites. Geosci. Can., Reprint Ser., 1: 259-296.

Cuencas marinas aisladas. La sedimentación continua de evaporitas que forman grandes volúmenes se da en los casos que el agua salada se aísla del océano, sobresaturándose lo que favorece su precipitación química (Reading, 1996); estos casos son semejantes a los mares epicontinental o en cuencas oceánicas con acceso restringido del océano por una barrera, las cuales se caracterizan por su gran acumulación de evaporitas (Jiménez y Rodríguez, 2012).

Figura 9.

Esquema de cuencas oceánicas aisladas y la evolución de las sales precipitadas.



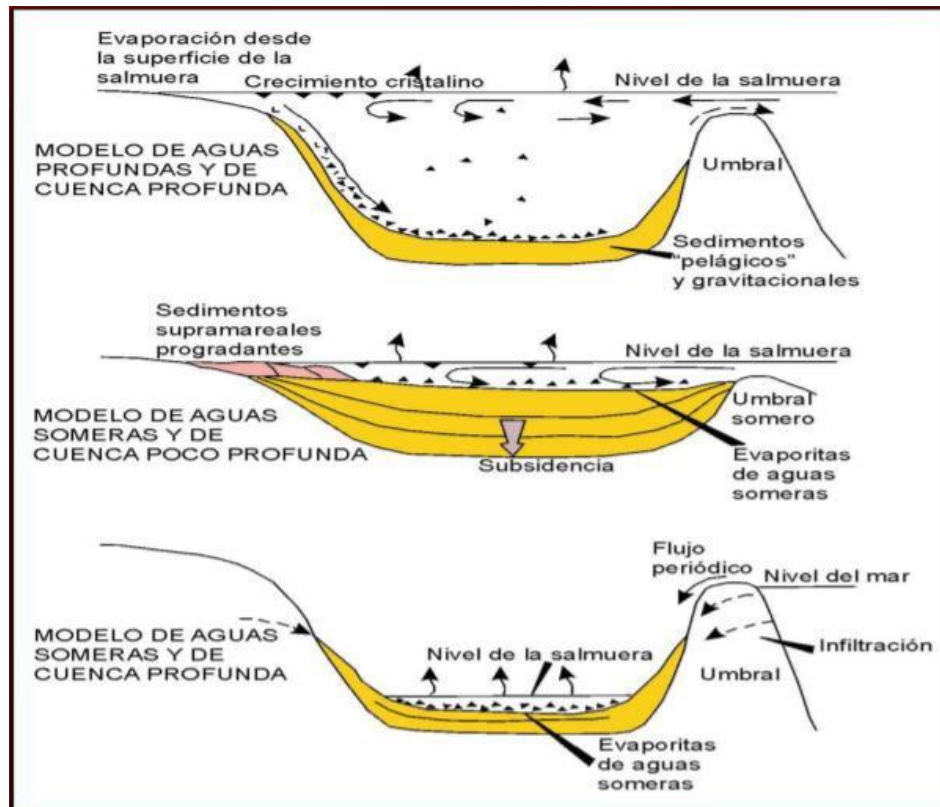
Nota: Adaptado y modificado de Jiménez, E., & Rodríguez, O. (2012). Evaluación petrolera y métodos de explotación de yacimientos asociados a secuencias evaporíticas. México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México.

Por último, Kendall (1979) citado en Spalletti (2006), propone tres modelos generalizados para explicar los modelos ambientales evaporíticos, centrándose en cuencas marinas, dando explicación a grandes acumulaciones de evaporitas:

- Aislamiento parcial en aguas y cuencas profundas.
- Aislamiento parcial en aguas superficiales y cuenca someras.
- Aguas someras y cuenca profunda.

Figura 10.

Modelos evaporíticos según el ambiente de formación.



Nota: Adaptado y modificado de Kendall, A. C, 1979. Facies models 14. Subaqueous evaporites.

In Walker, R. G. (Ed.), Facies Models: Waterloo, Ontario (Geological Assoc. Canada), 159-174.

4.2 Generalidades sobre los suelos y fertilización.

4.2.1 Agrogeología, una alternativa para el agro.

La fusión y/o aplicación de la geología en el agro, es explicada por Van Straaten (2006) quién describe el concepto de la agrogeología, correspondiente a “una aproximación interdisciplinaria que apunta al estudio de los procesos geológicos y los materiales rocosos y

minerales que contribuyen al mantenimiento de los agroecosistemas”, según el autor destaca dos aspectos clave como: “el rol del material parental en el desarrollo y productividad del suelo” y “las aplicaciones benéficas de los materiales geológicos para estimular la productividad de los cultivos agrícolas y así contribuir a un mejor manejo de los sistemas hortícolas y forestales”, con lo cual agogeología, en contraste con los fertilizantes químicos, permite “incrementar la tasa de liberación de nutrientes a partir de minerales y rocas naturalmente ricos, aumentando la velocidad de liberación de dichos nutrientes a través de varios procesos, químicos, físicos y biológicos”.

Por consiguiente, es importante recalcar el gran potencial para fertilización o mejoramiento del suelo de las rocas, lo cual propone Van Straaten (2006) teniendo en cuenta que los 18 elementos esenciales en la nutrición de las plantas, exceptuando el nitrógeno, se encuentran disponibles en las rocas y se derivan de minerales, así como la ineffectividad de los fertilizantes comerciales disponibles frecuentemente en suelos tropicales y enfatizando que “muchos de ellos son muy costosos para los pequeños agricultores”; además un impacto importante causado por el uso de fertilizantes comerciales es la huella de carbono que se genera por efecto del transporte marítimo y terrestre de estos a través de grandes distancias. Esta situación plantea un reto y pone en contexto el gran déficit en cuanto a fertilizantes y aditivos efectivos para zonas tropicales, lo cual sugiere una iniciativa para la búsqueda y desarrollo de insumos y aditivos de suelo, a partir de rocas que puedan abastecer y complementar a la población local.

Cada mineral al ser un compuesto inorgánico, con propiedades y composición química definida, según su especie se puede pensar en aportes al suelo, con lo cual se cita en caso del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se tienen reportes de su uso desde las épocas de los antiguos griegos y romanos y en el siglo XVIII, como insumo agrícola (Intagri, 2014), teniendo como ventajas a favor su

solubilidad mucho mayor a otros compuestos, permitiendo a los nutrientes mayor movilidad en el suelo.

El yeso, denominado químicamente Sulfato de calcio bihidratado, tiene como nutriente a aportar principalmente calcio (Ca) y azufre (S); En (Intagri, 2014) expone que el calcio es un elemento con movilidad limitada en especies vegetales, por lo cual su demanda siempre debe estar satisfecha para un óptimo desarrollo en todas las etapas de crecimiento, el cual se logra debido a su solubilidad (P. 1). Adicional para (Intagri, 2014) el yeso otorga beneficios químicos como control de la acidez, control de toxicidad por aluminio (Al) y mejoramiento en suelos sódicos, lo cual promueve un mejor y profundo enraizamiento (contribuye activamente en control fitotóxicas), de las especies vegetales y mejor optimización del agua, aclarando que no es un “agente encalado” sino una sal neutra, modifica el pH del suelo moderadamente, adicionalmente siendo agente floculante en suelos sódicos, promoviendo una mejor estructura del suelo.

4.2.2 Fertilización de suelos, macro, micronutrientes y propiedades.

Para White & Brown (2010) las plantas precisan de seis elementos principales, los cuales son nitrógeno (N), Potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y Azufre (S), otros elementos como el boro (B), hierro (Fe), Manganeso (Mn), níquel (Ni) y molibdeno (Mo) se requieren en pequeñas cantidades; Los autores señalan que suelos con baja disponibilidad en estos elementos deben ser suplidos mediante la aplicación de fertilizantes, logrando alcanzar el contenido nutricional demandado. Según Arnon & Stout. (1939) estos elementos esenciales residen en contribución al desarrollo del ciclo vegetativo, cumplen funciones dentro de su sistema (por ejemplo: actúan de sobre manera en el metabolismo) entre otros, estos estando presentes como iones intercambiables, móviles o con escasa movilidad; por su parte Salas (2003) divide a estos elementos entre

macronutrientes, elementos plasticos activos en la construcción de estructura celular, los cuales se encuentran en concentraciones mayores a 1000 $\mu\text{g/g}$ en peso seco y micronutrientes los que se encuentran en menores concentraciones a este valor, participando en la dinamica celular.

En cuanto al suelo, este heredara las propiedades de su material parental, influidas por factores como el clima, tiempo de formación, etc. Definiéndose según Intagri (2020), como la relación entre la disposición de partícula minerales y sustancias orgánicas en unidades de mayor rango denominadas agregados lo cual configura su estructura que a la vez controla factores como el agua, transporte de elementos, aireación, respuesta a procesos de germinación y enraizamiento, entre otros.

En Salas (2003) se explica puntualmente el rol del potasio como neutralizador de abundantes radicales ácidos producidos durante el metabolismo, mantenimiento la presión osmótica celular (lo cual favorece la absorción de agua en las raíces) (Hsiao & Lauchli, 1986), así como en el cierre y apertura de estomas (Edwards et al., 1988), así como control de actividad fotosintética en la regulación de CO_2 (Humble & Raschke., 1971) (p. 5).

Complementando, Salas (2003) también resalta a otros elementos como el calcio (Ca) el cual se encarga de ser confuctor de señales entre factores ambientales y respuestas vegetales en crecimiento y desarrollo, asi como en conjuncion con otros componentes contribuye al fortalecimiento de paredes celulares y tejidos de plantas (Konno et al., 1984), asi como neutralizador de acidez celular (puesto regula permeabilidad en la pared celular), poniedo como elemento de escaza movilidad en la planta (P. 6). A su vez (Clarkson & Hanson, 1980) mencionan al magnesio (Mg) como puente para formar complejos de dirente estabilidad, agregando Salas (2003) que es el catión preferente a neutralizar el P y movilizador de estos a partes jovenes de las

plantas. Por ultimo, se menciona al azufre (S) el cual constituye los aminoacidos de varias metalproteinas y es interventor activo en el acomplejamiento de metales (Salas, 2003).

Hay elementos que tienen una mayor movilidad tales como K, Na, Mg, N, P, S, Se y Cl mientras que otros elementos como Fe, Zn, Cu, Mo presentan poco transporte dentro de estos sistemas, lo cual permite que el primer grupo de elementos esté mucho más concentrado en frutas, semillas y tubérculos (e.g. Karley & White, 2009; White & Broadley, 2009; White et al., 2009; citados en White & Brown, 2010).

Según Prével et al., (1983) “la nutrición vegetal es el complejo de relaciones entre componentes químicos y la planta, sea dentro o en sus interfases con el medio” (P.9). Al verse ante disponibilidad o escasez de nutrientes las plantas adaptan su ritmo de desarrollo según la disponibilidad y el tipo de nutrimento que demande (Salas, 2003).

En lo que respecta a la nutrición vegetal hay tres divisiones las cuales son:

Nutrición hídrica. El agua llega hasta las raíces y se inmersa dentro de la planta, es un buen rendimiento, pero el volumen de agua en tránsito es superior al retenido (Salas, 2003).

Nutrición carbonada. Se centra en cambios gaseoso-contrapuestos a la atmosfera, la actividad fotosintética supera la respiratoria dando un balance de CO₂ bueno (Salas, 2003).

Nutrición mineral. Se relación con elementos minerales (excepto H, C, O), su incorporación se da vía absorción radicular y estos corresponden a menos del 10% del peso seco de la planta (Salas, 2003).

La demanda de nutrientes del suelo agrícolas se ha buscado satisfacer con la inserción de fertilizantes primando elementos como el Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K); aun así, existen propiedades en el suelo que aumentan o disminuyen su fertilidad albergando un contenido nutricional variable, entre ellas se destacan pH, contenido de materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Horneck et al., 1999).

pH. Según Horneck et al., (1999) define al pH como un reflejo de la acidez, indicando que un pH ideal para cultivos se encuentra en el rango de 6.0 a 8.2;

Tabla 2.

Rangos de pH en los tipos de suelos.

	pH
Fuertemente acido	<5.1
Moderadamente acido	5.2-6.0
Ligeramente acido	6.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Moderadamente alcalino	7.4-8.4
Fuertemente alcalino	>8.5

Nota: Adaptado de Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Owen, J. S., & Hart, J. M. (1999). Soil Test Interpretation Guide.

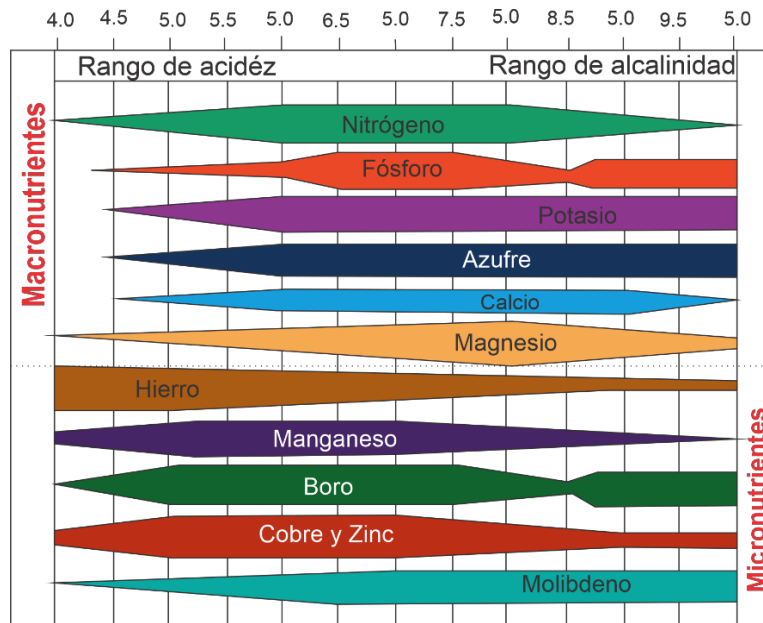
De acuerdo Horneck et al., (1999) el pH del suelo puede ser incrementado mediante la adición de Cal (CaCO_3) y así cumplir con los rangos de pH para un cultivo determinado. Además, tasas muy bajas de Cal en los suelos, indican suelos arenosos o baja capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Según Intagri (2018) este valor mide la acidez o alcalinidad de la solución de un suelo, en el cual las raíces toman nutrimentos necesarios para su desarrollo, puesto los nutrimentos se mantienen según el rango de pH. En (INTAGRI, 2018) para un suelo alcalino con disponibilidad de micronutrientes como Cu, Zn, Fe, entre otros, a través de compuestos insolubles mientras que en suelo ácidos se restringe la nitrificación y descomposición de materia orgánica, así como la presencia de iones de aluminio afecta la solubilidad de fosfatos y sulfatos. Proponiendo este mismo autor que el rango más estratégico para suelos seria 6.0 a 6.5.

La oscilación en estos valores en el suelo se puede deber a aplicación de fertilizantes fuertes, enmiendas orgánicas o aplicación de materia mineral, acidificación de raíces, precipitación y lixiviación, alcalinidad de agua de riego entre otros (INTAGRI, 2018).

Figura 11.

Relación del pH con los macronutrientes y micronutrientes disponibles



Nota: Esta relación subdivide a los nutrientes según el rango del pH del suelo y su disponibilidad en este; modificado y adaptado de Castellanos, J. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Guanajuato, México. 226 p. : Segunda edición, Intagri, S.C.

Tabla 3.

Rangos esquemáticos de pH y su consecuencia.

Intervalo de pH	Consecuencia
<4.0	Sugiere presencia de ácidos libres producto de la oxidación de sulfuros
<5.5	Sugiere presencia de aluminio intercambiable o exceso de manganeso
7.3 - 8.4	Sugiere tener presente carbonato de calcio
>8.2	Sugiere presencia de concentraciones elevadas de sodio intercámbiale

Nota: adaptado de INTAGRI. (2018). *Disponibilidad de nutrimentos y el pH del Suelo*. México: Serie nutrición vegetal. Número 113. Artículos técnicos de INTAGRI.

Materia orgánica (MO). Horneck et al., (199 INTAGRI 9) la define como un sustituto para el carbón del suelo y como indicador de su salud. Al monitorearse anualmente de forma periódica, puede dar un indicio de la calidad del suelo. Es indicativo directamente proporcional (en la generalidad de los casos) a otros factores como CIC, la cantidad total de N del suelo y otras propiedades como el almacenamiento de agua y la actividad microbiana (Horneck et al., 1999).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). se define por FAO (2021) como “una medida de la cantidad de cargas negativas en los minerales y componentes orgánicos del suelo representando la capacidad de cationes que puede retener y liberar, disponibilidad de nutrientes

para las plantas entre otras” (p.1). En Horneck et al., (1999) agregan que es una medida relativamente constante y que suelos con alto contenido de arcilla y/o materia orgánica (MO) suelen tener alto CIC. Por su parte (Manning, 2010) agrega que la retención de elementos como el potasio (K) en el suelo depende totalmente de esta característica.

Transporte de iones en la planta. El movimiento de elementos mediante especies iónicas se enmarca en transporte activo (movimiento en contra del gradiente de concentración, dependiendo del gradiente electroquímico) y pasivo (movimiento de mayor a menor concentración) (Salas, 2003). Para lo cual Mengel & Kirkby. (1982) añaden que potenciales electricos negativos indican transporte activo mientras que potenciales positivos indican transporte pasivo.

Tabla 4.

Relación de elementos y su movilidad.

Elemento	Movilidad
N – K - Na	Muy alta
P – Cl – S – Mg	Alta
Zn – Cu – Mn – Fe	Media a escasa
B – Ca	Muy escasa

Nota: Adaptado de Bertsch, F. (1995). La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

La aplicación de yeso siempre depende de las condiciones que se requieran y de las cuales ya dispone el sitio de interés, teniendo beneficios como un mejor enraizamiento, mejoramiento en la estructura del suelo, lo que desemboca en mayor productividad y rendimiento en cultivos (Intagri, 2014). Las características de aplicación al suelo dependen de factores como viento, pH, necesidad de remediación, estaciones o latitudes de aplicación entre otras.

4.2.3 Nutrientes esenciales. Importancia para los suelos, cultivos y especies vegetales.

Se resalta que la importancia nutricional radica en que estos elementos esten presentes en funcion de la fotosíntesis e intercambio energético con los microorganismos, teniendo siempre presente el principio de restitución (agregar de nuevo estos elementos subtraídos al suelo). La razón de agregar insumos agrícolas y fertilizantes a un suelo es suplir los elementos de los cuales el ambiente no tiene la capacidad de suministrar, teniendo en cuenta factores como: I) Requerimientos del cultivo, II) Características del suelo, III) Clima, IV) rendimientos del cultivo, V) causa-consecuencia de aditivos agregados al suelo y VI) costos de aplicación de aditivos (Salas 2003, P. 15).

Según (Manning, 2010) los tres nutrientes vegetales principales N, P y K, de los cuales el potasio (K) y fósforo (P) se obtienen exclusivamente de materiales geológicos.

Mundialmente se buscan alternativas de insumos agrícolas que cumplan con especificaciones naturales y saludables al consumo, sin añadir ningún aditivo químico o sustancia perjudicial para los sistemas vivos, con lo cual se plantean escenarios tales como:

- Búsqueda de alternativas a sales (motivado por demandas de protección ambiental) como suministro para agricultores orgánicos, con lo cual se profesa la filosofía de “Remineralizar la Tierra”, al utilizar polvo de roca (Remineralize the Earth, 2018).

- Por ejemplo, el uso de rocas ricas en K las cuales son usadas en cultivos con rendimientos satisfactorios a largo plazo a las necesidades del productor y su demanda, esto como alternativa a países que carecen fondos para compra de fertilizantes convencionales (Remineralize the Earth, 2018).

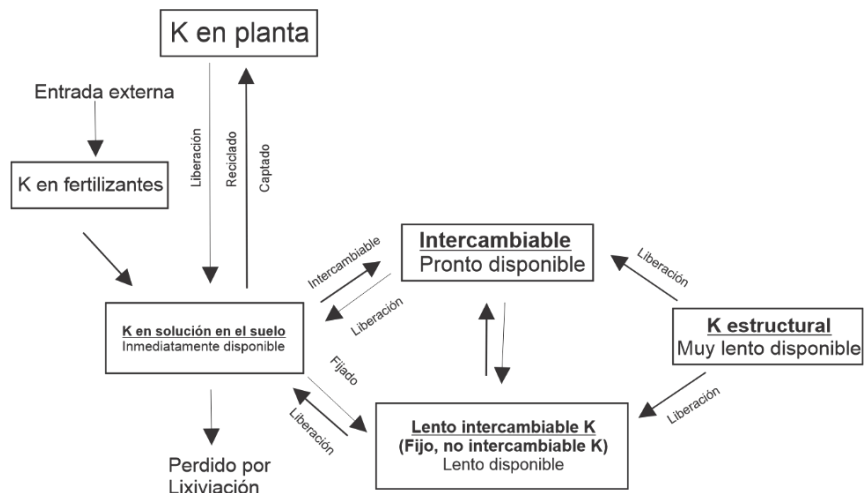
Entre los macronutrientes se destaca como elemento protagónico el potasio (K) teniendo su primer reconocimiento sobre el crecimiento de las plantas en Englishman Home (1762) citado en (Mengel & Kirkby, 1980), debido a las practicas experimentales que desarrollaban con cebada en macetas, utilizadas para investigar la absorción. Posteriormente Liebig (1841) afirma que el K^+ está presente en el metabolismo vegetal, lo cual influye en la vida de las plantas y participa en su desarrollo. Al ser el séptimo elemento más abundante de la corteza terrestre, lográndose extraer por medio de minería (actualmente el 80% de tipo subterránea) por disolución (lixiviación in-situ) o por medio de salmueras naturales (Fundación Maxam, 2020). Por su parte Römheld & Kirkby (2010) destacan al K como el catión inorgánico más abundante en el tejido de las plantas y definen dos fuentes principales accesibles a las raíces, el primero definido como EK (“exchangeable K”), que es el K inmediatamente disponible para las plantas, almacenada en sitios de carga negativa en minerales arcillosos, y el segundo es el SEK (“slowly-exchangeable K”) el cual es K lento y disponible para las plantas, pero no intercambiable, proveniente de sitios con elevada meteorización de minerales arcillosos micáceos.

