

Potencialidad de rocas carbonatadas en el área Méndez, provincia de Morona Santiago, Ecuador

Carbonate rock potential in the Méndez area, Morona Santiago province, Ecuador

Bladimir René Revelo Quilismal¹,
Jefferson Andrés Carranco López²

¹ Instituto de Investigación Geológico Energético. Quito - Ecuador.

E-mail: bladimir.revelo@geoenergia.gob.ec.

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba – Ecuador.

E-mail: jefferson.carranco@espoch.edu.ec.

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: 19-07-2024

Fecha de aceptación: 21-04-2025

Resumen

El estudio evaluó el potencial geológico de rocas calcáreas en la región de Méndez, analizando sus características y posibles implicaciones económicas. El propósito fue evaluar las características de estas rocas como materia prima para la industria cementera, aplicando métodos cuantitativos (determinación porcentual de elementos presentes y volumen) y cualitativos (texturas y características petrográficas). La exploración incluyó una caracterización litoestratigráfica en campo y la evaluación de la calidad y cantidad de material calcáreo en superficie. Los análisis realizados en el laboratorio químico del IIGE mostraron altos porcentajes (90,3 – 96,6%) de compuestos indicadores tal como CaCO₃, valores moderados (5,34 – 9,89%) de SiO₂ y bajos niveles (< 1%) de óxidos penalizantes como MgO, revelando una alta calidad de las rocas calcáreas en este sector. Además, la geometría de los paquetes calcáreos, su continuidad lateral, el espesor aparente y la escasa recarga de material estéril superficial, son ventajas significativas para avanzar en la exploración de este recurso.

Palabras clave: Calizas, Fluorescencia de rayos X, Geoquímica, Óxidos mayores.

Abstract

The study evaluated the geological potential of carbonate rocks in the Méndez region, analyzing their characteristics and possible economic implications. The purpose was to evaluate the characteristics of these rocks as raw materials for the cement industry, applying quantitative methods (percentage determination of present elements and volume) and qualitative methods (textures and petrographic characteristics). The exploration involved lithostratigraphic characterization in the field, as well as an assessment of the quality and quantity of the calcareous material exposed at the surface. Laboratory analyses of calcareous rocks conducted by IIGE indicated high percentages (90,3 – 96,6%) of CaCO₃, moderate (5,34 – 9,89%) SiO₂ values, and low levels of penalizing oxides (< 1%) such as MgO, indicating the high quality of the calcareous rocks in this sector. Furthermore, the geometry of the limestone packages, lateral continuity, apparent thickness and minimal presence of overburden are favorable characteristics for advancing the exploration of this resource.

Keywords: Limestones, Fluorescence X-ray, Geochemistry, Major oxides.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio se enfoca en conocer los resultados de exploración de rocas carbonatadas en el área de Méndez, provincia de Morona Santiago. Se recopiló y analizó información bibliográfica (geológica) existente, incluyendo informes técnicos históricos [1], artículos científicos y mapas elaborados por misiones nacionales e internacionales [2], complementada con nuevos datos investigados, donde se relacionan los diferentes aspectos litológico-estructurales y químicos de sus componentes y sobre todo su entorno con las rocas encajantes. El objetivo es evaluar el potencial de un recurso geológico inferido en la provincia de Morona Santiago.

El área de estudio, denominada Méndez, abarca 1120 ha en la provincia de Morona Santiago (Fig. 1). Se accede a través de carreteras de segundo orden que conectan con la Troncal Amazónica E45, limitando al norte con el Parque Nacional Sangay. En el presente estudio, se han identificado diversas ocurrencias minerales no metálicas en esta región como: calizas, grauvacas, arena silicea, lutitas, conglomerados, microconglomerados y rocas intrusivas de composición ácida como granitos pegmatíticos y pórfidos cuarcíferos; los cuales se describen detalladamente en el capítulo 3. Es importante resaltar que esta área se encuentra cercana a concesiones para minería no metálica. Sin embargo, es esencial verificar las características geológico-mineras asociadas al material de interés en puntos inventariados en la provincia de estudios históricos que dispone el IIGE [3], [4]. Estos estudios se orientaron a la prospección de materiales minerales, su análisis químico y la posterior

cuantificación y evaluación del potencial en cuanto a volumen y calidad de caliza.

En el contexto geológico regional, el área de estudio se ubica en la zona subandina que marca la transición entre la Cordillera Real (al oeste) y la Cuenca Oriente (al este). Esta zona se distingue por una intensa actividad sísmica y volcánica, actualmente controlada por fallas inversas como resultado de una tectónica de transpresión [2]. Este fenómeno aparentemente podría ser consecuencia de una inversión o reactivación de fallas normales preexistentes, lo que permite el afloramiento de secuencias sedimentarias del Cretácico de la Cuenca Oriente [5], [6], [7].

Además, [8] ha caracterizado la estratigrafía secuencial del Cretácico en la Cuenca Oriente, definida por las formaciones geológicas Hollín, Napo y Tena. Estos estudios reportan múltiples miembros o alternancias de depósitos calcáreos intercalados con areniscas y otros productos clásticos, en un ambiente sedimentario posiblemente marino de plataforma somera con facies distales fluvial-estuarinas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para verificar las características litológicas y químicas de los paquetes calcáreos, se realizaron actividades sistemáticas de recopilación de información geológica y geoquímica generada por el IIGE y sus instituciones antecesoras, disponibles en el CIGMA. Entre los recursos empleados se incluyen la Investigación de Materias Primas Minerales No Metálicas en el Ecuador [9]; el Mapa Geológico del Ecuador, escala 1: 1 000 000 [10]; Depósitos minerales no metálicos del Ecuador [11].

Mapa de ocurrencias de minerales no metálicos, escala 1: 1 000 000 [12]. Memoria técnica de ocurrencias de recursos minerales no metálicos, en la provincia de Morona Santiago [13], desarrollada en el marco del proyecto de "Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano". Además, se recopiló información de las hojas geológicas escala 1: 100 000, el archivo *shapefile* (.shp) actualizado del Catastro Minero Nacional emitido por ARCERNNR, para revisar la disponibilidad del área de estudio, y tesis de grado de los diferentes centros de investigación, universidades y escuelas politécnicas del país. Se revisó también información técnica no publicada por motivos de confidencialidad de empresas públicas (ENAMI EP) y privadas (UCEM). Recopilación de datos de bases digitales de la zona de estudio. Interpretación de modelos digitales de elevación, mapa de sombras (*hillshade*) e imágenes satelitales.

En el trabajo de campo se efectuaron dos comisiones de servicios institucionales, durante las cuales se obtuvo información geológica en drenajes, arroyos, vías, caminos de segundo y tercer orden con afloramientos dentro del área de estudio.

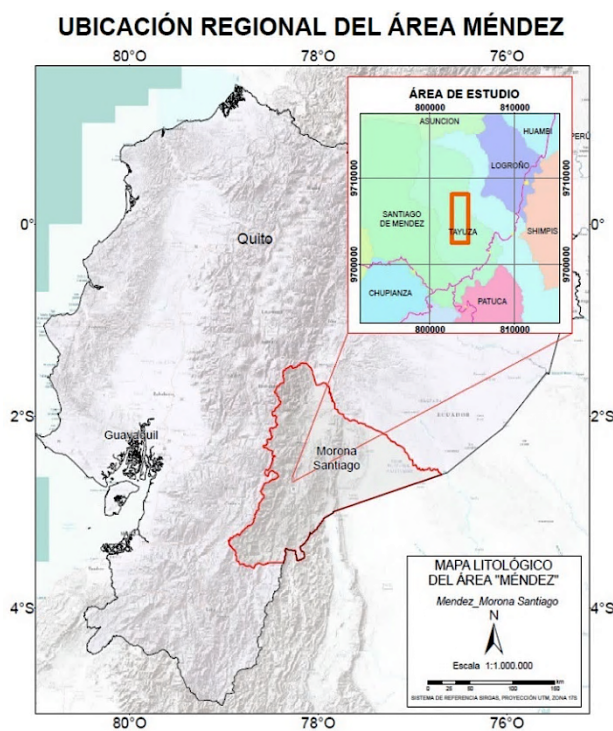


Figura 1. Ubicación regional del área Méndez (IIGE, 2024).

