

**INFORME DE PRÁCTICA PARA EL APOYO EN LA PLANIFICACIÓN
DE EXPLORACIÓN, REPORTES PARA LAS AUTORIDADES MINERAS,
INFORMES MENSUALES DE PRODUCCION Y OTRAS ACTIVIDADES
REALIZADAS EN CEMEX COLOMBIA S.A.**

MARISOL GALVIS VARGAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Geóloga

Asesores:

Institucional: Mauricio Alvarán Echeverri

Empresarial: Juan Rafael Suárez Giraldo

Ana María Álvarez Ramírez

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

2023



ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Aprobado

AGRADECIMIENTOS

iii

A Alba Luz, mi madre, por su valentía, sacrificio y esfuerzo, por ser incondicional, por permitirme estudiar y por su vida; es mi mayor inspiración y mi faro en la oscuridad.

A mi abuela por su amor, su apoyo y estar siempre a mi lado, es mi fortaleza.

A mi familia, por acompañarme en el proceso y a mis amigos por hacerlo inolvidable y
llevadero.

Agradezco a la empresa CEMEX Colombia, a el área de materias primas, especialmente al Geólogo Juan Rafael Suárez y la Ingeniera Ana María Álvarez, por todo el conocimiento que me brindaron, por su paciencia, por su calidad, sus enseñanzas han enriquecido mi formación de manera excepcional, su generosidad y apoyo han dejado una huella indeleble en mi camino
académico y profesional.

Agradezco profundamente a la Universidad de Caldas, al profesor Mauricio Alvarán por su tiempo, por compartir su conocimiento y por contribuir a la realización de este informe.

A todos los que de alguna forma contribuyeron con este proceso, gracias infinitas.

Tabla de contenido

iv

1. RESUMEN	ix
2. INTRODUCCION	x
3. OBJETIVOS	xi
4. GENERALIDADES	1
4.1 LEGISLACIÓN MINERA	1
4.1.1 Ley 681 de 2001- Código de Minas: (Ley 685 de 2001, 2001).....	1
4.1.2 Resolución 100 de 2020 - Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR): (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, 2018).....	2
4.2 Materias primas para la elaboración del cemento.....	5
5. METODOLOGÍA.....	8
5.1 Apoyo en elaboración de PTO.....	8
5.2 Visita Pedagógica.....	9
5.3 Prospección de Aluminio.....	9
5.4 Informes de producción	10
5.5 Muestreo Mina El Suspiro	10
6. RESULTADOS.....	11
6.1 Apoyo elaboración de Programas de Trabajos y Obras (PTO) para el título 0745-73. 11	
6.1.1 Localización.....	11
6.1.2 Geología.....	12
6.1.3 Geología Estructural	16
6.1.4 Hidrogeología	17
6.1.5 Cálculo de Recursos y Reservas Minerales	17

6.2	Apoyo elaboración de Programas de Trabajos y Obras (PTO) para el	v
	título 15823.	19
6.2.1	Localización.....	19
6.2.2	Geología.....	20
6.2.3	Geología Estructural	22
6.2.4	Hidrogeología	22
6.2.5	Cálculo de Recursos y Reservas Minerales	23
6.3	Visita Pedagógica Planta Caracolito.....	24
6.4	Prospección de Aluminio para plantas CEMEX S.A.....	29
6.4.1	Búsqueda bibliográfica	31
6.4.2	Salida de campo	41
6.5	Informes de producción y generación de indicadores.....	41
6.5.1	Análisis de producción:.....	42
6.5.2	Análisis de calidad:	43
6.5.3	Costos de producción:.....	44
6.6	Muestreo de Materiales Mina El Suspiro.....	45
6.6.1	Localización.....	45
6.6.2	Geología.....	46
6.6.3	Geología estructural	48
6.6.4	Metodología	48
6.6.5	Resultados.....	49
7.	CONCLUSIONES	51
8.	RECOMENDACIONES.....	52



9. Bibliografía 53

vi

LISTA DE FIGURAS

vii

<i>Figura 1. Clasificación de Recursos y Reservas Minerales según ECRR. Fuente: CCRR (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2018).</i>	4
<i>Figura 2. Metodología para la realización de actividades en la etapa práctica.</i>	8
<i>Figura 3. Mapa de localización Título 0745-73. Fuente: Cemex S.A, 2023.</i>	12
<i>Figura 4. Mapa geología local para el contrato de concesión 0745-73. Fuente: CEMEX S.A, 2023</i>	13
<i>Figura 5. Diagrama de flujo: Metodología para cálculo volumétrico título 0745-73</i>	19
<i>Figura 6. Mapa de Localización título 15823. Fuente: Cemex S.A, 2023</i>	20
<i>Figura 7. Mapa geológico para el contrato de concesión 15823. Fuente: CEMEX S.A, 2023</i>	21
<i>Figura 8. Diagrama de flujo: Metodología para el cálculo volumétrico Título 15823.</i>	24
<i>Figura 9. Fotografía Mina La Esmeralda, Payandé Tolima</i>	26
<i>Figura 10. Fotografía Banda mina donde se realiza el transporte desde la mina hacia la planta.</i>	27
<i>Figura 11. Fotografía Domo recolector y homogeneizador del material.</i>	28
<i>Figura 12. Fotografía Nódulos de Clinker</i>	29
<i>Figura 13. Mapa del tipo de rocas aledañas a la planta de interés. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2002.</i>	36
<i>Figura 14. Mapa de Títulos y solicitudes cercanos a la planta de interés. Tomado de: ANNA Minería, Agencia Nacional de Minería, 2020.</i>	37
<i>Figura 15. Mapa de restricciones ambientales aledañas a la planta de interés. Tomado de: ANNA Minería, Agencia Nacional de Minería, 2020.</i>	39
<i>Figura 16. Gráfica de análisis de producción realizadas mensualmente.</i>	43
<i>Figura 17. Gráfica de análisis de calidad realizadas mensualmente.</i>	43
<i>Figura 18. Gráfica de análisis de costos realizadas mensualmente.</i>	45
<i>Figura 19. Mapa de Localización Título FABI-02 Mina El Suspiro, 2023.</i>	46
<i>Figura 20. Mapa geológico título FABI-02. Tomado de: CEMEX S.A, 2023.</i>	48