Complementando Sparks (1987) afirma: que las formas de K disponibles en el suelo para las plantas, se encuentran presentes en: (I) soluciones intercambiables el cual está retenido por las cargas negativas de la materia orgánica y minerales arcillosos (este se intercambia con facilidad con otros cationes), (II) no intercambiable (el cual se encuentra disponible moderado a escaso según los parámetros del suelo) y (III) minerales (sujetos a parámetros como el grado de meteorización entre otros, estando disponible lentamente para las plantas), la diferencia entre las dos últimas categorías reside en que en este el K mineral se encuentra unido covalentemente dentro de estructuras cristalinas (p. 5-8).

Las fuentes de potasio (K) y su papel en las plantas, tal y como se acaban de explicar, se resumen en un esquema actualizado del ciclo del potasio:

Figura 12.

Ciclo del potasio en suelos.



Nota: Modificado y adaptado de Öborn I., Andrist-Rangel, Y., Askegaard, M., Grant, C., Watson, C., Edwards, A., (2005). Critical aspects of potassium management in agricultural systems. Soil

Use Manag, 102-112.

En Römheld & Kirkby, (2010) reafirman la importancia de futuros estudios orientados hacia la importancia del K, pues hay poca información disponible respecto a la producción de cultivos. Dada la importancia y el impacto de las fuentes de K en los suelos, plantas y cultivos, (Manning, 2010) profundiza aún más, llegando a destacar que el 80% de la producción global de potasio está dominada por cinco países, los cuales son Bielorrusia, Canadá, China, Alemania y Rusia; destacando la concentración de al menos el 50% de las reservas globales de potasa (K₂O) en Canadá.

Tabla 5.

Estadísticas de producción y reservas estimadas de potasa (K₂O).

	2012 prodn	2013	Reserves
Canada	9000	10,500	1,000,000
Russia	6500	5300	600,000
Belarus	5650	4900	3,300,000
China	3900	4300	210,000
Germany	3000	3000	140,000
Israel	1900	2000	40,000
Jordan	1400	1200	40,000
USA	900	1100	150,000
Chile	900	970	200,000
Brazil	430	470	22,000
UK	460	460	300,000
Spain	425	436	20,000
Other			50,000
	34,465	34,636	6,072,000

Nota: Adaptado de Jasinski, S. (2014b). Potash. *United States Geological Survey Minerals Yearbook*. * Unidades en miles de toneladas equivalentes de K₂O.

En los últimos años se ha notado un alza en la demanda de potasa (K₂O), la cual se prevé alcanzar los 38 millones de toneladas para 2020, incentivando la búsqueda de alternativas y otras

fuentes de donde obtener el mineral como insumo agrícola (Da Costa, 2018). Römheld & Kirkby, (2010) complementan que el K es fundamental para “el crecimiento de plantas y la resistencia a enfermedades”, entre otros procesos tales como los destacados por Waraich et al., (2011) como la disminución de las especies reactivas de oxígeno (ERO), la resistencia a los efectos del estrés externo como la alta intensidad de luz, disminuciones drásticas de temperatura y sequías, o por el contrario en deficiencia del mismo reducen la fijación fotosintética del CO₂ y del transporte y utilización de sus asimilables, añadiendo O’Neill & Spanswick, (1984) la importancia del potasio en la enzima responsable de la activación del ATP (adenosín tri-fosfato) y estudios realizados por Wang et al., (2013) demuestran la estrecha relación entre las fitohormonas y el potasio, las cuales ayudan en la regulación de procesos bioquímicos y metabólicos.

De forma experimental Da Costa et al., (2018) realizaron experimentos en cultivos de tomate en los cuales aplicaron varias fuentes concentradas en potasio (sulfato de potasio) dando resultados en cosechas más grandes y de mejor calidad. A pesar de su aplicabilidad, (Kemp et al., 2016) resaltan que es un nutriente susceptible a la remoción del suelo por diversos procesos como lixiviación.

No obstante, otros elementos nutricionales relevantes generalmente en el ámbito agrícola son el calcio, azufre y magnesio, importantes en ciertos estadios de vida fisiológica y desarrollo vegetal, aunque requeridos en cantidades intermedias. Agregando Molina y Henríquez, (2003) que el Ca y Mg constituyen la mayor fracción de cationes intercambiables en el suelo, teniendo un comportamiento similar al K, siendo la fertilidad medida en base a la disponibilidad de estos cationes en los suelos (P. 58).

El calcio (Ca) es esencial para el crecimiento de las raíces, requerido para mantener la integridad de la membrana celular y su permeabilidad, además de activar varias enzimas que intervienen en procesos celulares; por su parte el magnesio (Mg) es un componente de la clorofila, la cual se encarga de capturar energía durante la fotosíntesis (Molina y Henríquez, 2003; P. 58).

En (Molina y Henríquez, 2003) hacen referencia al común uso de calcio en suelo con problemas de acidez, utilizando para neutralizarlo e incrementando la fracción de Ca en estos, destacando al yeso, utilizado (en una granulometría muy fina) en este tipo de situaciones sea suelos con acidez moderada con bajo contenido de Ca o problemas de acidez directamente en el subsuelo; a pesar de su pequeña solubilidad en agua, puede reaccionar a corto plazo en el suelo y ser una fuente importante de Ca y S para los cultivos además de elevar la capacidad de intercambio catiónico y disminuir el aluminio intercambiable sin alterar el pH del suelo (Molina y Henríquez, 2003; P.60).

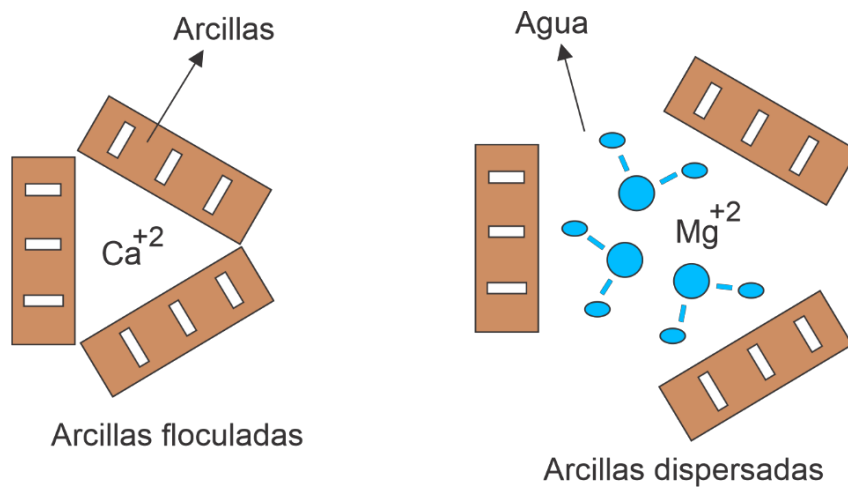
En lo que respecta al azufre (S) Molina y Henríquez, (2003) reportan ser esencial para la formación de proteínas vegetales así como componente en muchas vitaminas, contribuyendo al desarrollo de la planta y mantenimiento de su color (debido a su participación en la formación de clorofila), a pesar de estas funciones ha estado enmascarado puesto fue aplicado como componente no identificado en muchos fertilizantes. Se ha usado el azufre elemental como reductor del pH en suelos alcalinos (puesto tiene un alto índice de acidez fisiológica). En su aplicación los autores antes mencionados manifiestan que el S es susceptible a lixiviación o retención en el suelo por coloides.

A manera de aclaración Molina y Henríquez, (2003) destacan que la lixiviación se incrementa con el pH, con lo cual en un suelo ácido hay menor lixiviación debido a que los iones

y elementos pueden ser retenidos por los coloides del suelo (P. 67). A su vez otros procesos como la erosión determinan el aprovechamiento y manejo que se le pueda dar al suelo, con lo cual se requieren procesos de floculación (en suelo arcillosos) en el que se da una mayor cohesión al suelo, producido por la adición de yeso, el cual aporta calcio (Ca) que realiza la función de agente floaculante reduciendo la dispersión de los microagregados arcillosos (Intagri, 2014).

Figura 13.

Contraste de floculación en suelos arcillosos.

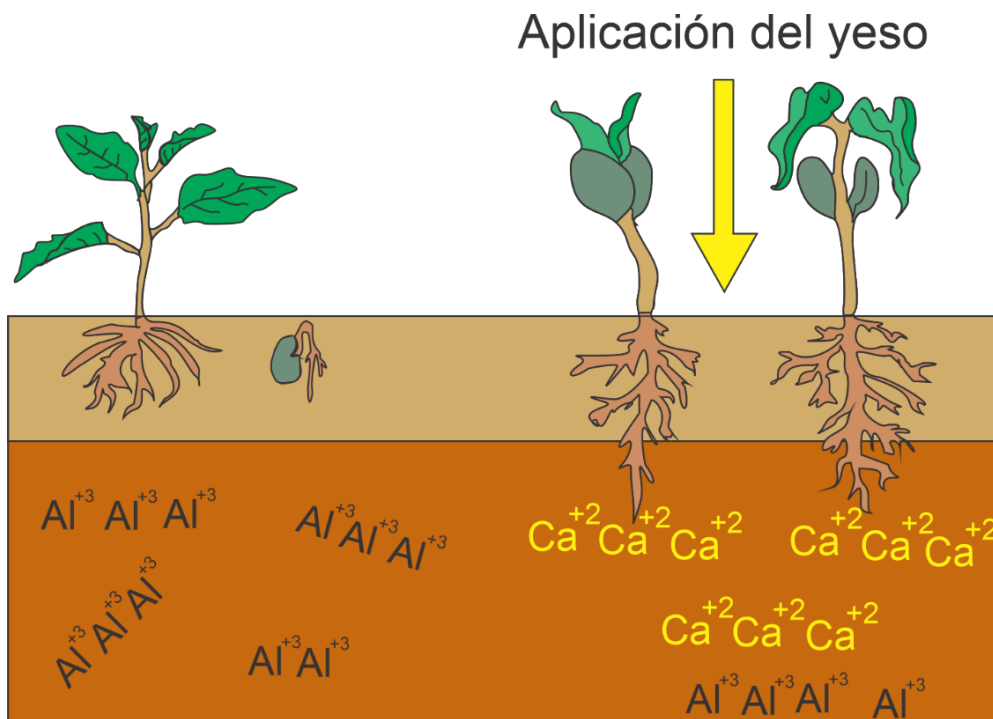


Nota: La dispersión de los suelos arcillosos se debe a la presencia de iones hidratados atraídos a la superficie de minerales arcillosos, lo cual se compensa con adición de calcio desarrollando una mejor estructura del suelo. modificado y adaptado de Chen, L., & Dick, W. (2011). Gypsum as an Agricultural Amendment. General Use Guidelines. Ohio: The Ohio State University. 36 p.

Agregando a las propiedades del suelo descritas en el inciso anterior, este elemento directamente al contriuir con una mejor estructura del suelo, tambien fortalece la difusi3n de oxigeno, que repercute en respiraci3n raizal y actividad fisiologica basica en absorci3n de nutrientes (Intagri, 2014). A su vez, a pesar de no ser un “encalado” este modifica levemente la acidez, la cual repercute en la disponibilidad de iones de Al^{+3} intercambiable en el suelo lo que produce deficiencia en elementos como el P, teniendo como remediaci3n aplicar yeso para contrarestar estos efectos debido a los iones de Ca^{+2} .

Figura 14.

Remediaci3n de acidez en el suelo al aplicar yeso.



Nota: Al aplicar yeso, debido a su solubilidad mayor a otros compuestos que aporta Ca al suelo, promueve un mejor enraizamiento y una estructura mas consistente al suelo. Modificado y adaptado de Sumner, M. E., & Larrimore., L. (2006). Use of gypsum for crop production on

southeastern soils. . St. Louis, Mo. : Presented at the workshop on Research and Demonstration of Agricultural Uses of Gypsum and Other FGD Materials.

4.2.4 Funciones y beneficios en las plantas.

Dentro de la corteza terrestre se encuentra una gama de elementos extensa, de las cuales solo una fracción se destacarán, puesto son clave para la nutrición y desarrollo de las especies vegetales, como lo son el nitrógeno (N), fosforo (P), hierro (Fe), calcio (Ca) y potasio (K), este último se destaca puesto su importancia y uso como nutriente esencial por las plantas ((Sparks, 1987); (Manning, 2010)).

Los elementos utilizados como insumos agrícolas provienen de muchas fuentes, las cuales varían según su origen y procesos genéticos, es común extraerlo de silicatos, los cuales han sufrido procesos de meteorización continua (vonWilpert & Lukes, 2003), aunque estas reservas son de bajo grado, convirtiéndolas en una opción poco viable para uso comercial en la agricultura como aditivo o fertilizante (Manning, 2010); aunque otra forma de obtener este mineral proviene de depósitos evaporíticos, respecto a minerales como calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), entre otros.

Puesto en todos los desarrollos agrícolas apremia el principio de restitución, en el cual al suelo se reincorporan los elementos agotados o perdidos, toma valor el concepto de fertilizante, ejerciendo efectos positivos sobre las plantas, incrementando crecimiento, productividad y calidad de cultivos. En Molina, (2003) destacan que la producción de fertilizantes ha aumentado diez veces desde 1950, correlacionándose con el aumento de la población mundial, a s vez como el progresivo agotamiento de reservas nutricionales del suelo (P. 20).

Tabla 6.*Forma de absorción y expresión química de nutrientes en los fertilizantes*

Elemento	Forma de absorción	Expresión química en el fertilizante
Nitrógeno	NH^{+4} , NO^{-3}	N
Potasio	K^{+}	K_2O
Calcio	Ca^{+2}	CaO
Magnesio	Mg^{+2}	MgO
Azufre	SO_4	S

Nota: Adaptado de Molina, E. (2003). FERTILIZANTES: CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES. En G. M. Meléndez, Fertilizantes: características y manejo (págs. 20-29). Costa Rica.

Dentro de esta gama de aditivos agrícolas y fertilizantes hay que resaltar varias propiedades de ellos, puesto influyen en eficiencias agronómicas.

Tamaño de partícula. Influye directamente en la tasa de liberación (las cuales son inversamente proporcionales al tamaño de la partícula) en el suelo, teniendo en cuenta que a mayor solubilidad el tamaño de partícula será mayor (Molina, 2003, P. 23).

Acidez y basicidad. En Molina, (2003) destacan su importancia puesto al agregar insumos, estos tienden a modificar sus condiciones iniciales de pH. Lo cual repercute en el desarrollo de las especies vegetales sembradas.

Índice de salinidad. En Molina, (2003). Esta propiedad indica el incremento de la presión osmótica de la solución del suelo, utilizándose como indicador con el fin de evitar daños en las plantas y acumulación de sales en el suelo (P. 26).

En cuanto a KCl se utiliza como fuente base de potasio en fertilizantes (FAO, 2015), no obstante, a pesar de la necesidad del mineral ante la demanda, en ciertos tipos de cultivos como la agricultura orgánica, el uso de insumos químicos (incluido KCl), no son permitidos (Codex Alimentarius Commission, 2007), con lo cual la búsqueda de alternativas se hace imperativa, tomando relevancia el uso de minerales en polvo como opción oportuna a fuentes convencionales, en lo que la nutrición vegetal respecta (Basak et al., 2018, pág. 115).

La clave en lo que respecta la absorción de K (y otros elementos) por las plantas se debe a la producción de ácidos orgánicos (Basak et al., 2017), estas moléculas orgánicas también pueden ser producidas por hongos, bacterias, microorganismos, entre otros, los cuales están presentes en los suelos ((Sheng et al., 2008); (Yousefi et al., 2011); (Song et al., 2014)); los ácidos orgánicos contribuyen con la disminución del pH del sistema contribuyendo a la disolución de la roca en suelos, lo cual sucede más rápido en climas tropicales (debido a una mayor tasa de pluviosidad y temperaturas elevadas) (Basak et al., 2018).

Según Basak et al. (2018) expone como se realizó la experimentación de absorción de potasio a partir de diferentes fracciones de polvo mineral (material volcánico parental), evaluado en cultivos de maíz (*Zea maíz*) y “albahaca santa” (*Ocimum sanctum*), en macetas plásticas dentro de condiciones de invernadero en la Universidad de Newcastle, Newcastle (Australia); para esto se tomaron cuatro fracciones de polvo mineral y una muestra de control, tomada con substrato arenoso y polvo en proporciones 2:1, respectivamente, en las macetas plásticas; las absorciones de K en el maíz fue mayor que en la albahaca, destacando que mientras menor fuera el tamaño del polvo mineral mejor era su absorción, a su vez se encontró que aumentaron significativamente la concentración de oligoelementos (estando dentro límites permitidos) en ambas especies vegetales (p. 116). A su vez (Sparks, 1987) Afirma que la mineralogía del suelo es fundamental para la cinética del intercambio de elementos entre el suelo y minerales arcillosos.

4.3. Yeso para mejorar las propiedades del suelo

La estructura del suelo se define como la disposición de las partículas minerales principales y las sustancias orgánicas en unidades más grandes conocidas como agregados con sus sistemas de poros inter-agregados (Chen & Dick, 2011); siendo un factor que influye en una gran variedad de procesos del suelo como transporte químico, flujo del agua, aireación del suelo y régimen térmico, erosión por viento y agua, respuesta del suelo a mecanismos de estrés, germinación de semillas y penetración de raíces (Chen & Dick, 2011). La erosión es un proceso común en los suelos de regiones húmedas y áridas, tendiendo a dispersar y formando suspensiones estables de partículas en el agua lo que provoca compactación cerca de superficie (común en suelos arcillosos, formación de grietas de desecación). La corrección se da a partir del proceso de floculación en el

cual las arcillas individuales forman micro-agregados (Walworth, 2012) y (Chen & Dick, 2011), estimulados por niveles altos en salinidad y presencia de cationes (agente floculador), como el calcio (Ca^{+2}) siendo este un floculador muy eficaz (Walworth, 2012).

Tabla 7.

Poder de floculación relativo de los principales cationes en suelos.

Ion	símbolo químico	Poder de floculación relativo
Sodio	Na+	1.0
Potasio	K+	1.7
Magnesio	Mg+2	27.0
Calcio	Ca+2	43.0

Nota: Adaptado de Rengasamy, P. and M.E. Sumner. 1998. Processes Involved in Sodic Behavior.

In: M.E. Sumner and R. Naidu (eds) Sodic Soils – Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences, pp. 35-50. Oxford Press, New York, NY.

Para tener idea general de la estabilidad en un suelo, se puede hacer un cálculo de la tasa de adsorción del sodio o (SAR), por sus siglas en inglés, donde se usan las concentraciones de los cationes en millimoles por litro (mmol/L) o millimoles por kilogramos (mmol/Kg).

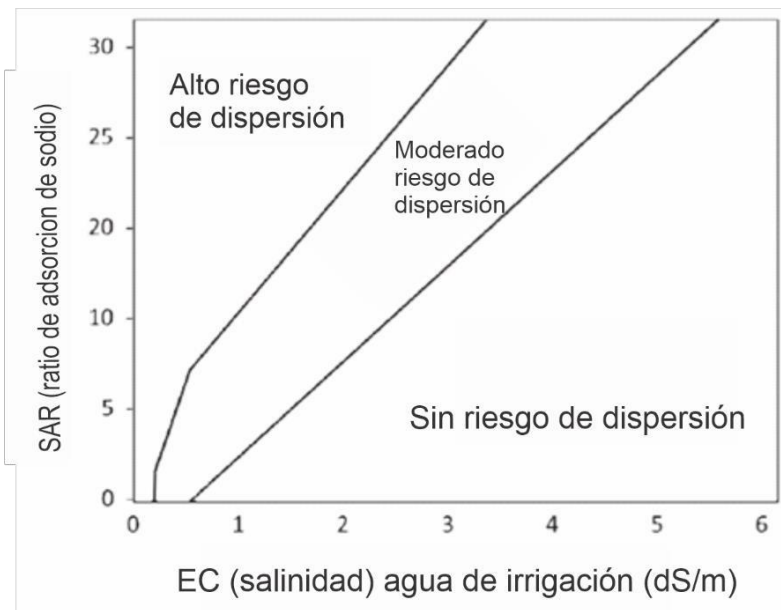
$$SAR = (Na^{+}) / \sqrt{(Ca^{+2}) + (Mg^{+2})}$$

Ecuación de estabilidad de suelo. Tomado de Walworth, J. 2012. Using Gypsum and other Calcium Amendments in SouthWestern Soils. College of Agriculture & Life Sciences. University of Arizona. 5p.

A su vez, para conocer la cantidad de sales en el suelo se usa la medida de conductividad eléctrica (EC). La cual junto al SAR controlan ampliamente la estabilidad de los suelos, siendo óptima una relación de alto EC y bajo SAR (las partículas tienden a estar unidas) (Walworth, 2012).

Figura 15.

Suelo y conductividad de agua de irrigación (EC) y ratio de adsorción de Na.



Nota: Adaptado de Walworth, J. 2012. Using Gypsum and other Calcium Amendments in SouthWestern Soils. College of Agriculture & Life Sciences. University of Arizona. 5p.

Existen dos métodos que pueden ser usados para incrementar el Ca soluble. Uno es solubilizar el Ca que está disponible en el suelo y otro es añadir una fuente complementaria de Ca. Para el caso de este estudio, nos centraremos en el segundo. Hay varias fuentes de calcio, aunque primará la que tenga mejor solubilidad de calcio (yeso) (Walworth, 2012).

Tabla 8.

Condiciones apropiadas para varios aditivos del suelo.

Material	pH del suelo		Comentarios
	<7.0	>7.0	
ácidos	No	Si	Solo efectivo en suelos calcáreos.
Yeso	Si	Si	No cambia el pH del suelo
Cal	Si	No	Eleva el pH del suelo; no es solubles en suelos con pH alto
CaSO ₄	Si	Si	Disuelve más lento que el yeso; no previene grietas de desecación
CaCl ₂	Si	Si	Puede aumentar la salinidad del suelo a niveles inaceptables
Ca (NO ₃) ₂	Si	Si	De usarse como fuente de Ca puede aumentar la salinidad.

Nota. Adaptado de Walworth, J. 2012. Using Gypsum and other Calcium Amendments in SouthWestern Soils. College of Agriculture & Life Sciences. University of Arizona. 5p. la solubilidad como factor importante en cuanto a la liberación de Ca⁺².