La actividad de exploración consistió en mapeo y caracterización litoestratigráfica de estratos rocosos con su descripción y puntos de control de afloramientos.

Además, se recolectaron muestras de rocas calcáreas para su posterior envío y análisis en laboratorio por Difractometría de Rayos-X (XRD) y Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF). Estos métodos permiten la determinación exacta del contenido de carbonato de calcio y óxidos mayores potencialmente penalizantes, entre otros elementos. El XRD realiza la determinación de fases minerales y el XRF determina elementos mayores en forma de óxidos.

Durante la exploración, se midieron estructuras geológicas (azimut de buzamiento y buzamiento) y se determinaron potencias (espesores aparentes), en metros, de las diferentes capas de rocas carbonatadas: calizas masivas, coquinas, micríticas, fosilíferas, lutitas calcáreas y rocas adyacentes. El levantamiento de la información se realizó conforme procedimiento técnico para el levantamiento geológico a escala 1: 100.000 del IIGE [14], en el cual se identifican los aspectos litológicos, estructurales, geoquímicos y sitios de muestreo.

Mediante nueve secciones geológicas en sentido NO-SE se realizó la estimación de volumen del material, asumiendo que las calizas continúan en profundidad. El volumen total de los bloques se determinó mediante las semisumas de las áreas, multiplicadas por la distancia de separación entre los perfiles, utilizando la expresión de (Ecuación 1).

Ecuación 1. Expresión de [15]

$$Vb = \frac{A1 + A2}{2} * L$$

Donde:

- Vb: Volumen del bloque mineralizado en m³
- A1: Área del cuerpo mineralizado en el perfil uno en m²
- A2: Área del cuerpo mineralizado en el perfil dos en m²
- L: distancia entre perfiles m.

2.1. Determinación elemental por XRF

La espectrometría de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda (WD-XRF) es una técnica analítica utilizada para la determinación de elementos en muestras de sedimentos, relaves, rocas y concentrados. Esta técnica permite la medición de elementos mayores como óxidos mediante fusión perlada y la determinación de trazas de elementos a través de prensado de muestras.

El proceso comienza con una preparación mecánica de la muestra que incluye: secado, reducción de tamaño, homogenización y pulverización para asegurar una

muestra representativa. Para los elementos mayores, la muestra pulverizada se calina para eliminar compuestos volátiles, luego se fusiona con tetra borato de litio en un crisol de platino utilizando un horno automatizado, y el producto fundido se enfría en un molde para obtener un disco homogéneo. Para el análisis de trazas de elementos, las muestras pulverizadas se prensan para obtener una pastilla lisa y regular [16].

En ambos casos, el análisis se realiza con un espectrómetro WD-XRF, que irradia la muestra con rayos X, generando una emisión de energía característica de cada elemento. Esta radiación es detectada y procesada por el equipo, generando los resultados finales. Posteriormente, los datos obtenidos son procesados para la elaboración del informe final. Los límites, matrices y métodos específicos para la determinación de elementos mayores están detallados en la Tabla 1 [16].

La lectura de las muestras empleadas en el presente estudio se realizó mediante el espectrómetro de fluorescencia de rayos X Bruker S8 TIGER del Laboratorio Químico del IIGE, usando los softwares QUANTEXPRESS y SpectraPlus, aplicando el método estándar ASTM E1621 – 13.

Tabla 1. Determinación elementos mayores por WD-XRF (Fusión perlada). Tomado de IIGE, 2024.

Matriz	Tipo de preparación	Método referido	Procedimiento o instructivo interno	Parámetro	Símbolo	Li (%)	LS (%)
Rocas, sedimentos, relaves y concentrados	Calcinación y fusión perlada	ASTM E1605 – 04 (preparación de muestras)	PR-EN-0523 / PR-EN-0566	Óxido de sodio	Na ₂ O	0,02	11,0
				Óxido de Magnesio	MgO	0,02	100,0
				Óxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	0,04	90,0
				Óxido de Silicio	SiO ₂	0,40	100,0
				Óxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0,01	20,0
				Óxido de Azufre	SO ₃	0,05	55,0
				Óxido de Potasio	K ₂ O	0,05	15,0
				Óxido de Calcio	CaO	0,02	100,0
				Óxido de Titanio	TiO ₂	0,01	8,0
				Óxido de Manganeso	Mn ₂ O ₃	0,01	0,8
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	0,01	40,0				

3. LITOESTRATIGRAFÍA

Las geotrasversías se realizaron a lo largo de caminos principales y secundarios, senderos, quebradas primarias y secundarias, abarcando áreas entre las comunidades de Natentza y la parte alta de la Comunidad Wawaim. El mapeo se extendió desde los sectores topográficamente bajos (850 msnm) hasta las partes altas (1250 msnm), donde se observaron afloramientos que permitieron definir los topes, bases, espesores aparentes, longitud de los estratos, dirección-buzamiento, y contactos supra e infrayacentes. Este reconocimiento permitió la

identificación de posibles geometrías de cuerpos tabulares, con direcciones preferenciales NE-SO y buzamientos suaves entre 25°-35° al NO. Localmente, la secuencia sedimentaria se encuentra intruída por cuerpos subvolcánicos asociados a diques de pórfidos cuaríferos mineralizados con sulfuros (Py - Cpy) y alterados (argílica baja, caolinita), con espesores menores a 5 m y direcciones preferenciales E-W. Estos cuerpos han sido mapeados y, pese a que su mineralización metálica no constituye el enfoque del presente estudio, representan una posible fuente de alteración en la composición de las rocas carbonatadas. El mapa de afloramientos (Fig. 2), se realizó a escala 1: 10 000. El mismo no presenta coordenadas por temas de confidencialidad.

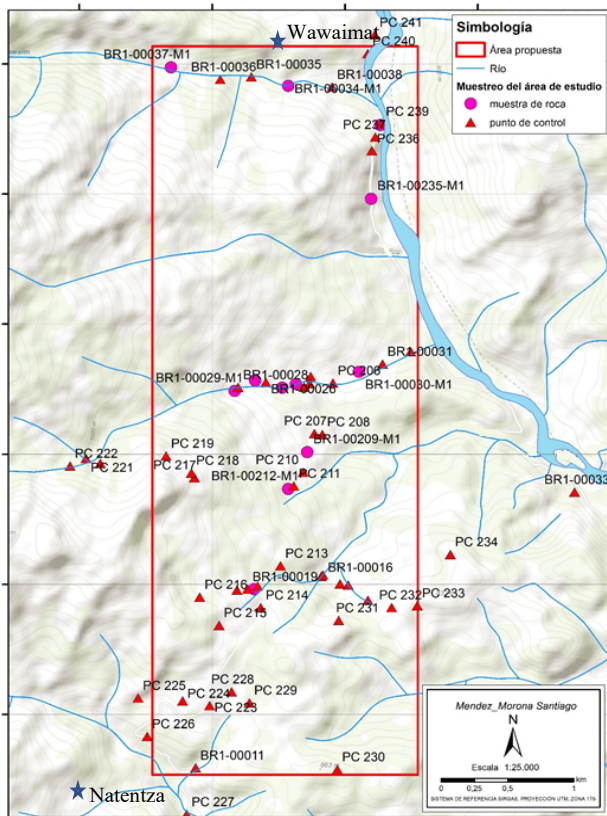


Figura 2. Mapa de muestreo del área Méndez.

3.1. Calizas

Estos horizontes calcáreos se disponen suprayacentes a las lutitas y, en el área de estudio, representan dos niveles principales de calizas con texturas diferentes. El nivel superior, caracterizado macroscópicamente por contener más del 90% de matriz, se le denomina caliza *mudstone*.

El nivel inferior, en contacto intercalado con conglomerados y areniscas, se le identifica como caliza *wackestone*, donde las partículas no están en contacto directo entre sí. Por tal motivo, para fines prácticos de la estimación de volumen se divide a este nivel inferior entre las calizas 2 y 3. Estos niveles de calizas alcanzan espesores aparentes de hasta 50m y presentan diferente

composición, texturas y ambientes deposicionales. Ambos tipos de calizas presentan vetillas de calcita de hasta 2 cm de espesor. Estos paquetes calcáreos siguen una dirección preferencial NE-SO y muestran buzamientos que varían entre 30° y 38° al NO (Fig. 3; Fig. 4a).

3.2. Conglomerados y microconglomerados

Los conglomerados se encuentran infrayacentes a los paquetes de calizas, presentando capas métricas de hasta 150m de espesor. Son típicamente polimícticos, clasto soportados y texturalmente mal clasificados, con una matriz arenácea. Los clastos están compuestos por lutitas, chert, limolitas calcáreas, calizas masivas, etc.; y presentan formas subredondeadas, con diámetros entre 1 y 10cm. Además, contienen *pebbles* y *cobbles* de rocas sedimentarias rodeados por una matriz arenácea (Fig. 4b y d). Estos estratos obedecen una dirección preferencial NE-SO y sus buzamientos oscilan entre 28° y 38° al NNO.

3.3. Areniscas

Las areniscas se presentan en forma de pequeños lentes métricos, con colores ocre a blanco-grisáceo. Poseen un grano medio a fino y son deleznable. Contienen feldespatos, plagioclasas, y cristales locales de ferromagnesianos con leve sensibilidad magnética (Fig. 4c). Estas capas pueden llegar a medir hasta 25m de espesor. Los paquetes arenáceos obedecen una dirección preferencial NE-SO con buzamiento suaves desde 30° a 35° al NO.

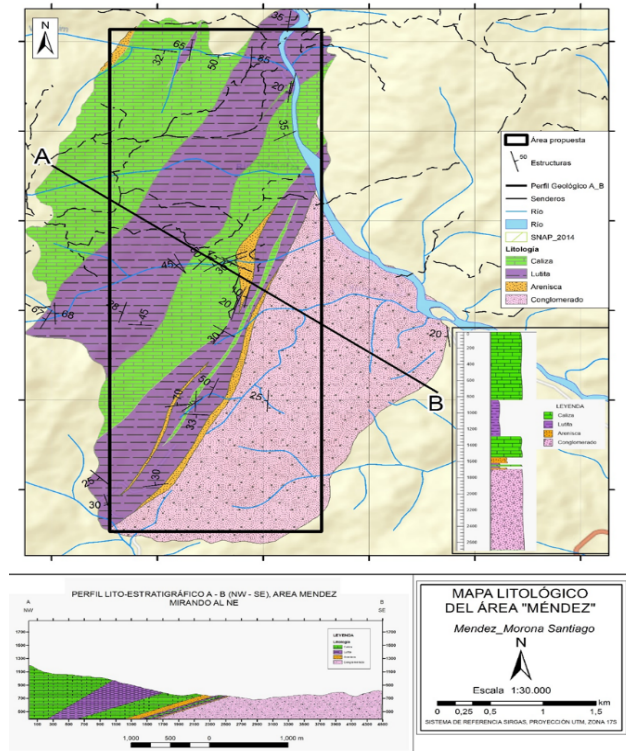


Figura 3. Mapa litológico del área Méndez. Incluye la columna estratigráfica tipo y un perfil general a lo largo de la línea A-B (NO-SE). Caliza superior (1) e inferior (2 y 3).

3.4. Lutitas

Las lutitas son rocas detríticas formadas principalmente por granos de tamaño limo y arcilla. Los horizontes de lutitas fisiles presentan grano fino y un color gris oscuro con vetillas locales de calcita menores a 5mm de espesor y fracturas con óxidos de hierro. Estas capas pueden alcanzar hasta 15m de espesor (Fig. 4e). La secuencia sedimentaria sigue una dirección preferencial NE-SO y presenta buzamientos suaves desde 32° y 35° al NO.

3.5. Mapa litoestratigráfico, columna estratigráfica y perfil tipo.

El Mapa Litoestratigráfico ilustra los estratos caracterizados de acuerdo con el mapa de afloramientos. Los criterios considerados para su representación cartográfica incluyen la selección de paquetes o unidades litológicas como la caliza que presentan un desarrollo litoestratigráfico significativo. Otros criterios comprenden espesores considerables, buzamientos

información recolectada en campo, incluyendo puntos de control y afloramientos, determinación de topes, bases, espesores aparentes, rumbos/buzamientos, contactos, fallas, diaclasas, etc.; para generar una base de datos. Esta información facilitó el delineamiento de los afloramientos, elongación de cuerpos intrusivos y, en definitiva, la definición de la geometría superficial de los estratos de caliza y los estratos supra e infrayacentes.

La estimación de los volúmenes de los estratos presentes en el área de estudio se realizó mediante el método de perfiles propuesto por [18] (Fig. 5), el cual permite identificar de manera particular los estratos de interés, cuya litología ha sido previamente definida mediante levantamientos en campo y posterior análisis de laboratorio (*ver apartado 3.1*). Este método proporciona información detallada sobre la morfología y las condiciones de distribución espacial de los estratos.

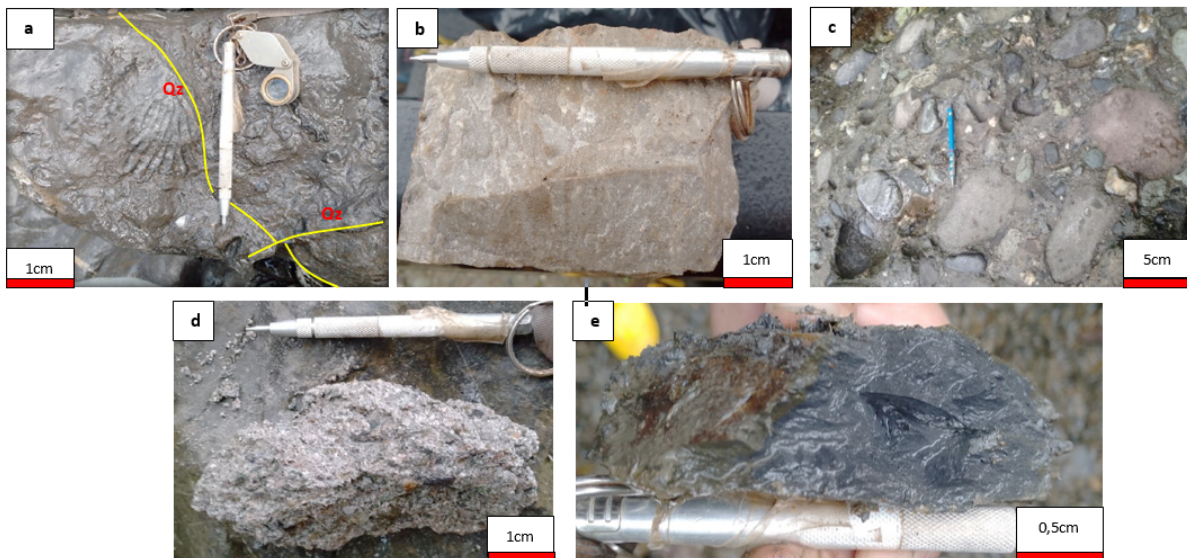


Figura 4. (a). Calizas wackestone (coquina), en ocasiones con vetillas de CaCO_3 con características hidrotermales, perpendiculares a la estratificación menores a 3cm de espesor (detalle de fósiles conchíferos y coquinas). (b). Areniscas color ocre a blanco-grisáceo, grano medio a fino, deleznable. Sensibilidad magnética leve. (c y d). Conglomerados y microconglomerados soportado y clasto-soportado, cuyos clastos se asocian a lutitas, chert, limolitas calcáreas, calizas masivas, etc, se encuentran de subredondeados a subangulares y un diámetro desde 0,5 cm hasta 20 cm. (e). Lutitas fisiles de grano fino, color gris oscuro con locales vetillas de calcita menores a 5 mm de espesor, fracturas con OxFe . Toda esta secuencia sedimentaria obedece una dirección preferencial NE-SO.

suaves, continuidad lateral y vertical, así como parámetros de elementos químicos que cumplan con los estándares de la -Guía de Calidad- para la industria del cemento. Este mapa se realizó a escala 1: 10 000. (Fig. 3).