Así pues, la aplicación del yeso puede reducir la dispersión y promover la floculación de suelos, tratar problemas de acidez, controlar toxicidad asociada a la presencia iones de Al⁺³, lo que conlleva un aumento en la disponibilidad de macronutrientes como el fósforo (P) y potasio (K),

remediación en suelos sódicos, promueve condiciones para el crecimiento óptimo de las raíces y siendo la fuente de calcio con una mejor relación solubilidad – concentración, así como el aporte de calcio y azufre (Intagri, 2017); el yeso es moderadamente soluble en agua (2.5 g por L) o aproximadamente 200 veces más que la calcita (CaCO_3); esto hace que el calcio presente en el yeso sea mucho más móvil que en la calcita, permitiendo moverse mucho más fácil en el perfil de suelo (Chen & Dick, 2011).

Las deficiencias de calcio en el suelo se asocian a suelos muy ácidos o arenosos, usualmente resultado de estrés por sequías, estas se manifiestan en las especies vegetales, en cuanto a un menor crecimiento de la planta, aparición de clorosis, hojas amarillas y muerte de yemas terminales (Carretero et al., 2003).

El suplemento de calcio y su traslocación dentro de la planta es altamente dependiente de un adecuado y continuo suplemento de agua; sin embargo, si el nivel de Ca en el suelo es inadecuado, (Ca intercambiable menor a 250 a 500 mg/kg, Jones, 2003; Simmons & Kelling, 1987), el Ca suplemental puede mejorar la nutrición en plantas. Para este caso, cualquier material soluble de Ca puede ser. Cal (para suelos ácido) y yeso, son los fertilizantes de Ca ampliamente usados (Walworth, 2012).

Una forma de cuantificar el yeso a aplicar se puede tener en relación con “sodium adsorption ratio (SAR)” o como “exchangeable sodium percentage (ESP)” (estos datos se pueden extraer también de un análisis de suelo) (Walworth, 2012).

Tabla 9.

Yeso requerido en toneladas por acre según la textura del suelo y Na intercambiable.

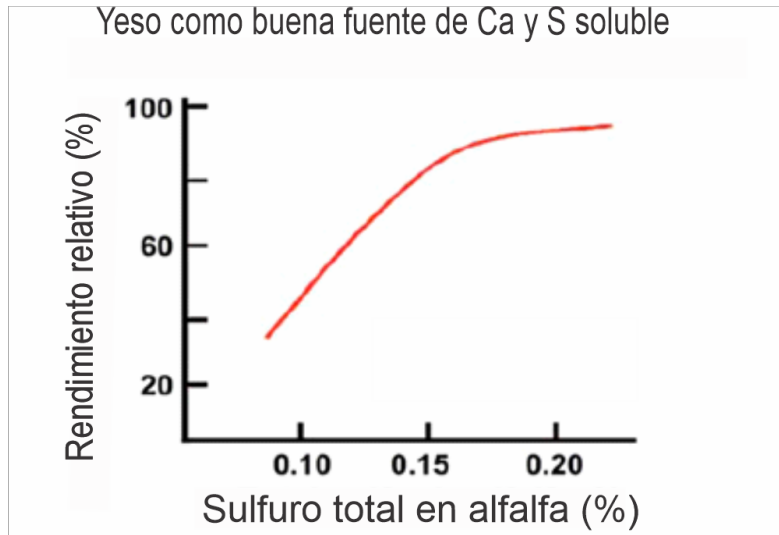
Textura del suelo	Porcentaje de sodio intercambiable					
	10	15	20	30	40	50
	Yeso (toneladas por acre)					
Grueso	1.1	1.7	2.3	3.4	4.6	5.7
Medio	1.9	2.9	3.8	5.7	7.7	9.6
Fino	2.7	4.0	5.4	8.0	10.7	9.6

Nota: Adaptado de Walworth, J. 2012. Using Gypsum and other Calcium Amendments in SouthWestern Soils. College of Agriculture & Life Sciences. University of Arizona. 5p. la solubilidad como factor importante en cuanto a la liberación de Ca^{+2} .

El yeso ha sido una de las primeras formas de fertilizante usada en Estados Unidos, siendo aplicada a los suelos para fines agrícolas, por más de 250 años. Gracias a que el yeso se moviliza lentamente, este mineral provee una liberación continua de azufre al suelo por más de un año de aplicación. Su uso como fertilizante sulfúrico, para estimular la producción de los cultivos en suelos deficientes de azufre, ha sido probado en para muchos cultivos como maíz, soya, canola y alfalfa (Chen & Dick, 2011).

Figura 16.

Yeso como aditivo para mejorar la producción de alfalfa. Excelente fuente de calcio y azufre.



Nota: Adaptado de Chen, L., & Dick, W. (2011). *Gypsum as an Agricultural Amendment. General Use Guidelines*. Ohio: The Ohio State University. 36 p.

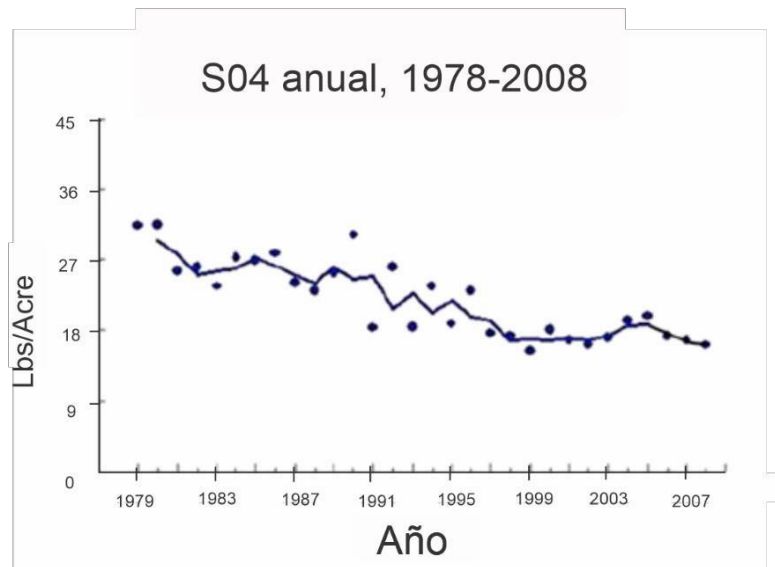
En cuanto al calcio, este se mueve muy lentamente. Es por esto, que debe estar contantemente disponible para las raíces. Adicionar una buena fuente de calcio al suelo, como lo es el yeso, puede mejorar la calidad horticultural de los cultivos (Sumner & Larrimore, 2008; Scott et al., 1993; Shear, 1979). Los cultivos de legumbres y tubérculos parecen especialmente receptivos al calcio. Un ejemplo es el uso del yeso como fertilizante de calcio en cacahuates está ampliamente usado en el sureste de Estados Unidos.

En sistemas naturales el agua de lluvia tiene un aporte significativo de azufre al suelo, aunque en el caso puntual de Ohio para el año 1979 reportado en (Chen & Dick, 2011), tuvo un decrecimiento notable; puede que una disminución en el azufre puede estar asociada con el

uso intensivo de fertilizantes altamente concentrados con poco o nada de S, en sistemas de cultivo intensivos, hacen que en la zona haya mucha más remoción de este elemento.

Figura 17.

Declinación total de sulfatos en Ohio de 1979-2008.



Nota: Adaptado de Chen, L., & Dick, W. (2011). Gypsum as an Agricultural Amendment. General Use Guidelines. Ohio: The Ohio State University. 36 p.

Teniendo en cuenta que para realizar una experiencia agrícola hay una serie de factores que juegan según la meta presupuestada de quién ejecuta la actividad. Industrialmente se utiliza la materia prima mineral junto con otros compuestos, sean químicos (según la norma gubernamental) u orgánicos, para lograr un producto que satisfaga las demandas de esta actividad.

4.3.1. Criterios prácticos. Aditivos para el suelo a base de rocas y minerales.

Las prácticas agrícolas son experiencias sujetas a una gama amplia de factores, condiciones y elementos, que son propios de cada caso en particular; dentro de un conjunto principal, según el objetivo que se busca se pueden abarcar los necesarios para realizar una posible prognosis.

Un diseño de fertilización aplicado a la agricultura debe tener en cuenta aspectos propios de las condiciones tanto del ambiente como del productor, puesto cada decisión se reflejará en una demanda de dinero y tiempo. Con lo cual estas proyecciones estarán sujetas a la oscilación de factores y su posible combinación; abarcando desde fases de planeación, ejecución, conclusión hasta posterior posible repetición-reanudación.

En primer lugar, se deben establecer los alcances económicos y metas a lograr, acoplándose a los requerimientos que devenga, teniendo en cuenta costos de adquisición, movilización, proceso (sea molienda, disolución-irrigación, etc.), el mejoramiento del producto, una mayor eficiencia y eficacia, así como la disponibilidad financiera para cumplir con estas demandas.

Tomando lugar, factores propios del desarrollo a la práctica, es necesario definir los requerimientos del suelo, con el fin de aplicar lo que sea más acertado según el caso, teniendo en cuenta:

Tipo de suelo: Considerando su grado de desarrollo, su composición heredada de su roca madre, sus características texturales, su uniformidad.

Propiedades del suelo: pH (según sea su acidez o alcalinidad), estructura, humedad, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de materia orgánica, transporte de iones, aireación, infiltración, especies iónicas en solución, microorganismos presentes en este.

Materia prima: sea tipo orgánico (restos de procesos animales, ejemplo: gallinaza, insumo utilizado popularmente como abono) o mineral (polvo de roca, minerales, entre otros) o mixto, los elementos a aportar (macronutrientes y micronutrientes), sus formas de aplicación (sea solido en granulometría específica, polvo muy fino disuelto, liquido, en agregado, etc.), dosificaciones y cantidad de material a utilizar (sea en relaciones peso a peso o en volumen).

Especies vegetales: tipo de especies a utilizar, patrón de enraizamiento, tolerancia al pH, tolerancia a toxicidad, demanda de agua y macronutrientes, tiempo de germinación y estadios del desarrollo fisiológico, absorción de nutrientes.

Manejo agrícola: arreglo de plantación, modelo de cultivo (intensivo, por temporada, rotación, policultivo, etc.), prácticas agrícolas (ejemplo: coberturas vegetales), practicas mixtas recuperación-sembrado (Sistemas agroforestales, Sistemas silvopastoriles, etc.) controles biológicos, limpieza del terreno, calidad de agua de riego.

Factores externos: oscilaciones climáticas, configuración del régimen de lluvias, temperatura, cambios estacionales (según la latitud donde se desarrolle), altitud, configuración geológica.

5. Resultados

5.1. Marco geológico regional

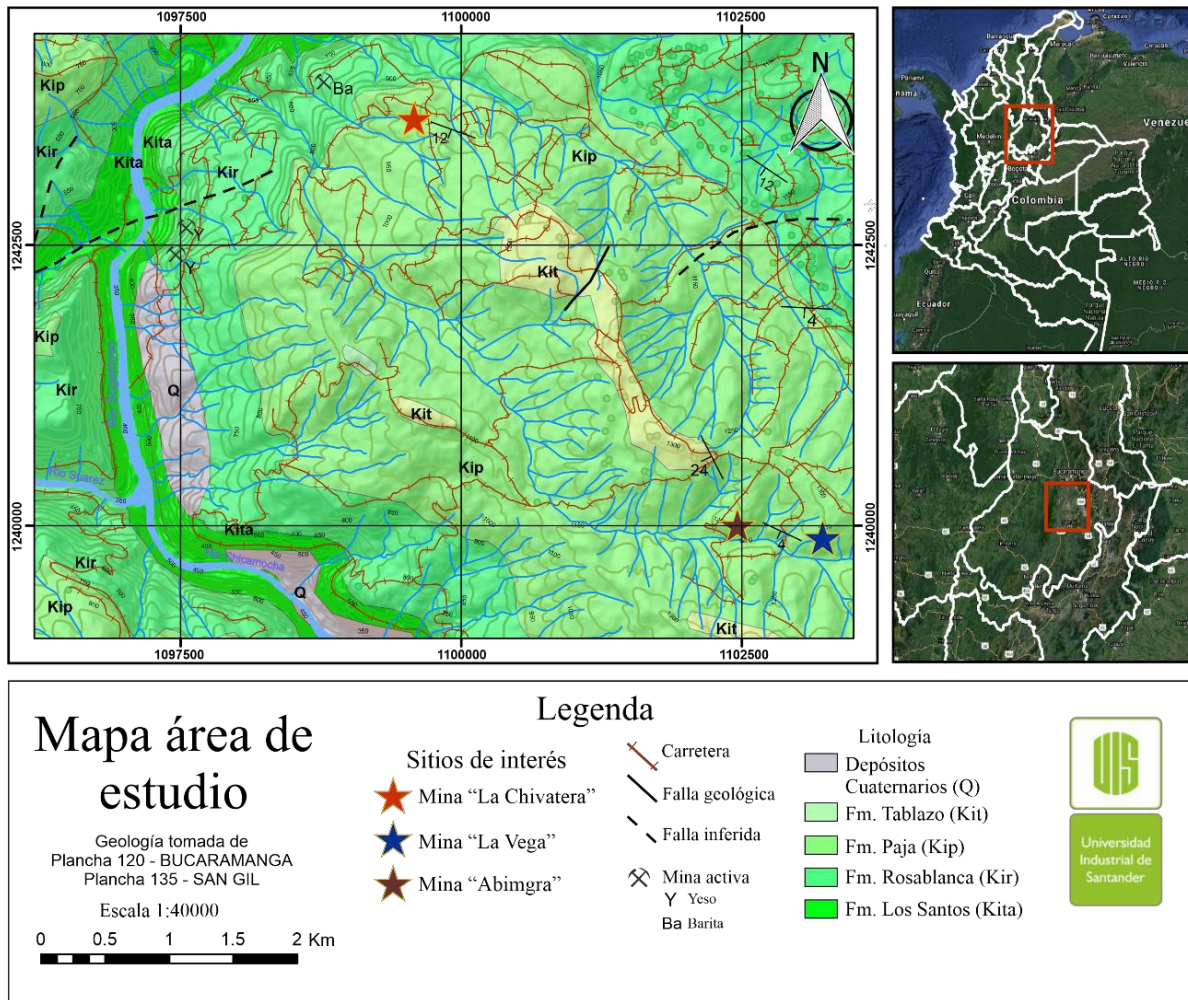
El área de estudio se localiza en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, situándose cerca al Macizo de Santander, específicamente al occidente de la Mesa de Los Santos, hacia el norte del Río Chicamocha y al noreste de su confluencia con el río Suárez para formar el río Sogamoso (ver figura 18), localizándose políticamente en las veredas Regaderos y La Loma, municipio de Los Santos, departamento de Santander. En cuanto a la geomorfología Montana y Suarez, (2000) resaltan una topografía suavemente empinada y muy empinada en las zonas de

escarpe, conformada por mesas y mesetas, formadas por redes de drenajes como el río Sogamoso y las Quebradas La Santera, Chivatera y Las Lajas (Pacheco, 2012).

La Mesa de Los Santos se encuentra limitada por dos sistemas de fallas principales correspondientes a la Falla del Suárez y la Falla de Bucaramanga (Willms, 1982). En un nivel más local, el área de estudio se encuentra limitada por la falla del Suárez al oeste, la falla de Los Santos al este (Díaz y Suárez, 1998) y la falla Los Montes al norte (Díaz et al., 2009). Para el caso de la falla del Suárez, afecta a las Formaciones Jordán, Los Santos, Rosablanca y Paja presentes en el área de estudio (Julivert, 1963). En cuanto a los patrones de diaclasamiento medidos en este trabajo; estos midieron un promedio de 308° a 320° con un buzamiento de 90° , valores que concuerdan con los patrones de diaclasamiento y fallas de SW-NE/NW-SE reportados en el área de Los Santos por Willms, (1990) y se asemejan a los 340° a 360° de azimuth y a los buzamientos entre 80° y 90° reportados en las diaclasas abiertas hacia el norte del miembro superior de la Mesa de Los Santos, por Díaz et al., (2009).

Figura 18.

Mapa geológico del área de estudio. Adaptado y modificado por los autores a partir de las planchas 120 -Bucaramanga y 135 – San Gil.



Nota: Cartografía base tomada de las planchas 120IV-C y 135II-A de los datos de cartografía libre del IGAC, tomado de Consulta de Planchas | GEOPORTAL. (2021). Retrieved 6 February 2021, from <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/consulta-de-planchas>.

5.2. Litoestratigrafía

Estratigráficamente, se presenta una secuencia conformada por unidades del Cretácico Inferior al Cretácico Medio, con buzamiento suave. De base a tope se presenta:

- **Formación Los Santos:** definida por primera vez por (Cediel, 1968) se encuentra suprayacida por la Formación Cumbre e infrayacida por el Grupo Girón. Se encuentra constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojas y cuarzoarenitas con estratificación cruzada en capas tabulares, su espesor en la sección tipo es de 218 metros, según sus facies el ambiente de depósito es interpretado como depósitos fluviales de corrientes trenzadas (Clavijo, 1985).

- **Formación Rosa Blanca:** Se encuentra compuesta por capas de caliza y yeso, con oolitos y ostrácodos en su parte inferior, hacia la zona superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. Su ambiente de formación es marino somero en condiciones neríticas, a excepción de los niveles de sulfatos (yeso y “polihalita”) los cuales fueron depositados en condiciones evaporíticas de poca energía e hipersalinas, presenta en la zona 300 metros de espesor, se encuentra suprayacida por la Formación Paja e infrayacida por la Formación Los Santos (Royero y Clavijo, 2001). Según (Etayo, 1968) su edad corresponde al intervalo Valanginiano - Hauteriviano inferior. (Orejuela, 2006) propone un nivel yesífero, el cual se encuentra incluido hacia la base de la Formación Rosa Blanca con un espesor de 12-20 metros aproximadamente, compuesto por bancos masivos lenticulares de yeso gris con intercalaciones de lutitas, lutitas calcáreas, lutitas arenosas y calizas dolomíticas de grano fino. Costras, relleno de fisuras y capas finas concordantes de yeso fibroso blanco son frecuentes tanto en la Formación Rosa Blanca como en las formaciones en contacto.

- **Formación Paja:** se encuentra constituida por lutitas (las cuales al meteorizarse quedan de color rojizo) y shale fosilíferos con intercalaciones de areniscas de grano fino y de shale gris localmente arenoso, calcáreo e intercalaciones de caliza grises localmente arenosas,

fosilíferas; se estima un ambiente de formación correspondiente a zonas epicontinentales. Se encuentra suprayaciendo la Formación Rosa Blanca, compuesta principalmente con calizas con capas de yeso (las cuales son minadas) e infrayaciendo la Formación Tablazo, compuesta por intercalación de areniscas y calizas fosilíferas (Vargas, 2008). La presencia de los niveles evaporíticos de yeso y las concreciones fosilíferas, así como las relaciones e intercalaciones litológicas, se asocian a un ambiente marino somero, cercano a la línea de costa con restricciones de flujo al mar abierto. Su edad está datada para Barremiano inferior al Aptiano inferior (Royero y Clavijo, 2001). Autores como Gonzalez y Espinosa, (2012), reportan la presencia de niveles yesíferos en forma de laminillas gruesas presentes en el miembro inferior de la Formación Paja, así como reportan el hallazgo de sales de potasio de la variedad singenita que se encuentran en una red de laminillas (de hasta 1 mm) dentro de los shales y se disponen de forma paralela a subparalela a la dirección de estratificación. La secuencia de la Formación Paja aflorante en la Mesa de Los Santos es la de interés en el presente estudio, cuya columna estratigráfica para el miembro inferior se describe a continuación.

5.3. Ocurrencia de campo de depósitos evaporíticos

La Figura 19 ilustra la columna estratigráfica de la Formación Paja levantada en la mina La Chivatera, situándose al occidente del municipio de Los Santos, vereda Regaderos. La secuencia sedimentaria aflorante de esta unidad geológica consta de base a techo por una intercalación de sets de lodolita – lodolita shale pardas abigarradas con geometría tabular con niveles interestratificados de laminillas evaporíticas concordantes a la estratificación de hasta 1 mm y, algunas de estas, con geometría lenticular, llegando hasta los 8 mm, con capas de lodolitas

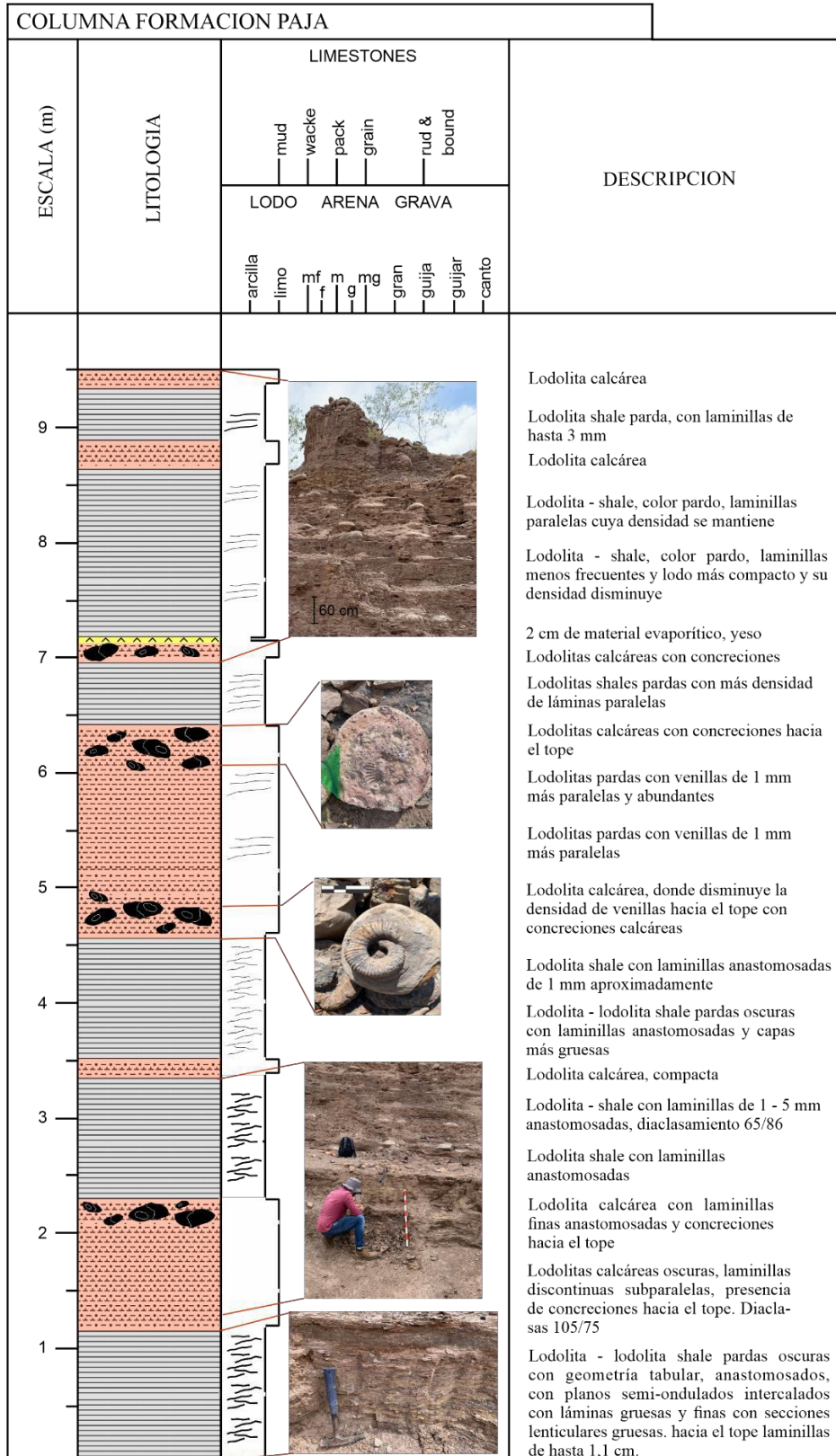
USO AGRICOLA POTENCIAL ROCAS EVAPORITICAS

78

calcáreas oscuras con concreciones calcáreas fosilíferas (eg, amonitas), continuando la intercalación de dicha secuencia hasta llegar el tope, donde la densidad de dichas laminillas disminuye, pasando a ser paralelas y con lentes alcanzando hasta los 3 mm.