4. RESULTADOS

4.1. Cálculo de volumen

La cubicación de un depósito mineral consiste en determinar el volumen, tonelaje y contenido de elementos u óxidos importantes para la industria [17], en este caso, cementera. Basándose en los datos obtenidos en la presente investigación y con el objetivo de conocer los potenciales recursos inferidos del área, se utilizó la

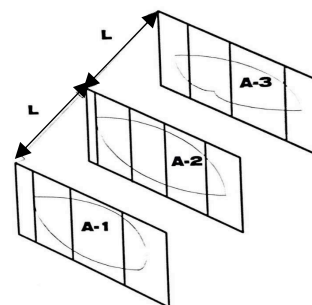


Figura 5. Esquema de las secciones tomadas para el cálculo de volúmenes.[15]

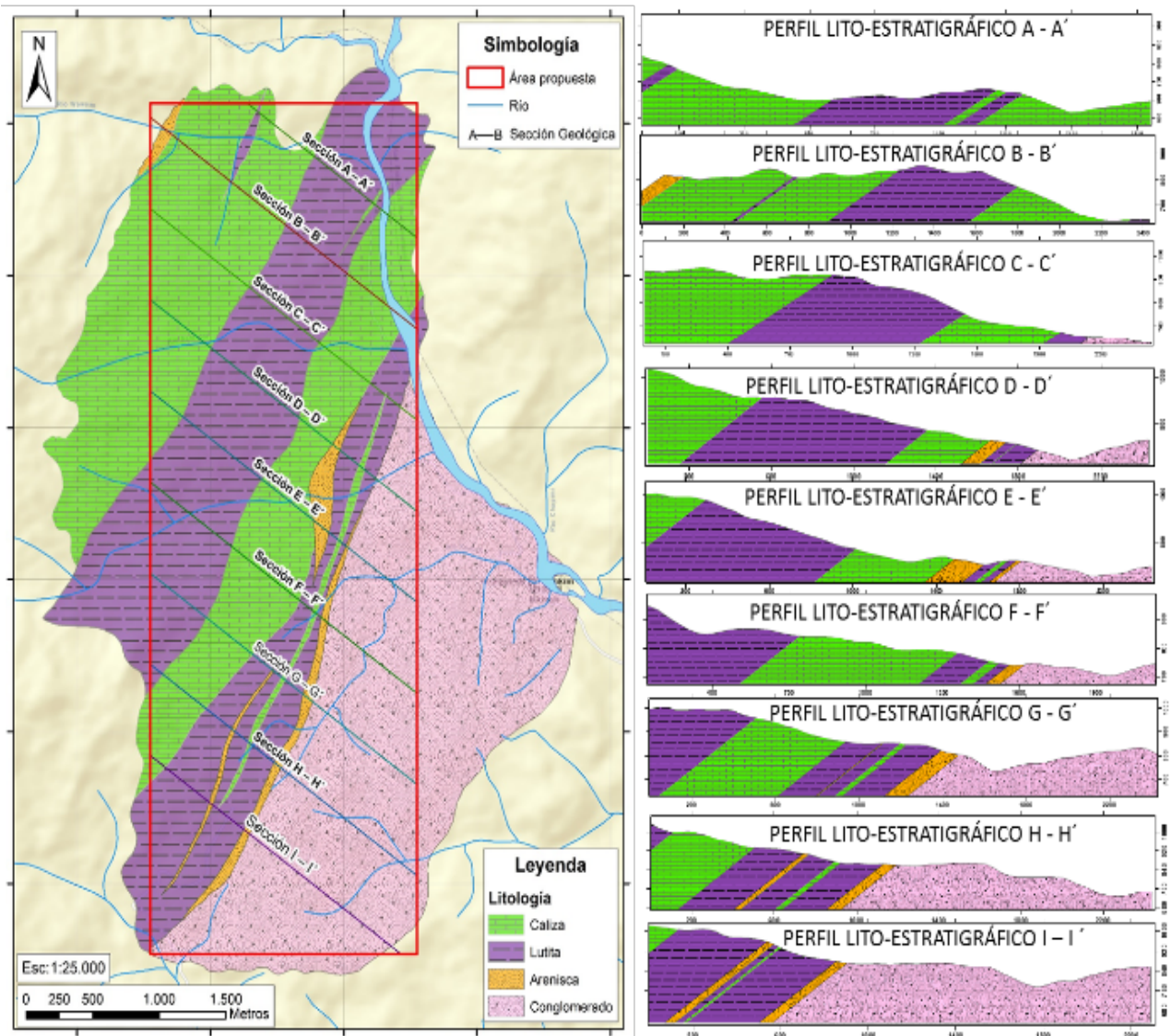


Figura 6. Distribución de los perfiles geológicos del área Méndez. Caliza superior (1) e inferior (2 y 3).

Se realizó una discriminación exhaustiva de las litologías presentes, enfocándose exclusivamente en aquellas con contenido calcáreo. Debido a que las rocas carbonatadas se encuentran intercaladas con otras rocas sedimentarias, presentando espesores variables, se han diferenciado tres cuerpos principales para el posterior análisis y cálculo de áreas y volúmenes. Para calcular el volumen y tonelaje de los estratos, se definieron 9 perfiles geológicos que intersectan perpendicularmente al rumbo de los estratos (Fig. 6). Tras calcular las áreas de los estratos en cada perfil, estas se agruparon en 8 bloques delimitados por los perfiles geológicos y la equidistancia entre secciones, establecida en 500m (Tabla 2).

Tabla 2. Bloques conformados por los perfiles geológicos, con sus respectivas áreas a una equidistancia de 500m entre cada sección.

Litología	Caliza1 (m2)	Caliza2 (m2)	Caliza3 (m2)
Bloque_1 (Perfil AA'+BB')	16 800 349,96	38 219 437,26	0
Bloque_2 (Perfil BB'+CC')	32 944 555,00	57 701 372,50	0
Bloque_3 (Perfil CC'+DD')	41 102 892,50	43 828 707,50	470622,5
Bloque_4 (Perfil DD'+EE')	40 813 105,00	25 100 715,00	801 802,50
Bloque_5 (Perfil EE'+FF')	0	45 991 682,50	2 192 580,00
Bloque_6 (Perfil FF'+GG')	0	71 296 712,50	3 491 210,00
Bloque_7 (Perfil GG'+HH')	0	65 945 770,00	4 228 997,50
Bloque_8 (Perfil HH'+II')	0	28 614 652,50	3 368 967,50

En la Fig. 7 se presentan los volúmenes estimados de los estratos con contenido calcáreo en el área de estudio. Para fines prácticos, estos estratos se denominarán *Caliza 1*, *Caliza 2* y *Caliza 3*, según se detalla a continuación:

Caliza 1, ubicada al NO del área de estudio, con dirección de elongación NE-SO, se determinó un volumen de 131 660 902,46 m³.

Caliza 2, situada en la parte central del área propuesta, se elonga con una dirección NE-SO, se calculó un volumen de 376 699 049,76 m³.

Caliza 3, ubicada en el sur del área propuesta, con dirección NE-SO y morfología lenticular, se calculó un volumen de 14 083 557,50 m³.

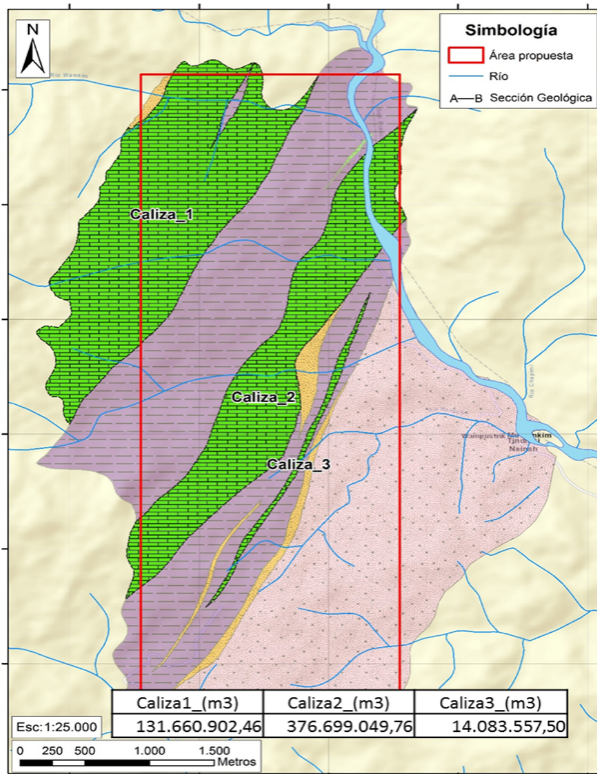


Figura 7. Volúmenes estimados de los estratos con contenido calcáreo presentes en el área de estudio mediante el método de [15]

Es importante destacar que los estratos presentan un buzamiento entre 25° y 30° hacia el NO. Para el cálculo del tonelaje se considera el peso específico de la caliza (2,6 g/cm³).

4.2. Geoquímica

Los resultados de los análisis geoquímicos realizados por el laboratorio del IIGE, utilizando XRF, de las muestras recolectadas en Méndez, revelaron la presencia de óxidos mayores (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, K₂O, CaO, Fe₂O₃) y carbonatos (CaCO₃). Sin embargo, para el presente estudio se analizaron únicamente tres compuestos (CaCO₃, SiO₂, MgO) por ser los más relevantes para definir la calidad de las calizas en la industria cementera [19]. Las concentraciones de CaCO₃ superaron el 80% en la mayoría de las muestras, con máximos que exceden el 96%. Por otro lado, los niveles de compuestos penalizantes como MgO se mantuvieron

mayoritariamente por debajo del 1% (Tabla 3), lo que sugiere ser favorable para el uso del material calcáreo en la industria del cemento.

4.3. Análisis de la distribución de las concentraciones

Los datos obtenidos indican que cada compuesto (carbonato de calcio, óxido de silicio y óxido de magnesio) presenta valores y estadísticas descriptivas considerablemente distintas (Tabla 4). Del análisis exploratorio de los datos espaciales, se observa que la media y mediana del CaCO₃ y MgO no varían significativamente. Al contrario, el SiO₂ presenta la mayor desviación estándar, indicando una variabilidad más alta. Específicamente, el CaCO₃ presenta una muy baja variabilidad (CV = 0,09), lo cual es favorable por su homogeneidad y relevancia como materia prima principal. En contraste, el SiO₂ muestra una alta variabilidad (CV = 1,03), y el MgO presenta una variabilidad moderada (CV = 0,56), lo que podría afectar la calidad del producto final si no se controla adecuadamente.

La Tabla 4 describe la distribución de las concentraciones en porcentaje tanto para el carbonato de calcio, sílice y el óxido de magnesio.

CaCO₃

El análisis de la distribución de las concentraciones de Carbonato de Calcio (CaCO₃) en el área de estudio revela una notable homogeneidad en los valores obtenidos. Las concentraciones de carbonato de calcio en las muestras analizadas varían entre un mínimo de 71,80% y un máximo de 96,60%, con una media de 88,26% y una desviación estándar de 7,99%. Los valores más altos se ubican tanto al norte como en la zona central y sur del área de estudio (Fig. 8). La baja variabilidad observada en las concentraciones de CaCO₃, reflejada en la proximidad entre los valores de la media y la mediana, sugiere una composición química consistentemente rica en carbonato de calcio en la región. Este hallazgo es consistente con la geología del área, caracterizada por la presencia de unidades litológicas predominantemente calcáreas, como las calizas reportadas en los sectores donde se registra mayores concentraciones de CaCO₃ (hasta el 96,6%) y concentraciones más bajas de este compuesto (71,8%) en zonas de lutitas intercaladas localmente con niveles calcáreos. Estos resultados resaltan el potencial del área de Méndez como una fuente significativa de material calcáreo de alta calidad para aplicaciones en la industria del cemento.

SiO₂

El análisis de la distribución de las concentraciones de óxido de silicio (SiO₂) en el área de estudio revela una considerable variabilidad entre las muestras. Estos resultados revelan que las concentraciones de SiO₂ presentan una amplia gama, con valores que van desde un mínimo de 5,34% hasta un máximo de 71,95%.

Tabla 3. Resultados de composición química de óxidos por XRF (IIGE 2023).

MUESTRA	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
DA1-00086-M1	0,040	0,601	1,681	5,35	0,396	0,196	48,365	96,00	0,658
EG1-00060-M1	<0,02	0,436	0,791	5,57	0,108	0,119	49,525	96,60	0,265
BR1-00018-M1	0,103	0,301	5,715	71,95	0,328	0,650	8,586	90,20	1,055
BR1-00024-M1	<0,02	0,284	0,578	20,74	0,080	<0,05	42,047	80,10	<0,01
BR1-00025-M1	<0,02	0,393	0,524	13,21	0,098	0,057	46,144	86,40	<0,01
BR1-00027-M1	0,056	0,629	1,370	6,38	0,242	0,143	48,925	95,60	0,500
BR1-00029-M1	0,022	0,724	1,309	9,89	0,730	0,203	46,599	90,30	0,146
BR1-00030-M1	0,512	1,523	7,003	53,87	0,556	1,031	13,880	91,20	4,120
BR1-00034-M1	<0,02	0,391	1,778	8,88	0,174	0,146	46,507	90,30	0,871
BR1-00037-M1	0,452	1,016	7,118	65,50	0,091	0,336	9,855	71,80	3,005
BR1-00212-M1	<0,02	0,52	1,960	9,67	0,350	0,330	46,29	90,00	0,43
BR1-00235-M1	<0,02	0,67	2,040	6,58	0,150	0,310	47,91	94,20	0,54
BR1-00238-M1	<0,02	0,45	1,510	25,45	0,120	0,170	37,69	74,70	0,14

Tabla 4. Resumen estadístico de los valores de CaCO₃, SiO₂ y MgO.