Figura 19.

Columna estratigráfica de la sección de la formación Paja aflorante en la mina "La Chivatera"











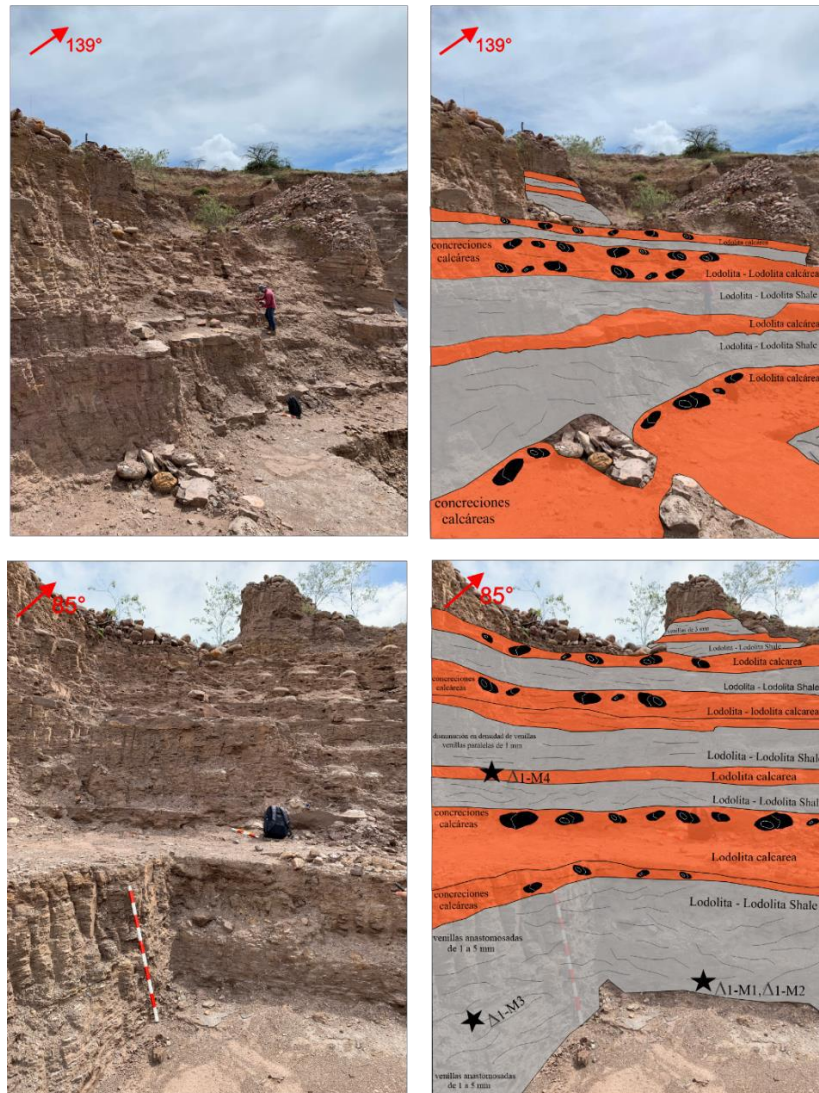
Tipos de Roca		Estructuras	
	Láminas gruesas de yeso (hasta 8 mm)		Concreciones Calcáreas
	Lodolita Calcareá		Láminas paralelas evaporíticas de hasta 3 mm
	Lodolita		Láminas anastomosadas evaporíticas de hasta 1 mm
	Lodolita Shale		Láminas anastomosadas evaporíticas de hasta 5 mm

Figura 20.

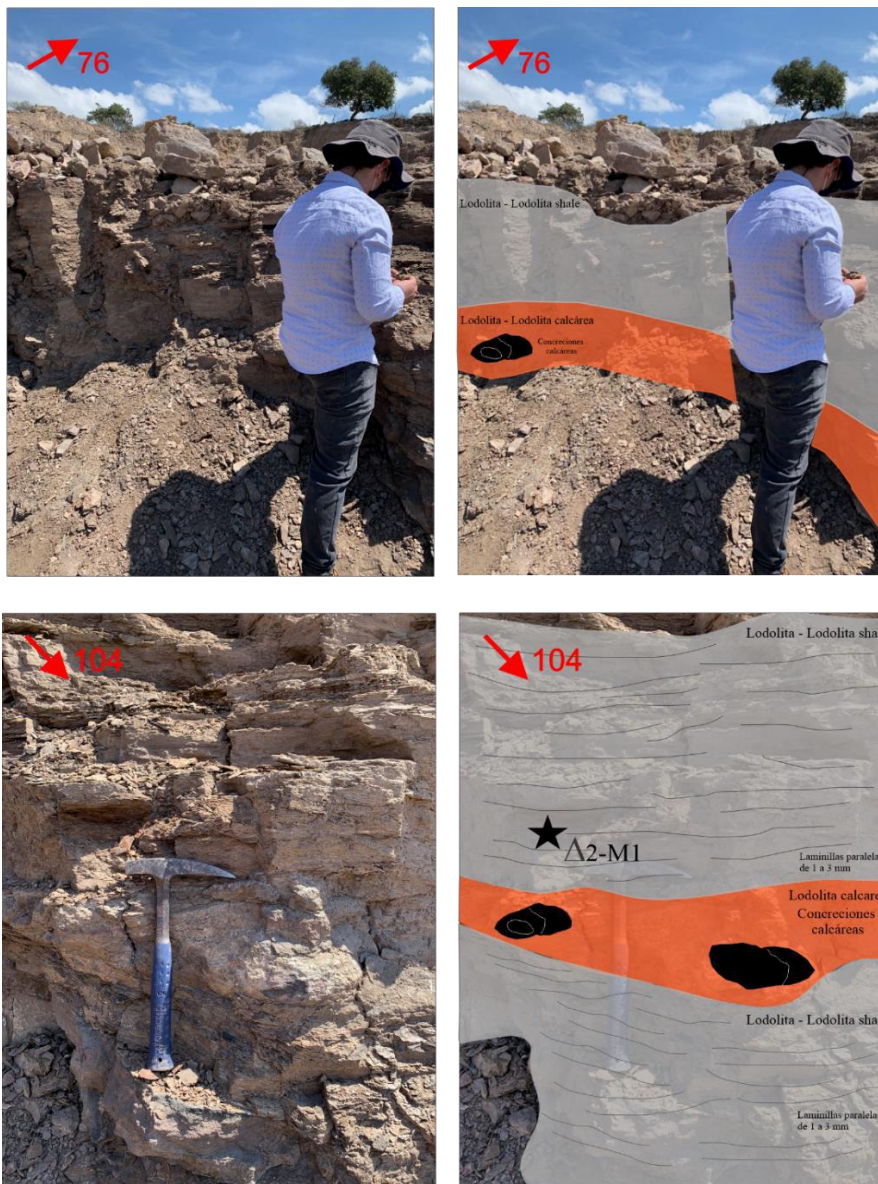
Vista general y frontal de la sección aflorante de la Formación Paja en la Mina La Chivatera.



Nota: Se observan la intercalación de niveles de lodolita – Lodolita Shale y lodolita calcárea con concreciones, también se representa la diferencia en la disposición de las laminillas de base a tope, así como el sitio donde se extrajeron las muestras para su descripción y análisis.

Figura 21.

Afloramiento en vista general y frontal en la mina La Vega.

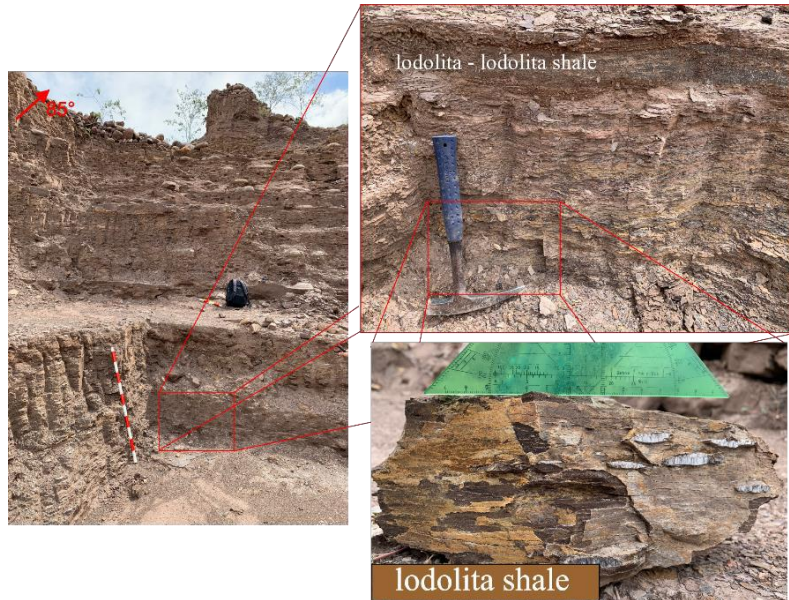


Nota: Se observa la misma secuencia y sucesión de lodolita – lodolita shale y lodolitas calcáreas con concreciones calcáreas, vistas en la mina La Chivatera. Se evidencia claramente el contacto entre las capas de lodolitas Shale y las lodolitas calcáreas con concreciones, así como una representación esquemática de la disposición de las laminillas y el punto de toma de muestra.

A nivel de afloramiento, los niveles de la Formación Paja se encuentran bien expuestos en ambos sitios (mina La Chivatera y La Vega), presentan poca cobertura vegetal y son de pendiente pronunciada debido a que son frentes de explotación (minería artesanal). En general en los afloramientos predominan las tonalidades pardas, cafés y rojizas a abigarradas, las bocaminas tienen aproximadamente 10 m de altura. Los estratos presentan un rumbo y buzamiento constantes de alrededor de 110/11 para la mina La Chivatera y 115/4 para la mina La Vega, con capas medias a gruesas (Mckee & Weir, 1953), las cuales constan de una sucesión de lodolitas – lodolitas shale más fisiles y con mayor densidad de laminillas de material evaporítico y lodolitas – lodolitas calcáreas mucho más compactas y en muchos casos con concreciones calcáreas de hasta 50 cm, donde las laminillas desaparecen o llegan a una concentración mínima (ver figuras 20 y 21), presentando restos de amonitas en varias de ellas. El contacto entre las capas es neto y plano, con una geometría tabular. Un aspecto destacable es que hacia las secciones de lodolitas - lodolitas shale de la base del afloramiento de la Mina La Chivatera (ver figura 20), hay mayor densidad de laminillas y estas tienden a disponerse de forma ondulada - anastomosada y abarcando espesores hasta de 8 mm por parte de los lentes evaporíticos.

Figura 22.

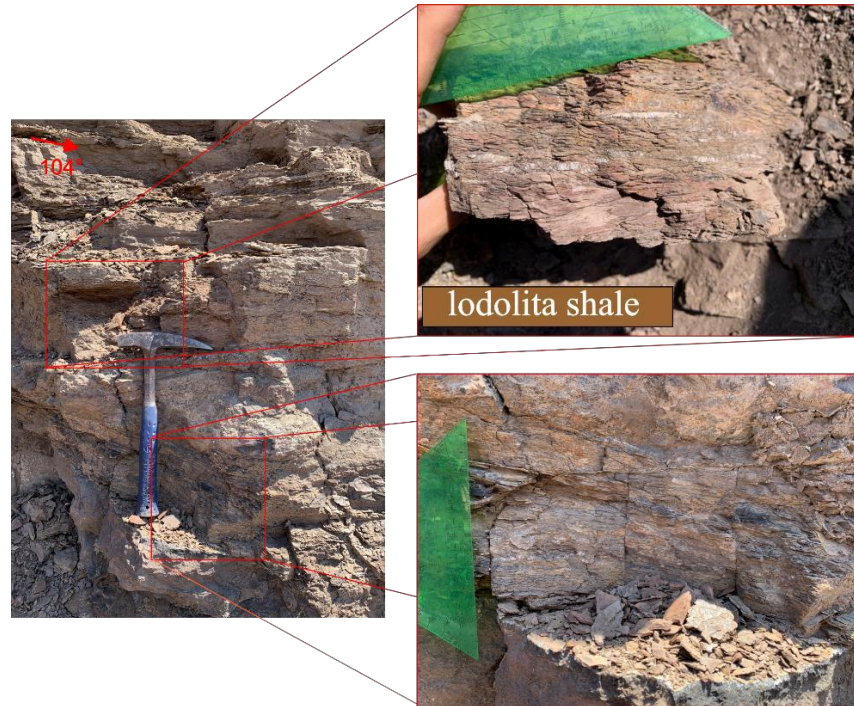
Acercamiento a las capas de lodolita shale del afloramiento de la mina La Chivatera.



Nota: También se señala la sección donde se extrajo la muestra de mano para su documentación y análisis.

Figura 23.

Acercamiento del afloramiento de la mina La Vega.

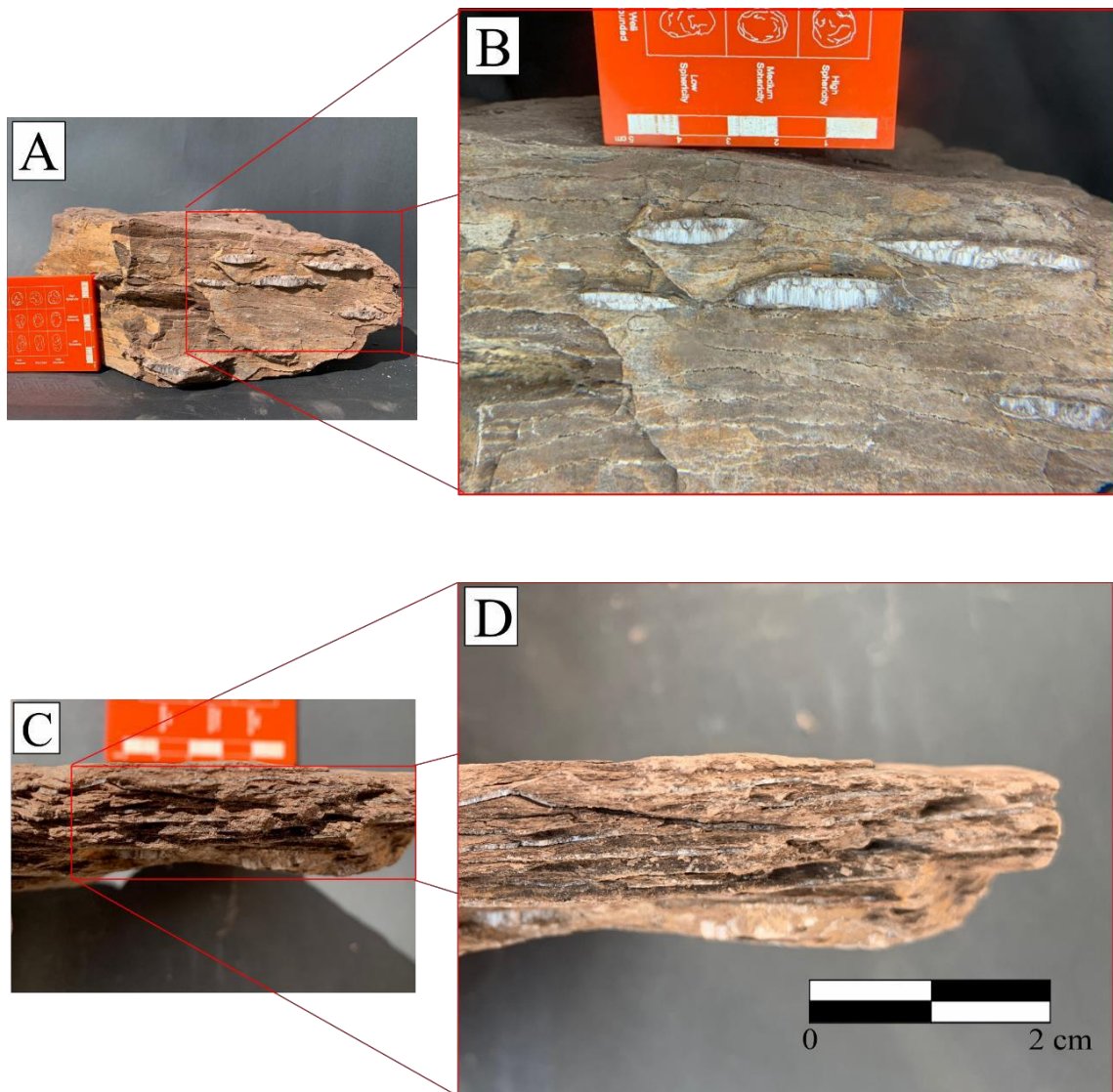


Nota: Se puede observar a detalle la capa de lodolita shale y su contacto con la capa de lodolita calcárea con concreciones, así como la muestra de mano extraída para su documentación y análisis.

5.3.1 Rasgos a escala macroscópica

Figura 24.

Muestras de roca más lentes evaporíticos de hasta 8 mm (A y B) y de la roca más laminillas evaporíticas de 1mm (C y D).



Nota: Se pueden visualizar los lentes y laminillas de material evaporítico: A). roca más lentes evaporíticas dispuestas en sentido de la estratificación de 3 a 8 mm. B) Acercamiento de los lentes evaporíticos. C). roca más laminillas evaporíticas de 1 mm dispuestas en sentido de la

estratificación y anastomosadas a subparalelas. D) . Acercamiento de las laminillas evaporíticas de dispuestas en el sentido de la sedimentación y subparalelas.

Las muestras tomadas tanto en la mina La Chivatera como en la mina la Vega, presentan una coloración parda – marrón con tonalidades más rojizas atribuidas a óxidos de hierro. El tamaño de grano más abundante es lodo (< 0.01 mm), (Wentworth, 1922). Las rocas presentan un armazón de lodo y por tanto son lodosoportadas (Cruz y Caballero, 2007), al estar conformadas por tamaño lodo no se puede observar a nivel macroscópico la esfericidad y redondez de los clastos o el nivel de calibración de los mismos o los contactos entre ellos, aun así, es probable que estos sean cóncavo - convexos debido al grado de compactación (Cruz y Caballero, 2007), las rocas son moderadamente friables y fisiles pues tienden a partirse en láminas (esto provocado también por las láminas de material evaporítico). La fábrica de las rocas estaría conformada por: armazón de lodo (90%), matriz (0%), cemento (8%), porosidad (2%). En cuanto al cemento, este estaría conformado por óxidos de hierro y las láminas de material evaporíticos que se encuentran dentro de las rocas. Con base en el análisis textural, las rocas sedimentarias con presencia de laminillas evaporíticas corresponden a **lodolita** (Folk, 1974).

A nivel composicional, no se puede saber con claridad, al ser el tamaño de grano lodo, por la coloración rojiza – anaranjada se puede deducir la presencia de óxido de hierro y por la dureza del material menor a 6,5 en la escala de Mohs, por lo que se descarta la presencia abundante de cuarzo, por lo que la roca estaría conformada por aluminosilicatos asociados a las arcillas. Como se observa en la figura 24 C y D, la muestra tomada a la base del afloramiento corresponde a una **lodolita shale**, donde se observan laminas muy finas (de 1 a 3 mm), según Campbell, (1967),

dispuestas de forma onduladas no paralelas y continuas, llegando a presentar en ciertas partes lentes acuñados de material evaporítico (figura 24 A y B) que llegan hasta los 8 mm.

Las laminillas evaporíticas se disponen siguiendo la laminación de la roca, presentan una geometría lenticular y tabular-lenticular (ver figura 24 A y B). Las laminillas lenticulares presentan espesores entre 3 y 8 mm, mientras que las laminillas de geometría tabular-lenticular son de aproximadamente 1 mm (ver figura 24 C y D). Como se puede ver en dicha figura, los lentes y láminas más gruesas presentan un color blanco, hábito fibroso, brillo sedoso a vítreo y se pueden rayar con la uña (dureza de 2 en la escala de Mohs), siendo definidos en este trabajo como yeso, lo cual concuerda con autores como Gonzalez y Espinosa, (2012) y Vargas, (2008). Por su parte, la red de laminillas presentes en una de las muestras (ver figura 24, C y D) con espesores de 1 mm, que se dispone de forma paralela a subparalela con la dirección de estratificación, como se menciona antes, tienen tonalidades un poco más oscuras e incoloras, con brillo vítreo a sedoso, las cuales tienen un hábito tabular a fibroso y también son definidas en este trabajo como yeso. Sin embargo, autores como Gonzalez y Espinosa, (2012) y Royero y Clavijo, (2001) las definen como sales de potasio.

5.4 Caracterización por SEM/EDS, DRX/XRF y FTIR/ATR

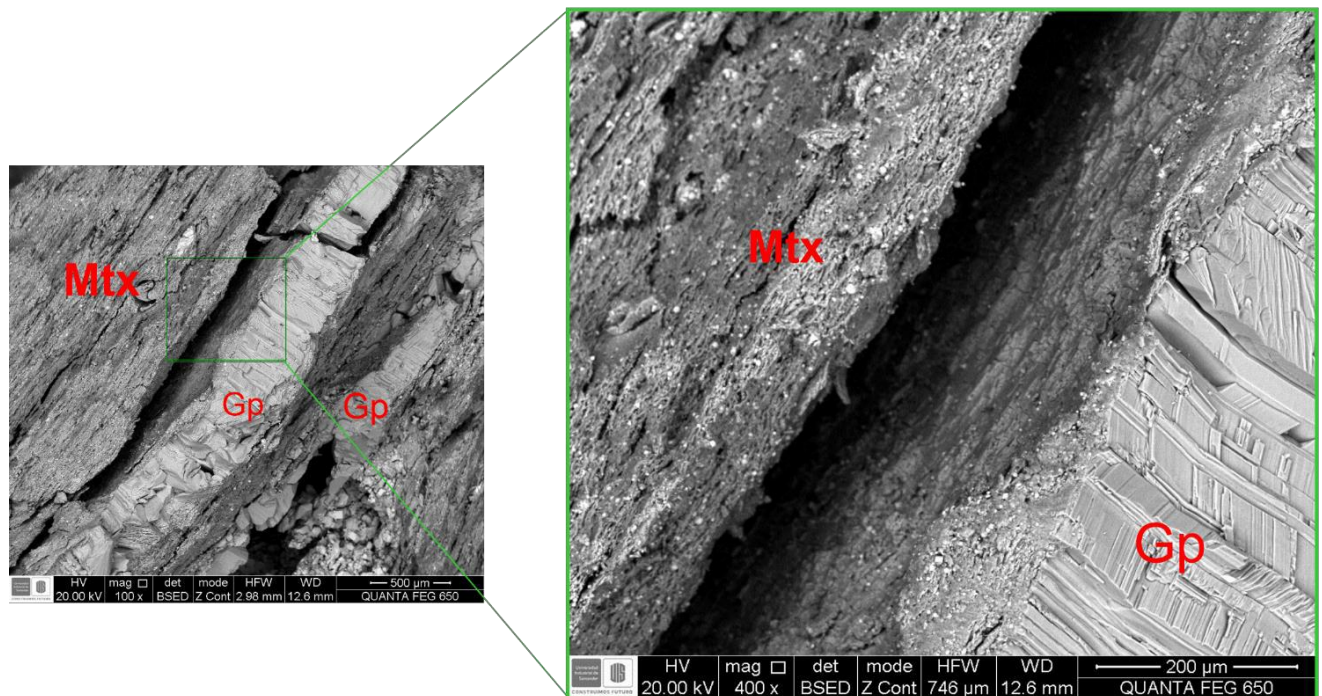
5.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDS)

Los análisis de SEM/EDS se hicieron para dos muestras tanto en la mina La Chivatera, como en la mina La Vega. En cuanto a la primera mina, se efectuaron análisis sobre la muestra que contiene los lentes más gruesos (ver figura 24 B) definidos macroscópicamente como yeso en

este trabajo, a su vez como en (Gonzalez y Espinosa, (2012); Vargas, (2008)) y sobre la muestra que contiene fracción de la matriz de lodolita shale y laminillas evaporíticas también definidas macroscópicamente como yeso. Los resultados del análisis SEM/EDS, identifican claramente los picos de calcio (Ca), azufre (S) y oxígeno (O) en la primera muestra, correlacionándose química y morfológicamente con la especie mineral yeso (Barthelmy, 2014) (ver Tabla 10); resultados también reportados por los análisis macroscópicos. En cuanto a la matriz de roca, presenta picos de aluminio (Al), silicio (Si), oxígeno (O) y otros picos menores de potasio (K), magnesio (Mg) y hierro (Fe), que se atribuyen a un aluminosilicato del grupo de la illita (Barthelmy, 2014), lo cual se correlaciona geológica, química y morfológicamente con la roca presente en el área de estudio (ver Tabla 10). En cuanto a la segunda muestra, se observa un pico de calcio (Ca) y picos menores de silicio (Si), oxígeno (O) y magnesio (Mg), por lo que se descarta la presencia de sulfatos y confirma la presencia de carbonatos como la calcita, rica en magnesio mezclada con matriz (Barthelmy, 2014) (Mejía, 2018) (ver tabla 10).

Figura 25.

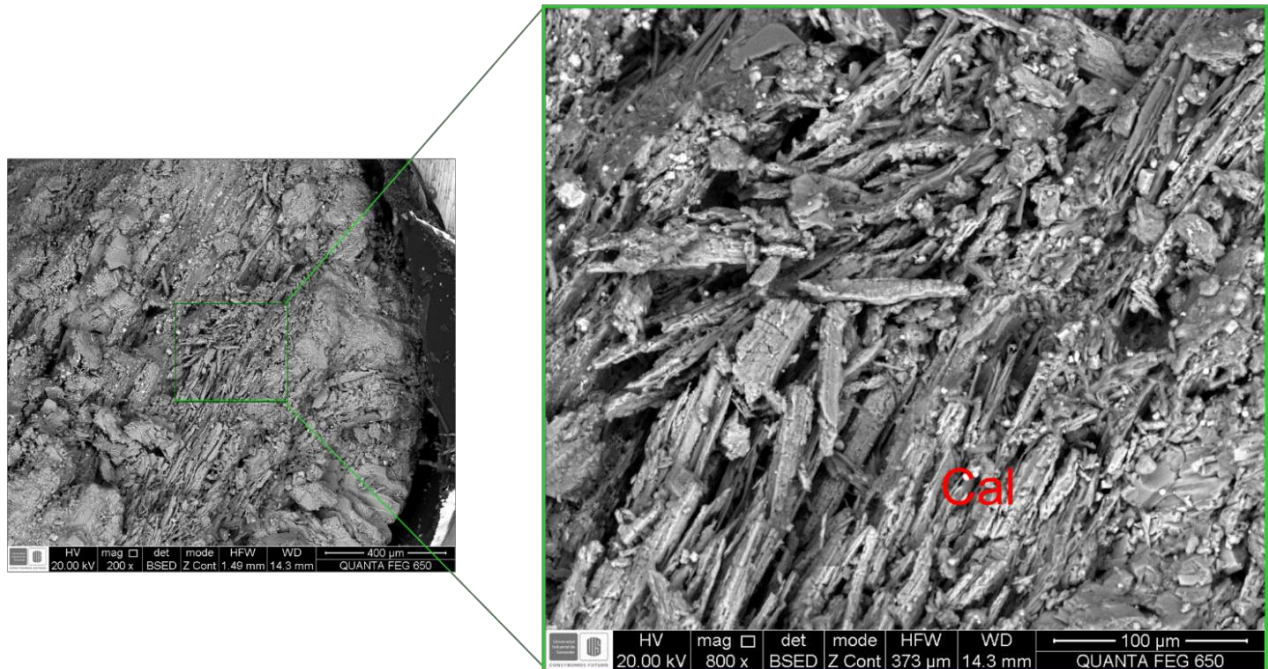
Acercamiento muestra 1 de lentes de yeso y lodolita shale, Mina La Chivatera.



Nota: En la imagen aumentada, se observa la diferencia entre las texturas y tonalidades de gris entre los lentes de yeso y la roca encajante. Gp: yeso y Mtx: matriz de roca. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 26.

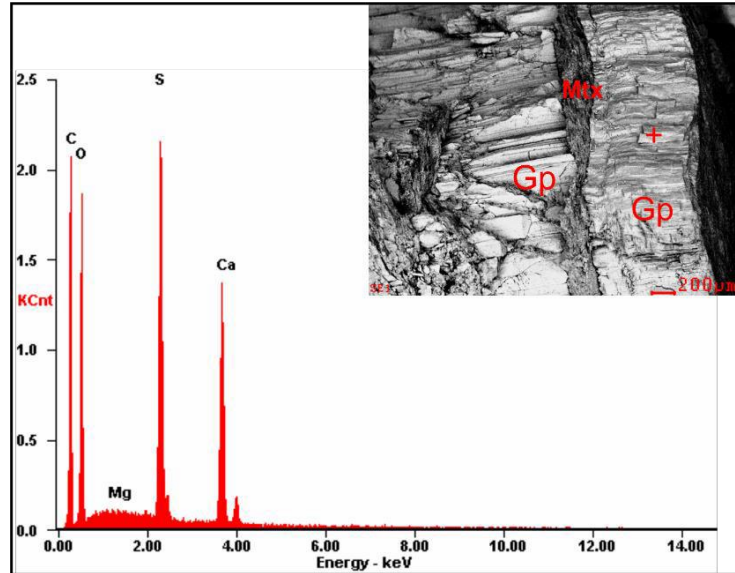
Acercamiento muestra 2 lodolita shale más minerales carbonatados, Mina La Chivatera.



Nota: En la imagen aumentada, se observa la diferencia entre las texturas y tonalidades de gris entre los fragmentos de carbonatos más matriz y la roca encajante hacia los extremos. Cal: calcita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 27.

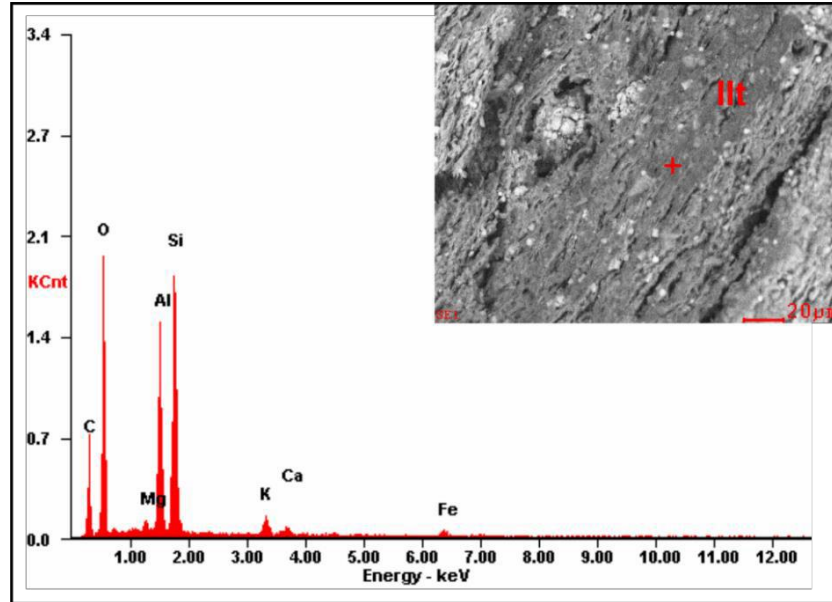
Espectro EDS de los lentes de yeso de la primera muestra (Chivatera).



Nota: Se observan los picos predominantes de azufre (S), calcio (Ca), oxígeno (O) y un pico mucho menor de magnesio (Mg). Sin embargo, no se observa ningún pico de potasio (K) por lo que se descartan posibles sulfatos como singenita, polihalita o langbeinita. Gp: yeso y Mtx: matriz de roca. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 28.

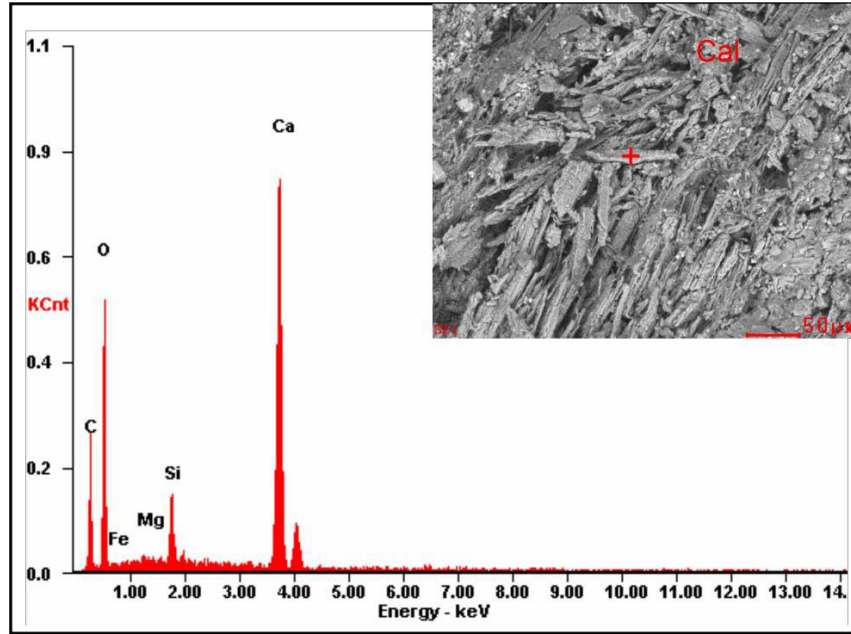
Espectro EDS en roca lodolita shale primera muestra (Chivatera).



Nota: Se observan los picos predominantes de Aluminio (Al), Silicio (Si), oxígeno (O) y picos mucho menores de magnesio (Mg), potasio (K), calcio (Ca) y hierro (Fe). Los picos más altos de silicio y aluminio indicarían afinidad hacia los aluminosilicatos, específicamente hacia la illita. Gp: yeso e Ill: illita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 29.

Espectro EDS de minerales carbonatados, de la segunda muestra (Chivatera).



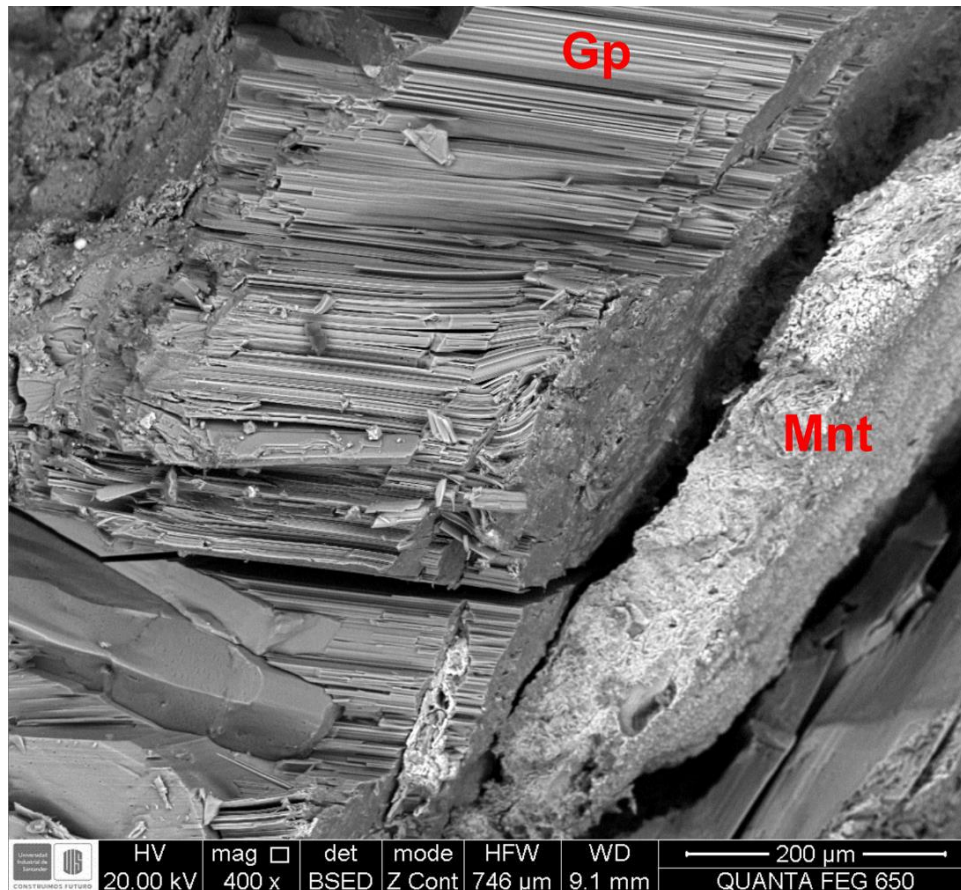
Nota: Se observa el pico predominante de calcio (Ca) y oxígeno (O) y picos menores de silicio (Si), magnesio (Mg) y hierro (Fe). Textural y químicamente, se asemeja más hacia minerales carbonatados, conformados posiblemente por calcita rica en magnesio. El contenido de sílice se asocia a los fragmentos de la roca presentes. Cal: calcita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

En cuanto la mina La Vega, se efectuaron análisis sobre las laminillas evaporíticas de 1 mm más matriz, definidas macroscópicamente en este trabajo como yeso, aunque definidas como sales de potasio en (Gonzalez y Espinosa, (2012); Royero y Clavijo, (2001)) (ver figura 24 D). En La primera muestra (ver figura 30), los resultados de SEM/EDS muestran picos de calcio (Ca), azufre (S) y oxígeno (O), los cuales indican tanto morfológica como químicamente al yeso como componente de dichas laminillas (Barthelmy, 2014) (ver figura 32 y Tabla 10). En cuanto al

material correspondiente a la matriz de roca, este presenta picos de oxígeno (O), aluminio (Al), silicio (Si), así como picos menores de calcio (Ca), sodio (Na), hierro (Fe) y potasio (K), correspondientes con aluminosilicatos del grupo de las arcillas como la montmorillonita y la caolinita (Barthelmy, 2014) (ver figura 30, 33 y Tabla 10). En la segunda muestra, (ver figura 31) los resultados de SEM/EDS indican nuevamente picos en azufre (S), calcio (Ca) y oxígeno (O) en aquellos minerales cuyas tonalidades y texturas se asemejan a las de los sulfatos, descartando picos de K que se puedan asociar con sales de potasio (ver figuras 36 y 37). En la muestra también se observan cambios en tonalidades, texturas y tamaños, así como picos dominantes de Silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) y picos menores de sodio (Na), azufre (S), hierro (Fe) y potasio (K), asociadas a aluminosilicatos del grupo de las arcillas, que hacen parte de la matriz de la roca, tales como illita, caolinita y montmorillonita (ver figura 34, 35 y Tabla 10).

Figura 30.

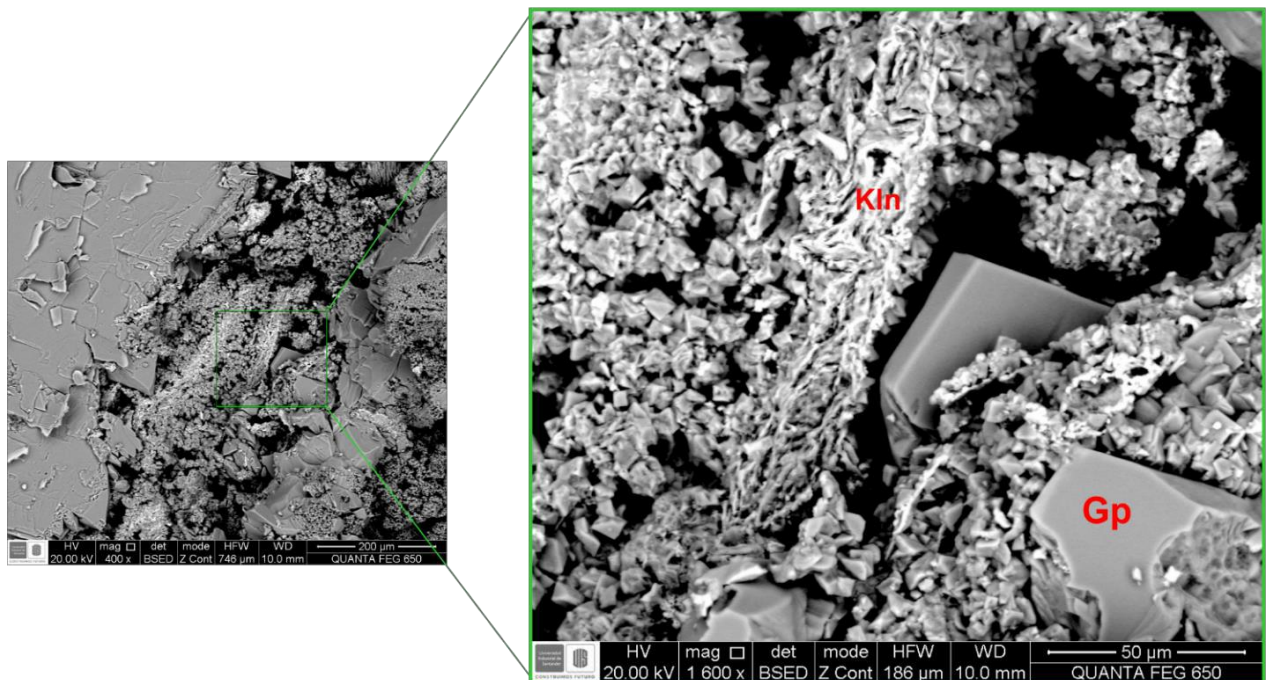
Acercamiento primera muestra láminas de yeso más lodolita shale, óxidos de hierro y matriz de la roca, Mina La Vega.



Nota: En la imagen aumentada, se observa la diferencia entre las texturas y tonalidades de gris entre los lentes de yeso y la roca encajante, así como el aumento del hierro, expresado en las tonalidades más claras. Gp: yeso y Mnt: montmorillonita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 31.