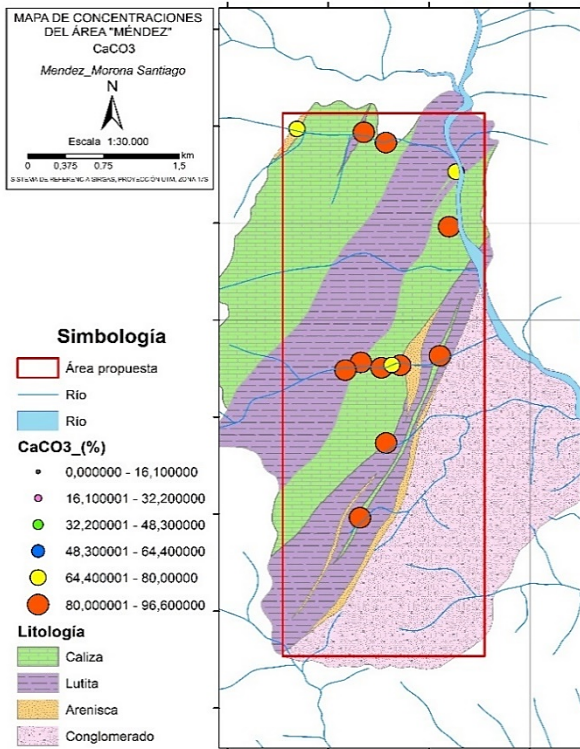
Variable	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)
Número	13	13	13
Mínimo	71,8	5,345	0,28
Máximo	96,6	71,95	1,52
Media	88,26	23,31	0,61
Mediana	90,3	9,89	0,52
Desviación estándar	7,99	24,1	0,34
Asimetría	-0,98	1,17	1,63
Curtosis	2,74	2,71	5,13
Percentil 25	84,82	6,53	0,39
Percentil 75	94,55	32,55	0,68
Coefficiente de Variación (CV)	0,09	1,03	0,56

La media de 23,31% y la mediana de 9,89% indican que hay una concentración significativa de muestras con bajos niveles de SiO₂, pero también existen algunas muestras con concentraciones muy altas, lo que se refleja en la alta desviación estándar y varianza. La distribución de los datos es asimétrica positiva (*skewness* = 1,01), lo que sugiere que hay una mayor cantidad de valores bajos (sesgo a la izquierda), con algunas muestras que tienen concentraciones mucho más altas de SiO₂. La curtosis negativa (-0,80) indica que la distribución es más plana que una distribución normal, con menos valores atípicos de los esperados en ambos extremos. Las concentraciones de sílice en las muestras analizadas presentan una tendencia hacia concentraciones más bajas en la mayoría del área de estudio. En puntos específicos, estas concentraciones llegan a superar el 60%, excepcionalmente al norte y en la parte sur del área de estudio (Fig. 9). Estos resultados son compatibles con las unidades litológicas del sector, registrándose las concentraciones más altas de SiO₂ precisamente donde se

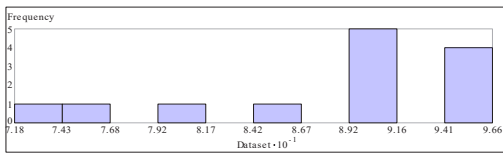
encuentran lutitas intercaladas con areniscas silíceas y calizas, contribuyendo a la diversidad en las concentraciones de SiO₂ observadas.

MgO

El análisis de la distribución de las concentraciones de óxido de magnesio (MgO) en el área de estudio indica una distribución estrecha y predominantemente baja de este compuesto. Las concentraciones de MgO en las muestras analizadas varían entre un mínimo de 0,28% y un máximo de 1,52%, con una media de 0,61% y una desviación estándar de 0,34%. La baja variabilidad de las concentraciones se refleja en la proximidad de la media y la mediana (0,52%), lo que sugiere una distribución relativamente uniforme del MgO en el área de estudio. La mayoría de las concentraciones de óxido de magnesio en las muestras analizadas presentan niveles por debajo del 1%, con una clara distribución de asimetría positiva (1,63). Estas concentraciones más bajas se encuentran ampliamente distribuidas en gran parte del área de estudio, incluyendo el norte, la zona central y el sur del área de estudio (Fig. 10). La mayor concentración de este compuesto se ubica en el límite norte y la zona central del área. Estos resultados también son congruentes con las unidades litológicas definidas en este sector. La concentración más alta de MgO se encuentra principalmente en la zona que presenta lutitas intercaladas con calizas y areniscas en contacto con conglomerados. En contraste, se observan valores generalmente bajos (inferiores a 1%) en zonas dominadas por calizas, lo cual destaca su potencial como fuente de materiales con bajas impurezas para aplicaciones industriales cementeras.

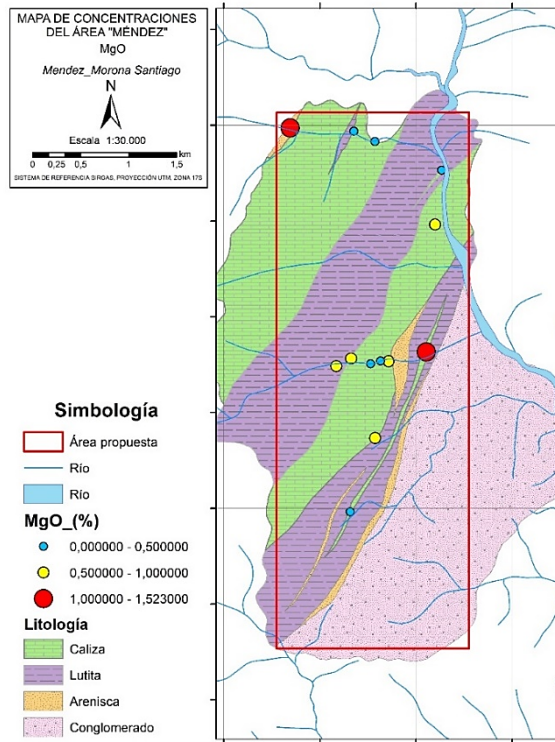


Histogram
Transformation: None

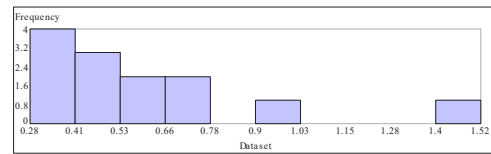


Dataset : Data Attribute: CaCO₃

Figura 8. Distribución de las concentraciones de carbonato de calcio en el área de Méndez.

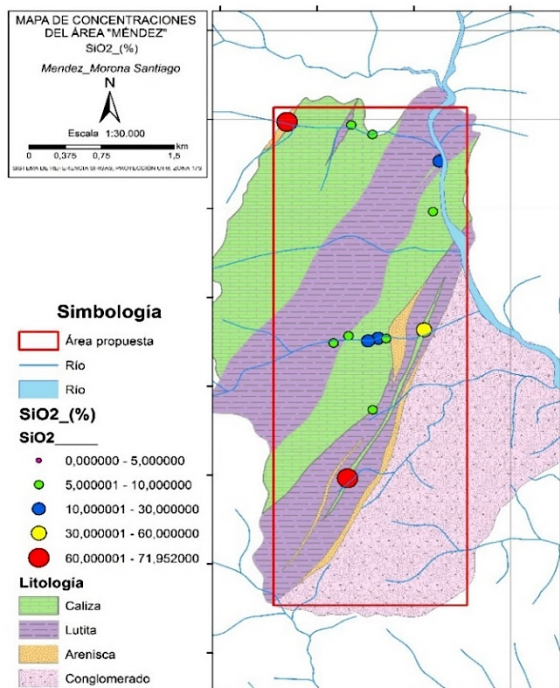


Histogram
Transformation: None

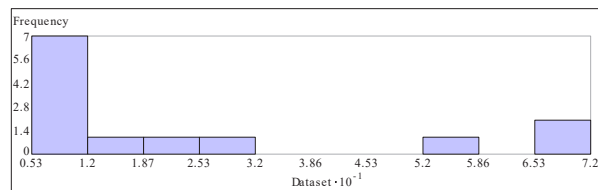


Dataset : Data Attribute: MgO_____

Figura 9. Distribución de las concentraciones de óxido de magnesio en el área de Méndez.



Histogram
Transformation: None



Dataset : Data Attribute: SiO₂_____

Figura 10. Distribución de las concentraciones de sílice en el área de Méndez.

5. DISCUSIÓN

La Tabla 5 de la Guía de Calidad [20] de elementos químicos en la industria cementera establece los rangos permisibles mínimos y máximos tanto para las fases de voladura en mina, trituración en mina y despacho, lo que sugiere que los resultados presentados en este estudio son apropiados para las diferentes etapas de esta industria. La presente investigación de rocas carbonatadas en la zona de Méndez, Morona Santiago, ha revelado un importante potencial para aplicaciones industriales, específicamente en la industria del cemento. Las altas concentraciones de CaCO_3 con valores superiores al 96% en el centro norte del área de estudio, indican una elevada pureza de la caliza que concuerda con estudios sobre formaciones geológicas similares en la región y de manera global [21]. Estos resultados sugieren que la mayor parte del área de estudio presenta altos niveles de pureza de CaCO_3 , según la Guía presentada por UCEM (Tabla 5), lo cual es favorable para su uso industrial en la producción de cemento.

Mundialmente, las rocas calcáreas generan gran interés por su importancia económica, en especial para la producción de cemento y como materia prima en otras industrias.

Tabla 5. Guía de Calidad. [20]

N°	Proceso	% SiO ₂ máx	% MgO máx	% CaO mín	% CaO máx	% CaCO ₃ mín	% CaCO ₃ máx	% Retenido 80 mm máx	% Retenido 100 mm máx
1	Voladura	2,50	1,00	50,0	56,2	89	100		
2	Trituración mina C	2,50	1,00	50,0	56,2	89	100	10,0	0,0
3	Despacho	2,50	1,00	50,0	56,2	89	100	10,0	0,0

Según [22], la distribución de carbonatos marinos no se realiza al azar en los océanos mundiales, ni en la actualidad ni en el pasado. Dichos autores [19] desarrollan un modelo conceptual basado en parámetros oceanográficos de superficie para predecir la distribución global de plataformas carbonatadas en ambientes someros, siendo Ecuador una de las zonas paleoclimáticas carbonatadas someras de gran relevancia para su estudio. Del mismo modo, en otras regiones del mundo como Asia se resalta la importancia de los análisis geoquímicos para evaluar no solo el potencial de las rocas carbonatadas para la industria del cemento sino que también podrían ser utilizadas en las industrias del papel y la pintura, con aparentes tratamientos menores [23]. Sin embargo, estos estudios aún no han sido replicados en Ecuador debido a su limitado desarrollo industrial. Alternativamente, el material podría tener un uso como potencial fuente de cal para actividades mineras regionales, donde la demanda es constante.

Regionalmente, el entorno geológico del área de Méndez, caracterizado por su ubicación entre la Cordillera Real y la Cuenca Oriente, comparte historias tectónicas

comparables con formaciones similares o equivalentes en regiones Andinas que han sido exploradas y que claramente demuestran que el entorno puede influir en la calidad y distribución de los depósitos carbonatados [24], [25]. Además, [26] en sus estudios de los Andes peruanos señalaron la evolución y viabilidad económica de las rocas carbonatadas en regiones con formaciones geológicas y demandas industriales similares. Los estudios subrayan la importancia de la cooperación regional y el desarrollo de proyectos transfronterizos para aprovechar estos recursos de manera eficaz.

El potencial de estos recursos en Ecuador se ve respaldado por el trabajo de [27], quienes proponen un modelo de evolución de las formaciones geológicas de la Cuenca Oriente, estableciendo paralelismos en el área de estudio. Su investigación destacó que las rocas carbonatadas de la formación Santiago fueron depositadas en una amplia plataforma marina que evolucionó a un sistema deltaico en el jurásico.

Asimismo, estudios geomorfológicos recientes de la deformación cuaternaria en la región del Cutucú [28] señalan que una estructura anticlinal activa es la responsable de la exposición en superficie de potentes niveles de calizas en el suroriente, lo cual implica que el

buzamiento de los paquetes calcáreos observados en este estudio, hacia el NO, concuerda con el flanco occidental de esta estructura regional y respaldaría la hipótesis de que estos niveles son continuos en el subsuelo tanto en esta zona como su posible extensión transfronteriza. Por otro lado, también se debe tomar en cuenta los desafíos y oportunidades que presenta la ubicación remota y la necesidad de desarrollo de infraestructura para el aprovechamiento de este recurso de manera efectiva, que también es una consideración importante en el área de Méndez.

En resumen, el potencial para futuras exploraciones y cuantificación de recursos en el área de Méndez mediante los resultados de los análisis geoquímicos realizados por el laboratorio del IIGE, utilizando XRF, los cuales indican valores dentro de los rangos permisibles para la industria cementera; se relacionan a materiales de buena calidad y pureza según la tabla de la UCEM (Tabla 5). Finalmente, estudios más detallados son necesarios, como aplicar modelos geoestadísticos, e integrar diferentes técnicas que son abordados por los hallazgos de [29], quienes promueven el uso de tecnologías emergentes y técnicas geofísicas avanzadas que integren

un análisis estratigráfico, estructural, geomecánico y diagenético para delinear y cuantificar con mayor precisión los recursos de rocas carbonatadas en escenarios geológicos complejos como el área del presente estudio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados analíticos proporcionados por el laboratorio del IIGE, mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF) para la determinación de carbonatos, la geoquímica de los óxidos mayores de los cuales solo se evaluaron y analizaron los tres compuestos principales y más relevantes para la industria cementera (CaCO_3 , SiO_2 , MgO) se encuentran dentro de los parámetros de alta calidad como materia prima para la fabricación del cemento. En particular, las concentraciones de carbonato de calcio en las muestras analizadas son elevadas, superando el 80% en 11 de las 13 muestras analizadas. Los datos presentan una distribución simétrica, con la mayor frecuencia en el intervalo del 89-91%. Las concentraciones máximas incluso superan el umbral del 96% en la zona central. Por otro lado, las concentraciones en el rango inferior del 80% se limitan al centro-norte de los valores anómalos. Estos resultados son coherentes con las unidades litológicas observadas en campo en este sector, donde se registran concentraciones de CaCO_3 de hasta 96,6% en las calizas. Por otro lado, la concentración más baja de este compuesto, 71,80%, se encuentra en zonas de lutitas intercaladas con niveles calcáreos, generando una aparente dilución de la concentración.

En cuanto a los óxidos penalizantes como el MgO , sus concentraciones son mayoritariamente (11 de 13 muestras) menores al 1%, con una distribución claramente asimétrica positiva (hacia valores más bajos). La mayor frecuencia se ubica en el intervalo de 0,28-0,41%. Localmente, la concentración máxima de este óxido alcanza el 1,52%, y se limita a la zona central del área de estudio. Esto sugiere que el área presenta calizas con una composición geológica consistente, y con niveles bajos de impurezas.

La distribución espacial de las concentraciones de carbonato de calcio (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2) y óxido de magnesio (MgO) en el área de estudio de Méndez revela patrones geoquímicos distintos. Los datos muestran una notable homogeneidad en las concentraciones de CaCO_3 , con valores altos que favorecen su uso industrial para el sector del cemento. En contraste, el SiO_2 presenta una alta variabilidad, con una desviación estándar significativa, indicando diversidad litológica. Las concentraciones de MgO son bajas y uniformes, reflejando una composición geológica consistente con menores impurezas. Estos resultados subrayan el potencial del área como posible fuente de materiales calcáreos de alta calidad y destacan la

necesidad de estudios adicionales para cuantificar y evaluar de manera más precisa los recursos disponibles en el subsuelo.

Para la industria del cemento [19], los porcentajes mínimos y máximos de óxidos en las materias primas (hierro, sílice, caliza y arcilla) para la fabricación de cemento, tales como SiO_2 , MgO , y CaCO_3 , se encuentran dentro de los rangos permisibles. Incluso, el contenido de elementos penalizantes se encuentran en porcentajes permisibles con valores aceptables.