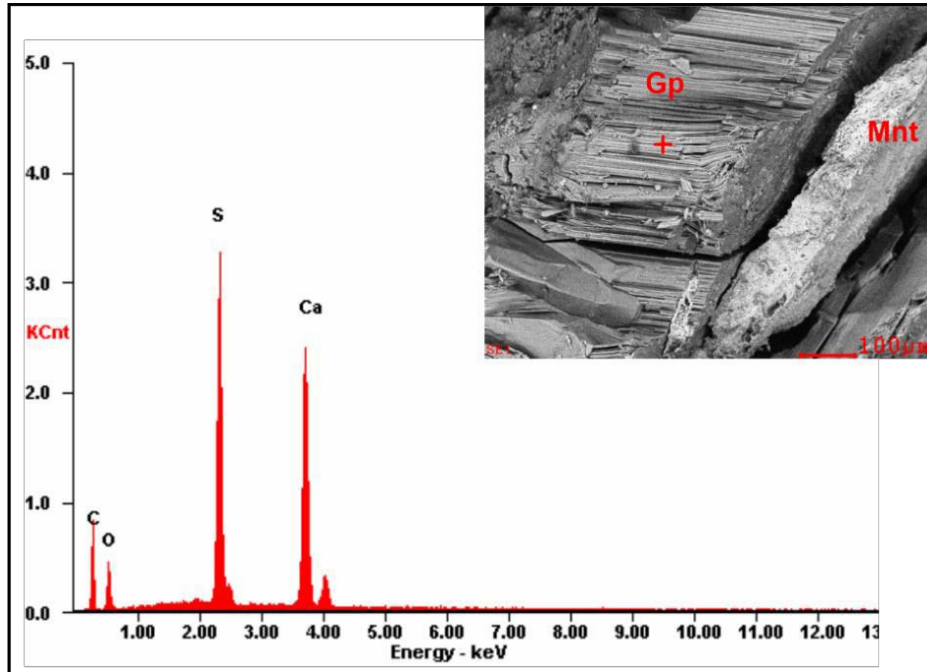
Acercamiento segunda muestra, láminas de yeso, matriz de roca y minerales del grupo de la arcilla, Mina La Vega.



Nota: En la imagen aumentada, se observan las diferentes texturas y tonalidades de gris entre los sulfatos, matriz de roca, fragmentos de yeso y minerales del grupo de la arcilla. Gp: yeso y Ktn: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 32.

Espectro EDS de lámina de yeso. primera muestra (La Vega).



Nota: Se observan picos predominantes de azufre (S), calcio (Ca) y un pico menor de oxígeno (O).

Se descarta la presencia de polihalita, singenita y otros minerales evaporíticos ricos en potasio.

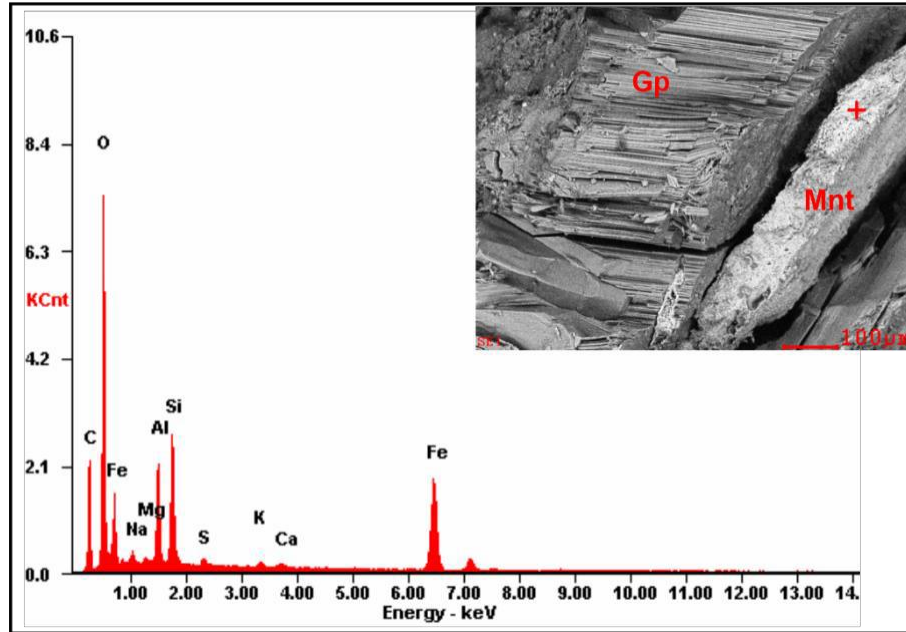
Gp: yeso y Mnt: montmorillonita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010).

Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187.

10.2138/am.2010.3371.

Figura 33.

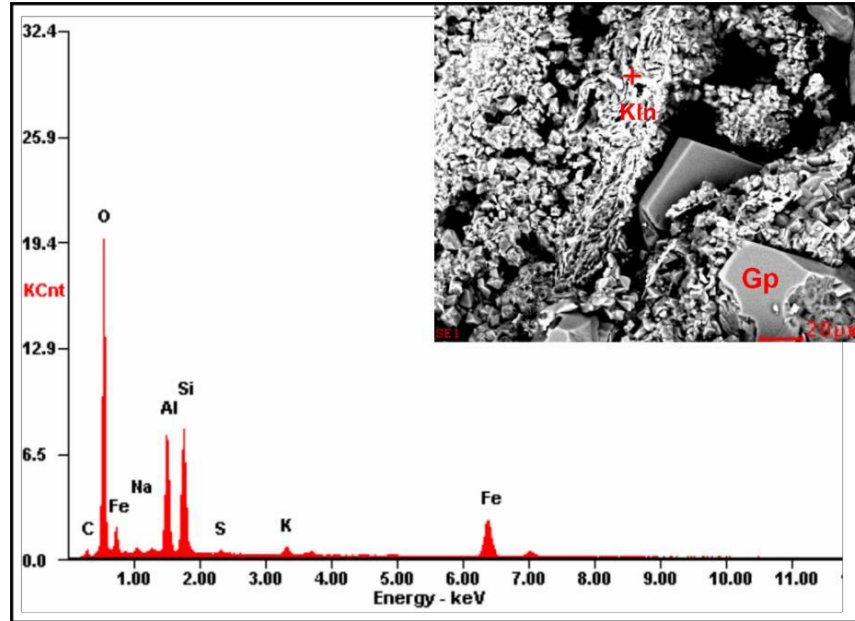
Espectro EDS de un fragmento de roca compuesto de minerales del grupo de la arcilla, primera muestra (La Vega).



Nota: Se observan picos de oxígeno (O), silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe) y picos menores de magnesio (Mg), sodio (Na), azufre (S), potasio (K) y calcio (Ca). Los altos contenidos de silicio, aluminio y hierro se pueden asociar a aluminosilicatos del grupo de las arcillas, más específicamente de la montmorillonita por su contenido de hierro y otros minerales como sodio. Gp: yeso y Mnt: montmorillonita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 34.

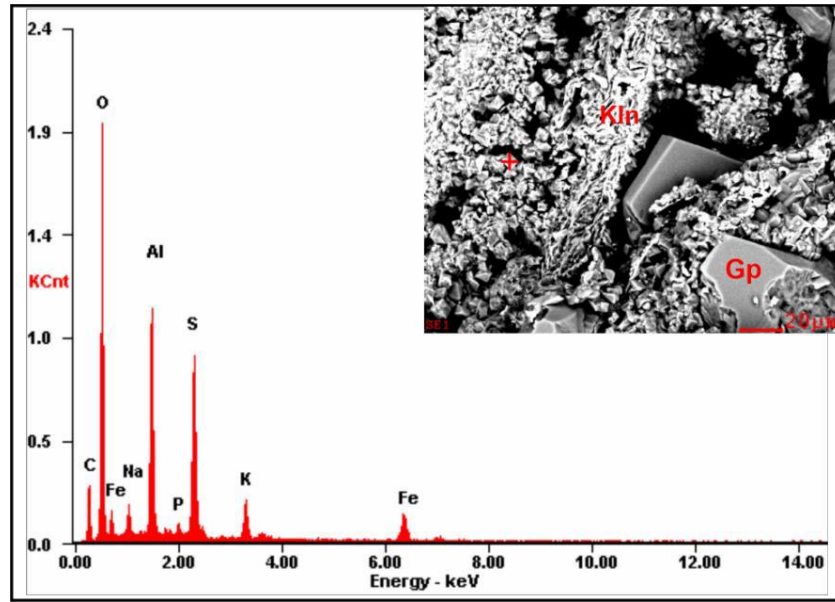
Espectro EDS de fragmento de roca, matriz, segunda muestra (La Vega).



Nota: Se observan picos de Silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) y picos menores de hierro (Fe), Sodio (Na), potasio (K) y azufre (S). Debido a la composición, el pico de hierro y la ausencia de illita, el mineral podría corresponder a aluminosilicatos del grupo de la caolinita. Gp: yeso y Kln: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 35.

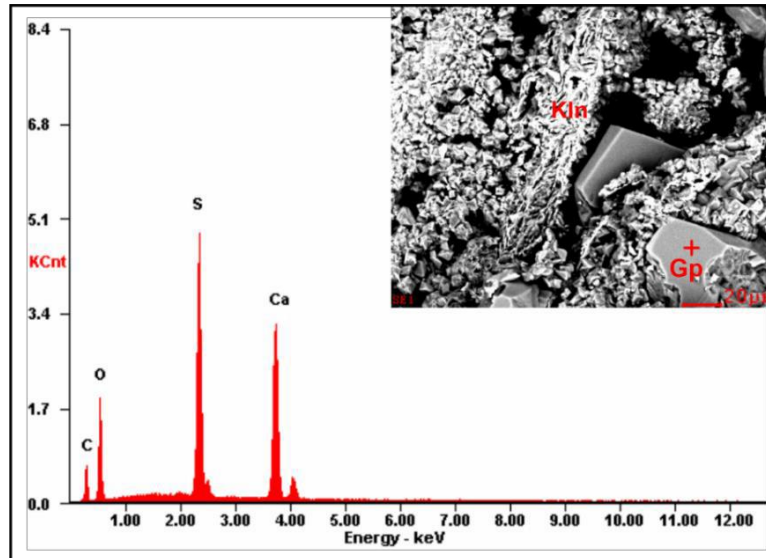
Espectro EDS fragmento de matriz de roca más fragmentos de yeso, segunda muestra (La Vega).



Nota: Se observan picos de oxígeno (O), aluminio (Al), azufre (S) y picos menores de potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe) y fósforo (P). Estos picos indican una mezcla de sulfatos con fragmentos de la roca caja, lo cual forma una especie de matriz con predominio de aluminosilicatos del grupo de las arcillas y por ende se tendría una composición tan variada. Gp: yeso y Kln: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 36.

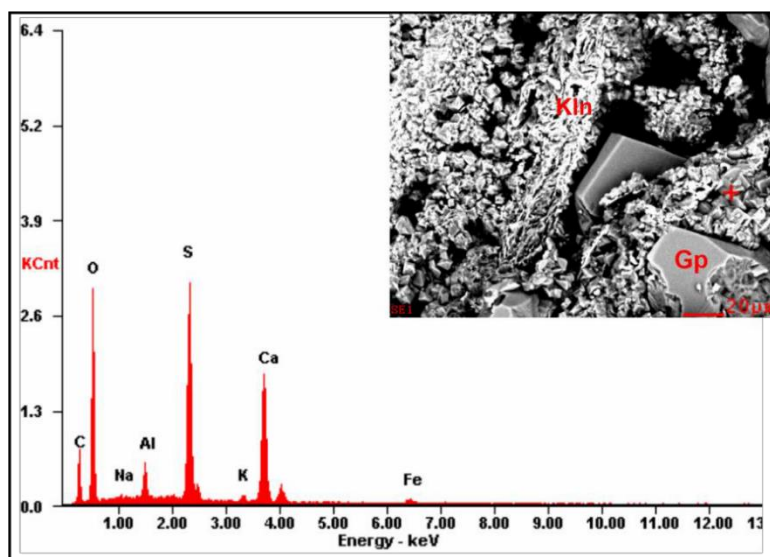
Espectro EDS de un sulfato correspondiente a yeso, segunda muestra (La Vega).



Nota: Se observa picos de azufre (S), calcio (Ca) y oxígeno (O), lo cual indica afinidad por sulfato de tipo yeso y descarta nuevamente la presencia de otros sulfatos ricos en potasio. Gp: yeso y Kln: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Figura 37.

Espectro EDS de un fragmento de sulfato mezclado con matriz de roca, segunda muestra (La Vega).



Nota: Se observan picos de azufre (S), calcio (Ca), oxígeno (O) y picos menores de aluminio (Al), hierro (Fe), sodio (Na) y potasio (K). Dicha composición se asocia a fragmentos de los yesos circundantes mezclados con fragmentos de roca caja, pasando a conformar la matriz. Gp: yeso y Kln: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Tabla 10.

Composición molecular Wt% de fases minerales de las muestras de la Mina la Chivatera y Mina la Vega.

Elemento	Mina La Chivatera			Mina La Vega		
	Gp	Ilt	Cal	Gp	Mnt	Kln
	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
Ca	17.59	-	30.98	21.34	00.37	-
S	15.51	-	-	18.56	-	-
O	30.09	39.74	46.74	37.26	42.29	47.48
Si	-	17.40	03.35	-	09.86	15.65
Mg	-	00.75	00.37	-	-	-
Fe	-	01.67	03.35	-	13.49	-
Al	-	11.28	-	-	09.17	13.33
K	-	01.6	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	00.59	-

Nota: Gp: yeso, Ilt: illita, Cal: calcita, Mnt: montmorillonita, Kln: caolinita. Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

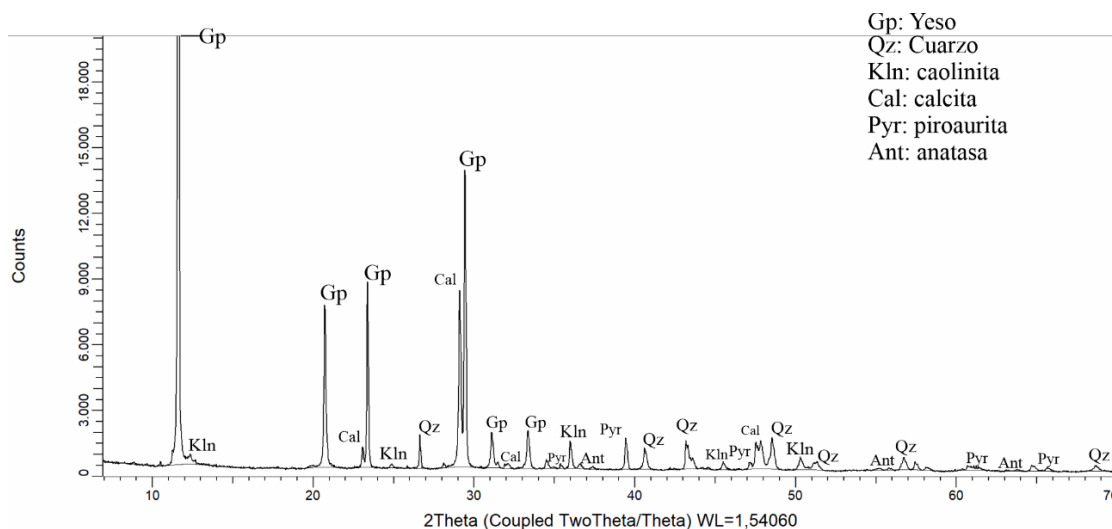
5.4.2. Difracción de rayos X (DRX) y Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)

Para la muestra de laminillas de yeso más matriz de roca, se observan ciertos picos en el difractograma del DRX (ver figura 38) los cuales se analizaron y compararon con bases de datos, otros estudios y difractogramas de DRX como los de (Xamtec, (s.f); University of Arizona, (2005); Rojas y Barraza, (2009); Cabadas et al., (2016)), los cuales indican la presencia de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuarzo (SiO_2) y calcita (CaCO_3), (ver tabla 11). Para el caso de los picos identificados de yeso y cuarzo, estos se asemejan a los difractogramas de yeso colombiano contaminado con cuarzo, indicados en Tobón y Montoya, (2006), concordando con los resultados de SEM/EDS donde las láminas evaporíticas corresponden a yeso y algunas de ellas se encuentran fragmentadas y mezcladas con cuarzo, hierro, magnesio y otros aluminosilicatos de la matriz como la caolinita, cuyos picos menores detectados coinciden con los de Rojas y Barraza, (2009), (ver figura 38). Por su parte, los picos de calcita del difractograma, así como los cristales de calcita identificados en el SEM/EDS, donde hay ciertas zonas con picos mayores de calcio y menores de hierro y magnesio, pero ausencia de azufre (ver figura 29) confirmando la presencia de calcita mezclada con fragmentos de matriz y afectada por la meteorización que está en contacto con las laminillas de yeso; respaldándose por el análisis XRF, donde se destaca la fracción calcio (Ca) como la más abundante, al tener una concentración de 48,58% (ver tabla 12). Sin embargo, como se menciona en la metodología, hubo ciertos picos a los cuales no fue posible asignarles una fase mineral; por lo tanto, fue necesario realizar un análisis complementario de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), método mediante el cual se confirma la asociación de las especies minerales como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3), y cuarzo (SiO_2) para los picos ya definidos y se establecen otras especies tales como caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), piroaurita ($\text{Mg}_6\text{Fe}_2(\text{OH})_{16}(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 0.25$) y anatasa (TiO_2) (Ver tabla 12). Para el caso de la caolinita,

como se menciona anteriormente, hace parte de la matriz arcillosa de la roca, como se observó y definió en los análisis de SEM/EDS, donde se identificó una fracción de la matriz arcillosa tanto en las muestras de lodolita shale, como en las laminillas caracterizadas como yeso. En cuanto a las otras especies identificadas como la piroaurita y la anatasa, sus respectivos difractogramas estándares (University of Arizona, (2005)) coinciden con algunos picos menores del difractograma del presente estudio. En cuanto a la piroaurita, esta podría asociarse a una alteración autigénica de la calcita presente por causa del interperismo (Palache, (1944); University of Arizona, (2005)) y la presencia de hierro y magnesio en la matriz arcillosa de la roca. Por otro lado, los picos menores y la baja concentración de anatasa detectadas en el análisis XRF, se puede asociar a un mineral secundario detrítico comúnmente depositado (Palache, (1944); University of Arizona, (2005)) en la fracción de matriz de roca, o bien como impureza en las láminas de yeso.

Figura 38.

Difractograma obtenido por el análisis de DRX a la muestra de laminillas de yeso más matriz (Mina la Chivatera).



Nota: Se observan los picos principales y menores de las fases cristalinas identificadas, tomando como referencia los difractogramas estándares para cada elemento, tomados de.... Abreviaciones minerales tomadas de Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Tabla 11.

Representa las fases cristalinas identificadas en base al difractograma, que conforman la muestra de laminillas de yeso más matriz de 1 mm.

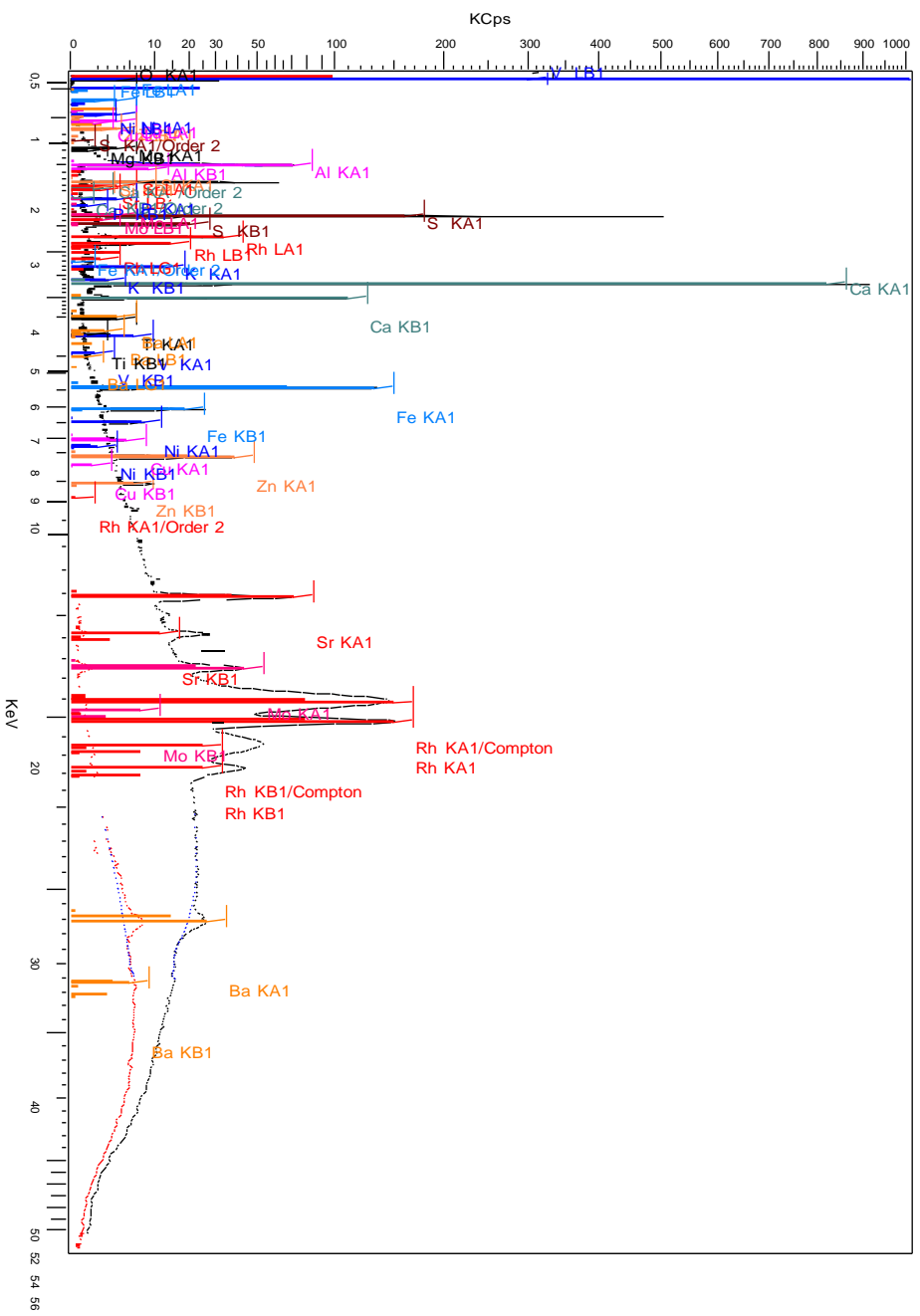
191852	PDF 01-083-4601	Calcite, syn	Ca(CO ₃)
63532	PDF 01-078-2315	Quartz	SiO ₂
27320	PDF 01-074-1513	Pyroaurite	(Mg ₆ Fe ₂ (OH) ₁₆ (CO ₃)(H ₂ O) ₄)0.25
	PDF 00-058-2005	Kaolinite-1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
2057	PDF 01-070-0982	Gypsum	Ca(SO ₄)(H ₂ O) ₂
94566	PDF 01-070-8501	Anatase, syn	TiO ₂

Nota: Fases cristalinas establecidas a partir de los análisis del difractograma del DRX, complementados con los de XRF.