La caracterización litológica, estructural y estratigráfica, junto con la continuidad lateral y potencialmente vertical de los estratos calcáreos y la escasa sobrecarga de suelo (<3m), permitió identificar importantes ventajas para la ejecución de labores exploratorias avanzadas.

Además, la geometría de los estratos calcáreos, la libre disponibilidad de concesiones, caminos de acceso, la presencia de líneas eléctricas de alta tensión, la logística favorable y el hecho de que se encuentran fuera del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), son factores cruciales que facilitan el desarrollo de futuras fases de exploración y posibles expansiones laterales más allá del área de estudio de la presente investigación.

6.2 Recomendaciones

Es esencial respaldar la investigación y exploración en el área de estudio y sus áreas circundantes para incrementar la confiabilidad del potencial estimado en el presente trabajo y cuantificar los recursos de las calizas en profundidad mediante técnicas de geofísica avanzada y campañas de perforación acompañadas de análisis geoquímicos y petrográficos. Además, es necesario evaluar el potencial de las rocas adyacentes a los paquetes calcáreos, incluyendo rocas supra e infrayacentes como areniscas y lutitas, que también pueden contribuir al proceso de elaboración de cemento, se recomienda posteriormente ejecutar trabajos de modelamiento geológico y estudios de prefactibilidad.

Asimismo, pese a que no representan el foco principal del presente estudio, se sugiere considerar estudios complementarios de seguimiento y actividades a semidetalle en los diques de granitos pegmatíticos y pórfidos cuarzo-feldespáticos que se encuentran en contacto con calizas y lutitas, ya que estos pueden ofrecer una potencial mineralización económica de minerales metálicos (ej. Au, Cu y otros metales base).

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al área de Geología Económica del IIGE, cuya destacada labor y constante compromiso han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. En particular, extendemos nuestro reconocimiento al Ing. Christian Contreras por su valioso apoyo en la revisión técnica y sus oportunas sugerencias, que contribuyeron de manera decisiva a la finalización de

este artículo. De igual manera, hacemos extensivo nuestro agradecimiento a los revisores, cuyas observaciones y recomendaciones han enriquecido significativamente la calidad del presente trabajo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. W. Baldock, *Geología del Ecuador: boletín de la explicación del mapa geológico de la República del Ecuador, escala 1:1,000.000*. IGM, 1982.
- [2] M. Litherland, "Geological and metal occurrence maps of the Northern Cordillera Real Metamorphic Belt, Ecuador," *BGS-CODIGEM*. British Geological Survey, Keyworth, 1994.
- [3] M. H. Brito S., "Inventario de Materias Primas No Metálicas en el Ecuador. Provincia de Morona Santiago," Quito, Ecuador, 1990.
- [4] GAD Provincial Morona Santiago, "GAD Plan de desarrollo y ejecución de la Zonificación Ecológica Económica ZEE," Macas, 2010.
- [5] P. Baby, M. Rivadeneira, and R. Barragán, *La cuenca Oriente: geología y petróleo*, vol. 144. Institut français d'études andines, 2004.
- [6] P. Baby, M. Rivadeneira, F. Christophoul, and R. Barragan, "Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador," *Fourth ISAG*, Jan. 1999.
- [7] M. Rivadeneira, "LA ARENISCA M-1 EN LA CUENCA ORIENTE ECUATORIANA," 1995.
- [8] R. Barragán *et al.*, "Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Cuenca Oriente del Ecuador," *La cuenca Oriente Geol. y petróleo*, vol. 144, pp. 45–68, 2004.
- [9] W. Roth, "Introducción al Inventario de Materias Primas No Metálicas en el Ecuador," Quito, Ecuador, 1990.
- [10] CODIGEM - BGS, "Mapa Geológico del Ecuador." 1993.
- [11] P. Cornejo, "Depósitos minerales no metálicos del Ecuador," *Esc. Politécnica Nac.*, no. June, p. 37, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.24008.11523.
- [12] G. Aguilera, "Mapa de ocurrencias de minerales no metálicos, (escala: 1:1'000.000)," *INIGEMM*. 2011.
- [13] IIGE, "Memoria Técnica de Ocurrencias de Recursos Minerales No Metálicos. Provincia de Morona Santiago," Quito, Ecuador, 2019.
- [14] IIGE, "Procedimiento Técnico Para El Levantamiento Geológico A Escala 1:100.000," Quito (Ecuador), 2022.
- [15] M. Bustillo Revuelta and C. López Jimeno, "Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras," *Man. evaluación y diseño Explot. mineras*, 1997.
- [16] IIGE, "Técnicas analíticas del laboratorio químico IIGE 2024," Quito, Jan. 2024.
- [17] J. S. Saavedra Riaño, "Modelamiento Geológico Minero Y Cálculo De Reservas De La Mina Támesis I En Las Veredas De Agualinda Y Juan Frio, De Los Municipio De Los Patios Y Villa Del Rosario, Norte De Santander", 2016.
- [18] O. Lepin and J. Arisosa, "Búsqueda, exploración y evaluación geológicoeconómica," *La Habana Pueblo Educ. y Ciudad*, 1968.
- [19] INEN, "Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 152:2010. Cemento Portland – Requisitos," Quito (Ecuador), Ecuador, 2010.
- [20] UNACEM, "Guía de Calidad," 2021.
- [21] J. Almeida, M. Rocha, and A. Teixeira, "Spatial Characterization of Limestone and Marl Quality in a Quarry for Cement Manufacturing," pp. 399–408, 2005, doi: 10.1007/978-1-4020-3610-1_40.
- [22] J. Michel *et al.*, "Marine carbonate factories: a global model of carbonate platform distribution," *Int. J. Earth Sci.*, vol. 108, no. 6, pp. 1773–1792, Sep. 2019, doi: 10.1007/S00531-019-01742-6/METRICS.
- [23] V. K. Sissakian, M. J. Hamawandy, and R. K. Ibrahim, "Industrial Assessment of the Carbonate Rocks of the Pila Spi Formation at Haibat Sultan Mountain, Iraqi Kurdistan Region," *ARO-THE Sci. J. KOYA Univ.*, vol. 8, no. 1, pp. 24–30, Mar. 2020, doi: 10.14500/ARO.10546.
- [24] A. Graham, "The andes: A geological overview from a biological perspective," *Ann. Missouri Bot. Gard.*, vol. 96, no. 3, pp. 371–385, 2009, doi: 10.3417/2007146.
- [25] E. Jaillard *et al.*, "Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northern Chile," *Tecton. Evol. South Am. Ed. by Cordani, UG, Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, DA, Rio Janeiro, Brazil*, pp. 481–559, 2000.
- [26] E. Carrillo *et al.*, "Sedimentary evolution of a Late Triassic salt giant and a synchronous carbonate unit between the Peruvian Andean Cordillera and the Brazilian Amazonian foreland," *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, vol. 107, no. 1, pp. 123–150, Jan. 2023, doi: 10.1306/08072221104.

- [27] C. Vallejo *et al.*, “Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of Ecuador: Implications for the paleogeographic evolution of northwestern South America,” *Glob. Planet. Change*, vol. 204, p. 103555, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103555>.
- [28] P. Reyes *et al.*, “Quaternary deflection of the Macuma River as it crosses the actively growing Cutucú antiformal culmination in southeastern Ecuador,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 151, p. 105264, Jan. 2025, doi: [10.1016/J.JSAMES.2024.105264](https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2024.105264).
- [29] J. Garland, J. Neilson, S. E. Laubach, and K. J. Whidden, “Advances in carbonate exploration and reservoir analysis,” *Geol. Soc. Spec. Publ.*, vol. 370, no. 1, pp. 1–15, 2012, doi: [10.1144/SP370.15](https://doi.org/10.1144/SP370.15).