Por otro lado, en el XRF se observan picos menores de otros elementos como: K, Mg, P, Ti, Zn, V, Sr, Ba, Ni, Mo y Cu en el diagrama elemental en una concentración menor a 1% (ver tabla 12), los cuales se asocian a grupo de los aluminosilicatos como la illita (K, Mg) y a minerales accesorios (P, Zn, V, Ti, Ba, Ni, Mo y Cu) que hacen parte de la matriz de la roca.

Figura 39.

Diagrama dispersión elemental para la muestra de laminillas de yeso más matriz.



Nota: realizado a partir del análisis elemental de fluorescencia por rayos x (XRF).

Tabla 12.*Grupos funcionales identificados en el diagrama de dispersión elemental.*

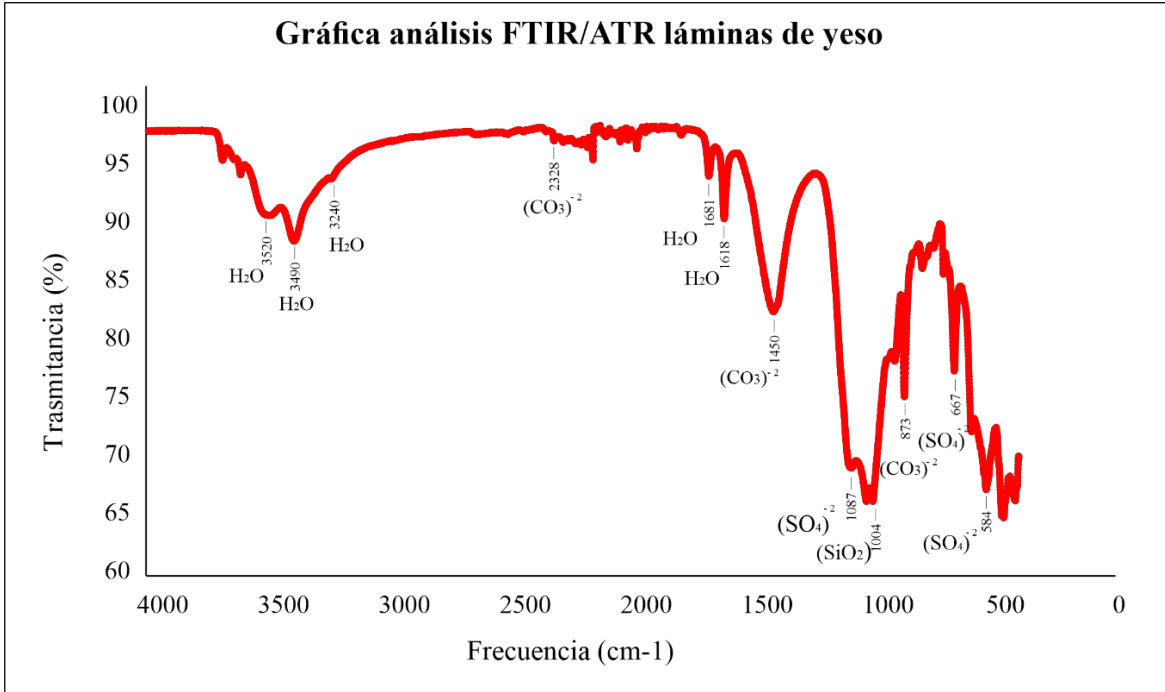
Formula	Z	Concentration	Stat. error	Net int.	Raw peak
CaO	20	48,58%	0,11%	904,3	904,7
SO3	16	31,64%	0,15%	502,9	503,2
SiO2	14	9,86%	0,41%	62,74	62,93
Al2O3	13	5,40%	0,65%	25,83	25,99
Fe2O3	26	2,44%	0,29%	133,5	134,4
K2O	19	0,56%	0,93%	12,76	13
MgO	12	0,38%	3,24%	1,754	2,393
P2O5	15	0,30%	2,12%	2,725	2,92
TiO2	22	0,21%	2,38%	2,28	2,518
ZnO	30	0,21%	0,58%	36,49	39,07
V2O5	23	0,15%	2,60%	2,059	2,372
SrO	38	0,10%	0,49%	60,6	70,95
BaO	56	0,06%	8,94%	0,3225	0,551
NiO	28	0,06%	1,63%	6,104	7,692
MoO3	42	0,04%	0,96%	26,47	43,29
CuO	29	0,02%	3,65%	2,254	4,293

5.4.3. *Espectroscopía del Infrarrojo (FTIR/ATR).*

Para el presente estudio, se analizó una muestra pulverizada de laminillas evaporíticas de yeso más matriz de roca, cuyos resultados indican un espectro de análisis FTIR/ATR (ver figura 40), que al compararlo con el espectro típico del yeso como el expresado en University of Tartu, (2021) expresado en transmitancia vs frecuencia (en unidades de número de onda), donde se aprecian los mismos picos e intervalos de unidad de número de onda que los representados en los resultados de este trabajo, llegando a corroborar con otra grafica estándar para el yeso de CNCR, (2017), expresada en absorbancia vs frecuencia (en unidades de número de onda), donde se corrobora también que son los mismos picos e intervalos, para así tener la certeza que las láminas están efectivamente conformadas por yeso. Así, con las tablas de frecuencias, en unidades de número de onda, de las bandas de absorción para los principales grupos funcionales inorgánicos (Rubinson & Rubinson, 2000) y (Nakamoto, 2006), se procedió a comparar los valores de frecuencia en unidades de número de onda de los picos más representativos de la gráfica con los intervalos de las tablas de frecuencias antes mencionadas, identificando los grupos funcionales: sulfatos (SO_4)⁻² en las frecuencias 585 a 660 cm^{-1} y 1080 a 1130 cm^{-1} , silicatos (Si-O) en 940 a 1050 cm^{-1} , carbonatos (CO_3)⁻² 1425 a 1450 cm^{-1} y agua cristalizada (H_2O) en 3190 – 3550 cm^{-1} y 1600 – 1700 cm^{-1} . Estos intervalos y la semejanza con los espectros de absorción de infrarrojo para el yeso confirman que estas laminillas son de dicho mineral y el componente de sílice y carbonatos, puede estar aportado por un porcentaje de matriz de roca que estaba adherida a dichas láminas analizadas y/o la presencia de impurezas de cuarzo, tal como se destaca en Tobón y Montoya, (2006).

Figura 40.

Representación gráfica de los análisis FTIR/ATR para la muestra de laminillas de yeso.



6. Discusión

En el lenguaje coloquial de la zona, se ha denominado a este tipo de roca como "polihalita", aclarando que la polihalita, según Garcés (s.f) ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$), es un mineral evaporítico del grupo de los sulfatos asociado genéticamente a cuencas evaporíticas; se aclara que en este trabajo el tipo de roca caracterizado, extraído de los frentes de explotación artesanales ubicados dentro de la secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior en la Mesa de Los Santos, no se cataloga como polihalita sino como una secuencia de lodolita shale, donde se encuentran laminillas de material evaporítico, sean lenticulares con un grosor de 3 a 5 mm o planares con un grosor de 1 mm o menor, de tonalidades blancas a incoloras y de una dureza de 2 en la escala de Mohs, caracterizadas macroscópicamente y por los métodos analíticos de SEM/EDS, DRX/XRF y FTIR/ATR como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Los análisis de SEM/EDS indican que las muestras recolectadas tanto de las laminillas evaporíticas de 1 mm como las más gruesas de hasta 8 mm, caracterizadas macroscópicamente como yeso, efectivamente corresponden a dicho mineral; morfológicamente no tienen parecido a sales de potasio como polihalita o singenita (Kloprogge et al, (2004); Zhao et al, (2011)) y en los espectros EDS de dichas láminas tampoco se observa un pico representativo de potasio (K) sino que se observan picos principales de calcio (Ca) y azufre (S), (ver figuras 27, 32 y 36) concordando tanto morfológica como químicamente con el yeso (Tobón y Montoya, 2006). Asimismo, el análisis de DRX/XRF, también indica en su difractograma (ver figura 38) picos representativos de especies minerales identificadas de forma preliminar como yeso y calcita y otras especies (ver tabla 11), lo cual es igualmente corroborado por los análisis de FTIR/ATR, realizado a las mismas láminas, donde se compara la gráfica representativa de los datos (ver figura 40) con el espectro

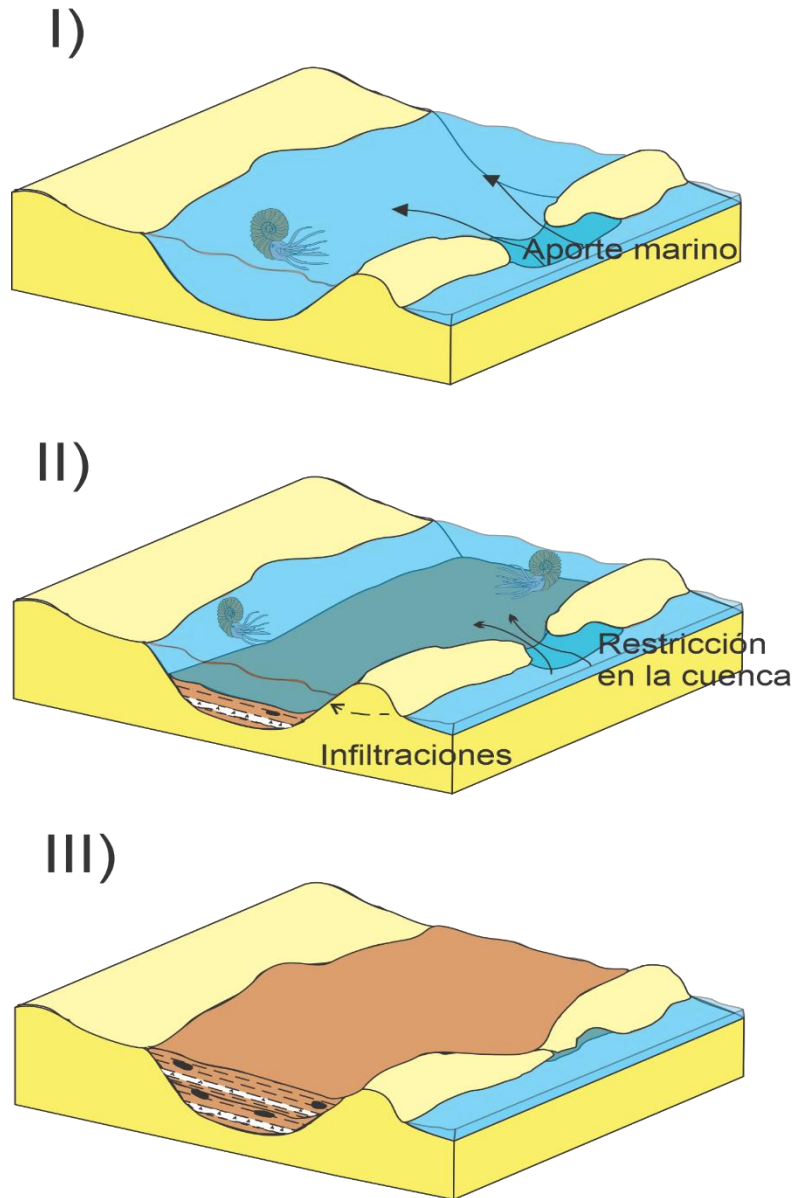
estándar para el yeso tomado de (CNCR, (2017); University of Tartu, (2021)); cuyos picos coinciden con aquellos identificados en este trabajo y se correlacionan con grupos funcionales inorgánicos en los análisis ya mencionados de SEM/EDS y DRX/XRF, tales como sulfatos, carbonatos y silicatos, así como la fracción de agua cristalizada característica del yeso. Por otro lado, en los espectros EDS de las figuras (28, 33, 34, 35 y 37) se identifican picos menores de potasio con una concentración promedio de 01.6 Wt%, los cuales no coinciden con valores para los sulfatos de potasio de 23.81 Wt% para la singenita y de 18.84 Wt% para la langbeinita (Barthelmy, 2014), reportadas por Gonzalez y Espinoza, (2012) como las sales de potasio constituyentes de las laminillas evaporíticas de 1 mm y tampoco con el 12.97 Wt% del potasio de la polihalita (Barthelmy, 2014), descartando también esta especie mineral como constituyente de dichas laminillas. Por lo tanto, como se observa en dichos espectros EDS, el pico menor de potasio se puede atribuir como fracción de matriz de la roca que está adherida a las láminas en cuestión, pasando a ser parte de los aluminosilicatos del grupo de las arcillas como illita, la cual no fue determinada por DRX/XRF ya que por dicho método se identificó en el difractograma la caolinita, junto con otras fases cristalinas como cuarzo, piroaurita y anatasa, las cuales explicarían los picos de sílice y los picos menores de hierro y magnesios detectados en los espectros EDS, así como minerales alóctonos de origen detrítico como la anatasa, cuya composición en Ti solo es registrada por los análisis de XRF, que son capaces de identificar concentraciones muy bajas (< 1%), junto con otros elementos, tales como: P, Zn, V, Sr, Ba, Ni, Mo y Cu correspondientes a la matriz de roca asociada con las laminillas de yeso.

En contraste con Gonzales y Espinosa, (2012) se tiene que las láminas evaporíticas de hasta 8 mm reportadas por dichos autores como yeso, concuerdan con lo expresando en este trabajo, no obstante, a pesar de que ellos identifican las laminillas de 1 mm como sales de potasio; estas se definen en este trabajo también como yeso y la fracción menor de potasio (K) detectada se asocia a la matriz de roca caracterizada, como se mencionó anteriormente en los análisis de SEM/EDS, DRX/XRF y FTIR/ATR realizados a las laminillas de material evaporítico. Por lo tanto, un análisis de roca total e identificación de propiedades ópticas, como los realizados por los autores mencionados, estaría tomando en cuenta o detectando la fracción de potasio presente en la matriz de la roca, definida y caracterizada en este proyecto, pero no se tendría una certeza de la composición química de las laminillas en cuestión.

Según los datos adquiridos en la zona de interés en asociación a su secuencia litológica y relaciones de campo, contenido fósil y la presencia de láminas evaporíticas, caracterizadas como yeso, se asocia su ambiente de formación como marino somero - transicional, lo cual concuerda con la interpretación de ambiente expuesto en (Ward et al., 1973; Royero y Clavijo, 2001; Sarmiento et al., 2006; Pinto y Peña, 2013) asociado a un ambiente marino somero cercano a la línea de costa, con aporte marino restringido (León, 1991; Patarroyo, 1997), principalmente en épocas de mareas o transgresiones. Posiblemente similar a un ambiente de estuario cercano a la costa (Atuesta, 2018); Por su parte, para Forero & Sarmiento, (1985) en Galvis, (1987), interpretan el ambiente como llanuras mareales salinas, entre ambientes supramareales e intermareales. Los descensos rápidos en el nivel del mar generan formaciones de depósitos de tipo Sabkha costero (Atuesta, 2018).

Figura 41.

Esquema de evolución secuencial del ambiente de formación.



Nota: I) Fase euxínica, incursiones de aporte marino en la cuenca; II) Fase de sedimentación, sedimentación y formación de láminas evaporíticas; III) Fase final, colmatación de la cuenca con la secuencia sedimentaria. Inspirado en uclm.es. (s.f.). 8.- Rocas y yacimientos de precipitación química. Obtenido de: https://previa.uclm.es/_users/higueras/yymm/YM8.html

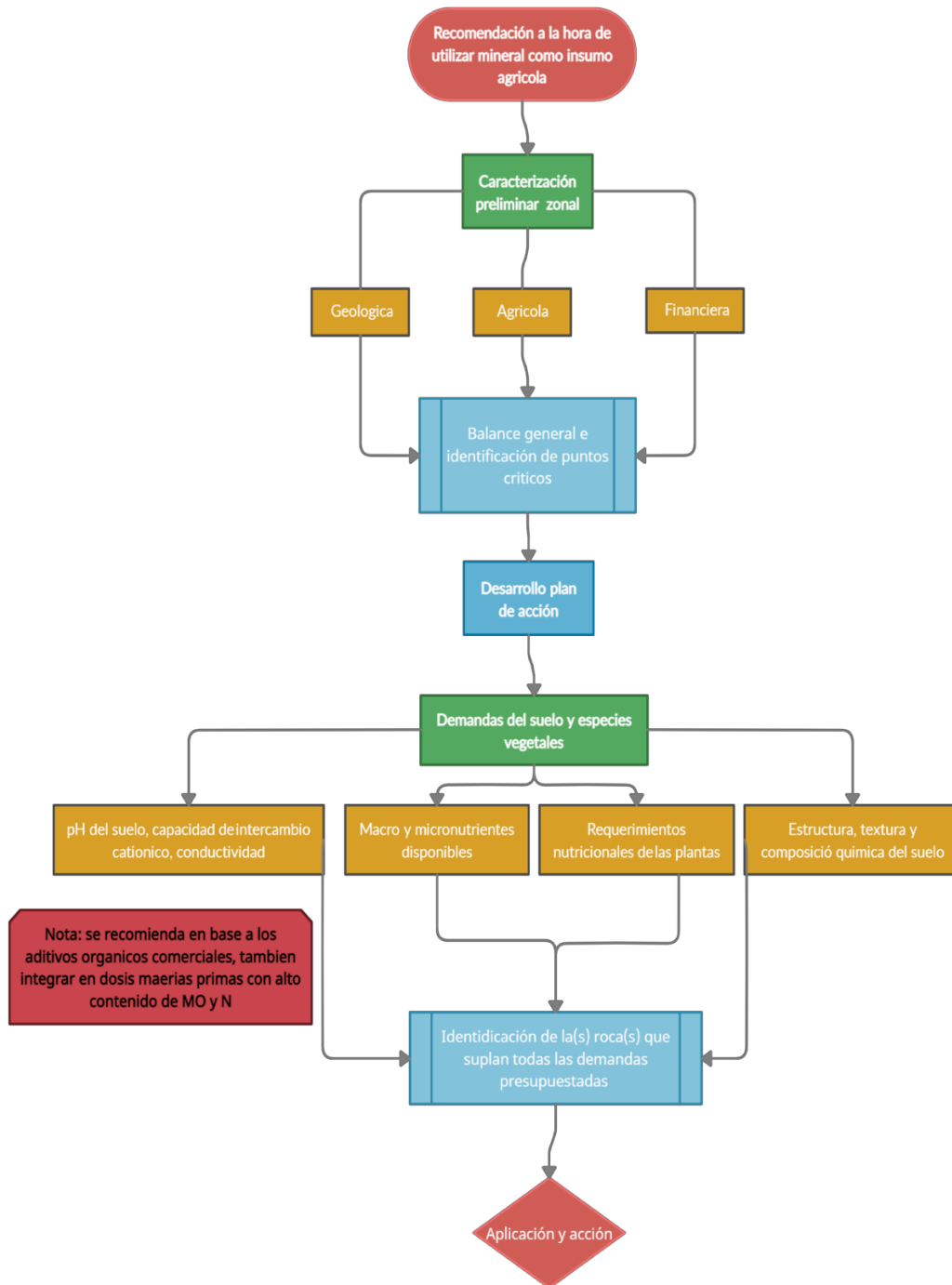
El tipo de roca caracterizada utilizado como insumo agrícola dispone principalmente de macronutrientes como Ca y S (asociados a las mineralizaciones de yeso), a su vez como otros elementos en una mínima proporción como Mg, K, Na, P y Fe, así como Al y Si (asociados a la matriz arcillosa de la roca). Según la necesidad que se tenga, se puede llegar a solventar el problema completa o parcialmente, por ejemplo, tratamiento de suelos ácidos, toxicidad, control en la estructura del suelo, majeo de suelos sódicos, entre otros. De requerir un insumo mucho más versátil e íntegro, para abordar cualquier situación, se recomienda no tratar únicamente la situación con el material caracterizado (a pesar de sus beneficios) sino combinarlo con otros tipos de rocas y material orgánico, agregándole macronutrientes importantes adicionales al compuesto como el N y P.

A nivel local, los insumos agrícolas donde este material se encuentra presente se caracterizan por que se encuentra acompañado de otras materias primas, teniendo una relación media para los productos comercializados de materia prima orgánica (generalmente gallinazas, bovinazas y/o caprinazas) (40%) y material mineral (60%) en el cual está incluido el material caracterizado como fuente de Ca y S, así como otros tipos de roca (ej. Roca fosfórica), las proporciones en este material mineral varían según el producto o la necesidad que vaya a solventar.

Se recomienda que, según las necesidades, tipo de suelo, el tipo de practica agrícola que se vaya a llevar a cabo, las especies vegetales a cultivar y resultados de un análisis de suelo, se emplee ya sea el material caracterizado individual o en conjunto con otros tipos de roca o compuestos, que sufraguen y alcancen las metas trazadas al planear la experiencia. El calcio, al ser un elemento de poca movilidad, recomendable tenerlo siempre disponible para evitar daños debido a su escasez, además que es agente clave para la absorción y un mejor enraizamiento.

Figura 42.

Diagrama de flujo, recomendaciones de uso de minerales como insumo agrícola.



5 Conclusiones

En este estudio, se observó y se describió que dentro de la secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior que aflora en Los Santos, dentro de la Formación Paja, se encuentran laminillas evaporíticas interestratificadas en los sets de lodolita – lodolita shale, con una geometría lenticular con espesores de hasta 8 mm y tabular-lenticular con espesores de 1 mm, las cuales son más densas y condensadas hacia la base y son definidas macroscópicamente como yeso. En los análisis realizados a las laminillas más matriz, se destacan los grupos funcionales como sulfatos, silicatos y carbonatos (FTIR/ATR), los cuales se asocian con el yeso, coincidiendo con el difractograma estándar para el yeso colombiano mezclado con matriz (DRX/XRF), al arrojar picos composicionales principales de elementos tales como el Ca, S, Al, Si, y otros picos menores tales como Fe, K, Mg y P, los cuales también fueron detectados por (SEM/EDS). Dichos resultados permiten caracterizar las laminillas evaporíticas como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en algunos casos contaminado con magnesio o hierro y la matriz de la roca adherida a dichas laminillas, la cual está conformada por aluminosilicatos del grupo de las arcillas como caolinita e illita, carbonatos, minerales de alteración como la piroaurita, alóctonos como la anatasa y accesorios ricos en elementos tales como: P, Zn, V, Sr, Ba, Ni, Mo y Cu cuya composición es menor al 1% (DRX/XRF). A pesar de la denominación coloquial de las rocas como “polihalita”, se aclara que este término no tiene ninguna relación con lo caracterizado en este trabajo, puesto la roca corresponde a lodolita shale con laminillas de yeso interestratificado. A partir de la secuencia litológica, de las relaciones vistas en campo de la presencia de concreciones calcáreas fosilíferas, el tipo de fauna presente y las laminillas de yeso se asocia su ambiente genético como marino somero – transicional cercano a la línea de costa con restricciones del mar abierto.

Según los análisis químicos y microscópicos realizados a las laminillas de yeso y a la roca de interés y su caracterización general, se pueden identificar los posibles macronutrientes (Ca, S) y otros micronutrientes disponibles en esta y su potencial para ser un aditivo agrícola. Para aplicar al suelo se debería usar la roca de forma integral (roca más laminillas de yeso) puesto aporta una gama más amplia de nutrientes a la que solo podría aportar una fracción de esta, atendiendo que las adiciones concuerden con los requerimientos demandados por el suelo (impartidas por sus propiedades bioquímicas, su estructura, su biota y contenido de materia orgánica) y el tipo de especies a cultivar y la disponibilidad de los nutrientes requeridos, desde el corto al largo plazo (debido a los procesos químicos que controlan el comportamiento de los iones).

6 Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros realizar un estudio de isótopos de C, O, S y Sr en el yeso, para tener mucha más certeza del origen de dichas sales evaporíticas.

En cuanto a una potencial aplicación agrícola se deben considerar muchos factores para su óptimo desarrollo, entendiendo que priman las condiciones bioquímicas del suelo donde se realizará la práctica y que los aditivos potenciales a agregar deben estar en funciones de estas, para así dar respuesta efectiva en diferentes escalas temporales, teniendo presente el tipo de especie vegetales a evaluar.

Se aconseja realizar un análisis de suelo previo con el propósito de caracterizar e identificar la demanda elemental requerida que se necesitan, para dar una solución efectiva a la situación que se pueda presentar.

Referencias

- ABIMGRA. (2017). *Abimgra es suelo fértil* . Obtenido de Abimgra es suelo fértil :
<http://abimgra.com/site/nuestra-empresa/#1481309856960-faac41fb-a8d0>
- ABIMGRA, p. (s.f). *Ficha técnica ABIMGRA potasio*. <https://agroactivocol.com/>.
- Arakel, A. (1980). Genesis and diagenesis of Holocene evaporitic sediments in Hutt and Leeman lagoons. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1305-1326.
- Ardebili, H., & Pecht, M. (2009). Defect and Failure Analysis Techniques for Encapsulated Microelectronics. *Encapsulation Technologies For Electronic Applications*, 287-350. doi: 10.1016/b978-0-8155-1576-0.50010-3
- Arnon, & Stout. (1939). *Plant Biochemistry*. *Academic Press*, p. 562.
- ATUESTA. D. 2018 Caracterización sedimentológica y bioestratigráfica del contacto entre las formaciones Rosablanca y Paja en la Mesa de Barichara, Santander. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. Director: Carlos Alberto Sánchez Quiñónez.
- Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. Food and Agricultural Organization (FAO) of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper 29.
- Barthelmy, D. (15 de 12 de 2014). *Mineralogy Database*. Obtenido de
<http://www.webmineral.com/>
- Basak, B., Sarkar, B., Biswas, D., Sarkar, B., Sanderson, P. Naidu, R. (2017). Bio-intervention of naturally occurring silicate minerals for alternative source of potassium: challenges and opportunities. *Adv. Agron.*, 115-145.

- Basak, B. Sarkar, B., Sanderson, P. Naidu, R. (2018). Waste mineral powder supplies plant available potassium: Evaluation of chemical and biological interventions. *Journal of Geochemical Exploration*, 114-120.
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José, Costa Rica.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Cabadas H.; Landa, J.; Sedov, S.; Solleiro, E. (2016). Carbonatos secundarios en las calcretas del noreste de la península de Yucatán: formas, procesos e implicaciones en la pedogénesis de geosistemas cársticos. GEOS, Boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana 0186-1891. 36. 291-307.
- CAI. (2021). Retrieved 7 February 2021, from <https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx>
- Calvo, J. (1997). El yeso. Geología y yacimientos en España. *BOLETÍN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE Cerámica y Vidrio* , 563-569 .
- Campbell, C. (1967). LAMINA, LAMINASET, BED AND BEDSET. *Sedimentofogy*, 12 - 15.
- Carvajal, G. (27 de 01 de 2021). Entrevista a Gabriel Carvajal, ejecutivo de Fertisol S.A.S. (A. Molano, & C. Vera, Entrevistadores)
- Carretero, I., Doussinague, C., Villena, E., López, J., Díaz, A., Vaquero, A., . . . Mora, J. (2003). *Técnico en Agricultura*. Madrid: Cultural, S.A.
- Castellanos, J. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Guanajuato, México. 226 p. : Segunda edición, Intagri, S.C. .
- Cediel, F. (1968). Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 5-96.

Chace (1956), Abbreviations in field and mine geological mapping, *Economic Geology*, v. 51, p. 712-723.

Chen, L., & Dick, W. (2011). *Gypsum as an Agricultural Amendment. General Use Guidelines*. Ohio: The Ohio State University. 36 p.

Clarkson, & Hanson. (1980). The mineral nutrition of higher plants. *Plant Physiol.*, 239-298.

Clavijo, J. (1985). Secuencia facial de la Formación Los Santos por la Quebrada Piedra Azul: Registro de una hoya fluvial evanescente. Proyecto Cretácico. *Publicaciones geológicas especiales Ingeominas*, 1-18.

CNCR. (2017). BASE DE DATOS DE ESPECTROS FT-IR ATR. Santiago, Chile: CENTRO NACIONAL DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN.

Codex Alimentarius Commission. (2007). *Organically produced Foods*. Roma: FAO/WHO Standards Programme, 3rd Edition.

Consulta de Planchas | GEOPORTAL. (2021). Retrieved 6 February 2021, from <https://geoportalligac.gov.co/contenido/consulta-de-planchas>

Cruz, L., & Caballero, V. (2007). *Manual de Laboratorio para la descripción y clasificación de rocas sedimentarias*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Cruz, L., Mier, R., & Uribe, E. (2012). *Cartografía de rocas sedimentarias, Guías de campo*. Bucaramanga: escuela de geología, UIS.

Cserna, Z. (1969). Minerales para fertilizantes en Mexico . *Boletín de la sociedad de Geología Mexicana* , 169-192.

Da Costa Mello, Tonhati, R., Neto, D., Darapuneni, M., Pavuluri, K. (2018). Response of tomato to polyhalite as a multi-nutrient fertilizer in southeast Brazil. *JOURNAL OF PLANT NUTRITION*, 2126-2140.

- Dangavs, N., & Blasi, A. (2002). Los depositos de yeso intrasedimentario del arroyo El Siasgo, partidos de Monte y General Paz, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 315-327.
- Díaz, E. C. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, 61-70.
- Díaz, G., & Suárez, M. (1998). *Evidencias neotectónicas del sistema de Fallas del Suárez en su confluencia con el sistema de Fallas de Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- EcuRed. (2011). *EcuRed*. Obtenido de Evaporita: <https://www.ecured.cu/Evaporita>
- Edwards, M., Smith, G., Bowling, D. (1988). Guard cells extrude protons prior to stomatal opening –a study using fluorescence microscopy and pH microelectrodes. . *Exp. Bot.*, 1541-1547.
- Etayo Serna, F. (1968). El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Geología Colombiana - An International Journal on Geosciences*, 5–74.
- FAO (s.f) CAPÍTULO 3 - LOS FERTILIZANTES, EN CUANTO CONTAMINANTES DEL AGUA. (2021). Retrieved 8 February 2021, from <http://www.fao.org/3/w2598s/w2598s05.htm>
- FAO. (2015). *Current world fertilizer trends and outlook to 2014-18*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *Portal de Suelos de la FAO*. Obtenido de Portal de Suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fernández Ruiz, Ramón. (2010). Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF): Una gran desconocida. *Anales de Química*. 106. 5-12.

FOLK, R. (1974). Petrology of Sedimentary Rocks. *Hemphill Publishing Company Austin, Texas*, 1-190.

Fundación Maxam. (2020). *Fundación MAXAM - Cátedra MAXAM - Minerales - Potasa*.
Obtenido de <https://www.fundacionmaxam.com/es/fundacion/potasa>

Galvis, J. (1987). Evaporitas. *Recursos Minerales de Colombia (Nº1,XII, segunda edición)*
Publicaciones especiales INGEOMINAS, 82 - 100.

Gamboa, A., & Gonzalez de Juana, C. (2014). DEPOSITOS DE YESO EN LA PENINSULA DE
PARIA ESTADO SUCRE, VENEZUELA. *Asociacion Venezolana de Geologia, Minería
y Petroleo (AVGMP) and Datapages, Inc.*, 125-132.

Garcés, I. (s.f.). Ficha técnica Polyhalita. Antofagasta : Universidad de Antofagasta .

González, L., & Espinosa, A. (2012). HALLAZGO DE YACIMIENTOS DE SALES DE
POTASIO EN COLOMBIA. *Boletín de Geología*, 57-67.

Hernandez, I. M. (25 de 01 de 2021). Consulta a experto: Milton Hernandez Ingeniero Agronomo.
(A. Molano, & C. Vera, Entrevistadores)

Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Owen, J. S., & Hart, J. M. (1999). Soil Test Interpretation Guide.

Hsiao, & Lauchli. (1986). Role of potassium in plant-water relations. *Praeger Scientific*, 281-312.

Humble, & Raschke. (1971). *Plant Physiol*.

Intagri. (2014). *Manual de Uso del Yeso Agrícola como Mejorador de Suelos*. México : Serie
Suelos, numero 5, articulos técnicos de INTAGRI . Obtenido de
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/manual-de-uso-del-yeso-agricola>

Intagri. (2017). *Beneficios del uso del yeso agrícola en suelos ácidos*. México: Serie suelos.
Número 23, articulos técnicos de INTAGRI.

INTAGRI. (2018). *Disponibilidad de nutrimentos y el pH del Seulo*. México: Serie nutrición vegetal. Número 113. Artículos técnicos de INTAGRI.

Jasinski, S. (2014b). Potash. *United States Geological Survey Minerals Yearbook*.

Jiménez, E., & Rodríguez, O. (2012). *Evaluación petrolera y metodos de explotacion de yacimientos asociados a secuencias evaporiticas*. México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México.

Jones, J.B. Jr. 2003. *Agronomic Handbook: Management of Crops, Soils, and Their Fertility*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Julivert, I. (1963). Estudio Petrografico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de los Santos. *Boletin de Gegología*, 5-64 .

Kemp, S. J., Smith, F. W., Wagner, D., Mounteney, I., Bell, C. P., Milne, C. J., Gowing, C. J. B., & Pottas, T. L. (2016). An Improved Approach to Characterize Potash-Bearing Evaporite Deposits, Evidenced in North Yorkshire, United Kingdom. *Economic Geology*, 719-742.

Kendall, A.C., 1984. Evaporites. *Geosci. Can.*, Reprint Ser., 1: 259-296.

Kendall, A. C, 1979. Facies models 14. Subaqueous evaporites. In Walker, R. G. (Ed.), *Facies Models: Waterloo, Ontario (Geological Assoc. Canada)*, 159-174

Kloprogge, J. T., Ding, Z., Martens, W. N., Schuiling, R. D., Duong, L. V., & Frost, R. L. (2004). Thermal decomposition of syngenite, $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$. *Thermochimica Acta*, 417(1), 143–155. doi:10.1016/j.tca.2003.12.001

Kretz, R. (1983), Symbols for rock-forming minerals, *American Mineralogist*, v.68, p.277-279.

Konno, H., Yamaya, T., Yamasaki, Y., & Matsumoto, H. (1984). Pectic polysaccharide breakdown of cell walls in cucumber roots growth with calcium starvation. *Plant Physiol.*, 633-637.

- León, L. (1991). Mapa geológico del departamento de Santander. *Boletín de Geología*, 53 - 63.
- Liebig, J. V. (1841). “*Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie.*”. Braunschweig.: Verl. Viehweg,.
- Manning, D. (2010). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 281-294.
- Manning, D. A. (2018). Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop. *Natural Resources Research*, 27(2), 217-227.
- Martin-Prével Pierre, Gagnard J., Gautier P. (1983). L’Analyse Vegetale dans le contrôle de L’Alimentation des Plants. *Technique et Documentation*, 9.
- McKee, E. and Weir, G.W. (1953) Terminology for Stratification and Cross-Stratification in Sedimentary Rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 64, 381-390.
- Mejía, A. (2018). Mineralogía y sus implicaciones genéticas en el miembro superior de la Formación La Luna (Galembó), en la sección de la Q. Aguablanca (VMM). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; Facultad de Fisicoquímicas.
- Mengel, & Kirkby. (1982). *Principles of plant nutrition*. Bern: Principles of plant nutrition.
- Mengel, K., & Kirkby, E. (1980). Potassium in crop production . *Advances in agronomy* , 59-110.
- Molina, & Henríquez. (2003). CARACTERÍSTICAS Y MANEJO DE FERTILIZANTES QUE CONTIENEN CALCIO, MAGNESIO Y AZUFRE. En G. M. Meléndez, *Fertilizantes: características y manejo* (págs. 58-68). Costa Rica.
- Molina, E. (2003). FERTILIZANTES: CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES. En G. M. Meléndez, *Fertilizantes: características y manejo* (págs. 20-29). Costa Rica.
- Montana, C., & Suarez H. (2000). *Geología aplicada al esquema de ordenamiento territorial del municipio de Los Santos (S.S)*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Nakamoto, K. (2006). Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Handbook of Vibrational Spectroscopy. *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, 1872–1892.

<https://doi.org/10.1002/9780470027325.s4104>

O'Neill, S., & Spanswick, R. (1984). Characterization of native and reconstituted plasma membrane H⁺-ATPase from the plasma membrane of *Beta vulgaris*. *J. Membr. Biol.*, 4215-4216.

Öborn I., Andrist-Rangel, Y., Askegaard, M., Grant, C., Watson, C., Edwards, A., (2005). Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use Manag.*, 102-112.

Orejuela, O. (2006). *BENEFICIO DE MINERALES DE YESO PROVENIENTES DE LA MINA LA NACUMA “MUNICIPIO DE LOS SANTOS”*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Pacheco, M. (2012). *ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA YESÍFERA DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA EN EL BORDE OCCIDENTAL DE LA MESA DE LOS SANTOS – SANTANDER (COLOMBIA)*. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 583–588.

PATARROYO, P.(1997): Barremiano Inferior en la Base de la Formación Paja, Barichara, Santander - Colombia.- *GEOLOGIA COLOMBIANA*, 22, pgs. 135-138,2 Figs., Santafe de Bogota.

Peng, W., Li, X., Song, J., Jiang, W., Liu, Y., & Fan, W. (2018). Bioremediation of cadmium- and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides*. *Chemosphere*, 197, 33-41. doi:

10.1016/j.chemosphere.2018.01.017

Pinto, V. D., & Peña, C. F. (2013). *GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DEL CORREGIMIENTO DE GUANE, (DEPARTAMENTO DE SANTANDER) Y SECTORES ALEDAÑOS*. Pamplona:

Universidad de Pamplona.

Rakkar, M., Franzen, D., Chatterjee, A. (2015). Evaluation of Soil Potassium Test to Improve Fertilizer Recommendations for Corn. *Open Journal of Soil Science*, 110-122.

Reading, H. (1996). *Sedimentary Enviroments: processes, facies and stratigraphy*. Malaysia: Blackwell Publishing.

RemineralizetheEarth. (2018). *Remineralize the Earth, better soil, better food, better earth*.

Obtenido de Remineralize the Earth: <http://remineralize.org>

Rengasamy, P. and M.E. Sumner. 1998. Processes Involved in Sodic Behavior. In: M.E. Sumner and R. Naidu (eds) *Sodic Soils – Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*, pp. 35-50. Oxford Press, New York, NY.

Rojas, A., & Barraza, J. (2009). *DISTRIBUCIÓN DE MINERALES EN DOS CARBONES DEL SUR-OCCIDENTE COLOMBIANO USANDO SEPARACIÓN CICLÓNICA Y OXIDACIÓN A BAJA TEMPERATURA*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería.

Römheld, V., & Kirkby, E. (2010). Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Springer Science+Business Media B.V.*, 155-180.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *MAPA GEOLÓGICO GENERALIZADO DEPARTAMENTO DE SANTANDER memoria explicativa*. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, INGEOMINAS.

Rubinson K.A., Rubinson J.F., “Análisis Instrumental”, Ed. Pearson Educación, 2000.

Salas, R. (2003). NUTRICIÓN MINERAL DE PLANTAS Y EL USO DE FERTILIZANTES. En

G. M. Meléndez, *Fertilizantes: características y manejo* (págs. 1-19). Costa Rica.

Salvany, J. (1990). Formaciones evaporíticas de la cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante; nuevas aportaciones y guía de superficie. ENRESA; Departamento de Geoquímica, Petrología; Prospección Geológica, Universidad de Barcelona ENRESA, 54-58.

Scott, W. D., B. D. McCraw, J. E. Motes, and M. W. Smith. 1993. Application of calcium to soil and cultivar affect elemental concentration of watermelon leaf and rind tissue. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 118:201–206.

Shear, C. B. (Editor). 1979. Calcium nutrition of economic crops (Special Issue). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10:1–501.

Sheng et al., Z. F. (2008). Isolation, characterization of silicate mineralsolubilizing *Bacillus globispours* Q12 from the surface of ewathered feldspar. . *Can. J. Microbiol*, 1064-1068.

Simmons, K.E., and K.A. Kelling. 1987. Potato responses to calcium application in several soil types. *American Potato Journal* 64:119–136.

Slipper, I. (2014). *Can anyone tell me about the ZAF method application in the SEM?* Obtenido de

https://www.researchgate.net/post/Can_anyone_tell_me_about_the_ZAF_method_application_in_the_SEM/5485d770d3df3eb51d8b4605/citation/download.

Song M., Pedruzzi I., Peng Y., Li P., Liu, J., Yu J. (2014). K-extraction from muscovite by the isolated fungi. *Geomicrobiol J.*, 771-779.

Spalletti, L. (2006). *Evaporitas*. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata: Buenos Aires.

Sparks. (1987). Potassium dynamics in soils. *Adv. Soil Sci* 6, 1-63.

Sparks, D., & Huang., P. (1985). Physical chemistry of soil potassium. In: R.D. Munson (ed.) Potassium in Agriculture. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*, 201-276.

Sarmiento-Rojas, L.F., Van Wess, J., and Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411. doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.003.

Sumner, M. E., & Larrimore., L. (2006). *Use of gypsum for crop production on southeastern soils*. St. Louis, Mo. : Presented at the workshop on Research and Demonstration of Agricultural Uses of Gypsum and Other FGD Materials.

Sumpsi Viñas, J. (2012). Los retos de la agricultura para alimentar al mundo en 2050. *Tiempo de Paz*, 37–48.

Tobón, J., & Montoya, L. (2006). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ALGUNAS MATERIAS PRIMAS MINERALES NACIONALES E IMPORTADAS UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO. Medellin : Universidad Nacional de Colombia; Facultad de Minas.

Tucker, M.E., Wright, V.P., y Dickson, J.A., 2003, Carbonate Sedimentology, Blackwell Publishing Company, UK, 214-216 pp.

uclm.es. (s.f.). 8.- Rocas y yacimientos de precipitación química. Obtenido de: https://previa.uclm.es/_users/higuera/yymm/YM8.html

Universidad Autónoma de Centro América. (2009). Consideraciones básicas sobre la agricultura sostenible. *Acta Académica*, 115-135.

University of Arizona. (2005). RRUFF Project website. Obtenido de RRUFF Sample Data: <https://rruff.info/>

University of Tartu. (2021). Database of ATR-FT-IR spectra of various materials. Obtenido de spectra of Gypsum: <https://spectra.cs.ut.ee/paint/fillers/gypsum/>

Van Straaten, P. (2006). Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 731-747.

Vargas, C. (2008). *CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA A ESCALA 1:25.000 DE LA MESA DE LOS Santos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

vonWilpert, K., & Lukes, M. (2003). Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulphate in a pruce stand on an acidified glacial loam. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 65, 115-127 .

Walworth, J. 2012. Using Gypsum and other Calcium Amendments in SouthWestern Soils. College of Agriculture & Life Sciences. University of Arizona. 5p.

Wang, M.; Zheng, Q.; Shen, Q. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *Int. J. Mol. Sci.*, 7370-7390.

Waraich, E.A.; Ahmad, R.; Hur, R.G.M.; Ahmad, A.; Mahmood, N. (2011). Response of foliar application of KNO₃ on yield, yield components and lint quality of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Afr. J. Agric. Res.*, 5457-5463.

Ward, D., Goldsmith, R., 1973. Geología De Los Cuadrángulos H12 Y H13, Bucaramanga y Pamplona Volumen XXI, Numero 1-3. INGEOMINAS

Wentworth, C. (1922). *A scale of grade and class terms for clastics sediments*. 377-392: Journal of Geology V. 30.

Westermann, D. T. 1975. Indexes of sulfur deficiency in alfalfa. II. Plant analyses. *Agronomy Journal* 67:265–268.

White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health.

Annals of Botany, 1073-1080.

Whitney y Evans (2010). Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*. 95. 185-187. 10.2138/am.2010.3371.

Xamtec. (s.f.). IDENTIFICACIÓN DE FASES DEL YESO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS. Bogota D.C., Colombia .

Yousefi et al., K. K. (2011). Phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi impacts on inorganic phosphorus fractions and wheat growth. *World Appl. Sci. J.* , 1310-1318.

Zhao, X., An, L., Liu, N., Yin, H., & Tang, M. (2011). Laboratory Simulation of In-situ Leaching of Polyhalite. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 50–57. doi:10.1016/j.proeps.2011.09.009