LISTA DE TABLAS

viii

<i>Tabla 1. Tabla de títulos y solicitudes vigentes con respecto a las unidades de interés.</i>	37
<i>Tabla 2. Tabla resumen para geoquímica bibliográfica de las unidades de interés.</i>	41
<i>Tabla 3. Resultados geoquímicos para las arcillolitas muestreadas</i>	49

1. RESUMEN

ix

La finalidad de este informe es hacer una compilación de las actividades realizadas en la empresa CEMEX COLOMBIA S.A entre marzo y septiembre del año 2023. La principal actividad de CEMEX se basa en la producción y comercialización de una amplia gama de materiales de construcción, incluyendo cemento, concreto premezclado, agregados y otros productos relacionados con la construcción, es conocida por su enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad social corporativa por lo que ha implementado numerosas iniciativas para reducir su impacto ambiental y promover prácticas de construcción más sostenibles. En cada proyecto realizado durante la etapa de práctica se brindó apoyo en el suministro de información geológica, esto involucró la recopilación y consolidación de información relevante, así como un análisis detallado de la información cartográfica disponible, generación de informes de producción para dar un seguimiento continuo del rendimiento y contribuir a la optimización de los procesos operativos, elaboración de reportes normativos e investigaciones de campo.

2. INTRODUCCION

x

El presente informe detalla los resultados obtenidos durante el período de práctica académica, cuyo enfoque primordial fue apoyar y contribuir en exploración geológica. Esta labor se llevó a cabo a través de la recopilación de datos, la elaboración de informes técnicos, la búsqueda bibliográfica, la aplicación de investigaciones de campo, y toma de muestras. El propósito central de estas actividades fue proporcionar información precisa y actualizada que sirviera como base sólida para la toma de decisiones por parte de las autoridades y profesionales en el ámbito geológico.

Además, se destacó la importancia de elaborar informes técnicos y normativos, cumpliendo estrictamente con las regulaciones vigentes, para respaldar la gestión de proyectos y garantizar su conformidad legal.

La generación de informes mensuales de producción y la creación de indicadores para las plantas bajo la supervisión del área de materias primas en la región constituyeron otro componente fundamental de esta práctica, permitiendo una evaluación continua del rendimiento y la optimización de procesos operativos.

Asimismo, se llevaron a cabo investigaciones de campo, las cuales implicaron la recolección de muestras y datos geológicos in situ. Estas actividades proporcionaron una base sólida para la evaluación de recursos geológicos y la identificación de áreas de interés para futuras exploraciones.

Este informe detalla en profundidad los resultados obtenidos en cada uno de estos objetivos, demostrando el valor agregado que la práctica brindó al campo de la exploración geológica y su contribución a la toma de decisiones informadas en este ámbito crítico.

3. OBJETIVOS

xi

Objetivo General:

Apoyar durante la etapa de práctica en el avance de exploración geológica mediante la recopilación de datos, elaboración de informes técnicos y búsqueda bibliográfica con el propósito de proporcionar a las autoridades y profesionales información precisa y actualizada para la toma de decisiones.

Objetivos Específicos:

- Apoyar labores en la planeación de exploración recopilando y consolidando información y a su vez analizando la información cartográfica.
- Soportar la elaboración de reportes para las autoridades mineras y ambientales teniendo en cuenta las normativas vigentes.
- Realizar informes mensuales de producción y generación de indicadores para las diferentes plantas a cargo del área de materias primas en la región.
- Realizar investigaciones de campo para recolectar muestras y datos geológicos.

4. GENERALIDADES

1

4.1 LEGISLACIÓN MINERA

La normativa minera en Colombia ha experimentado importantes cambios en los últimos años con el objetivo de promover el desarrollo sostenible y responsable de la industria minera en el país; a continuación, se plantean las generalidades para la normatividad aplicada durante el desarrollo de la práctica principalmente con respecto a la exploración minera.

4.1.1 Ley 681 de 2001- Código de Minas: (Ley 685 de 2001, 2001)

El Código de Minas en Colombia es aquel que establece los requisitos y procedimientos para la exploración, explotación y aprovechamiento de los recursos minerales y regula la actividad minera en el país. Su objetivo principal es que la industria minera se desarrolle de forma sostenible, teniendo en cuenta tanto los intereses económicos como la protección del medio ambiente y los derechos de las comunidades locales.

En el capítulo II del código de Minas, denominado “Derecho a explorar y a explotar” se plantea la definición de título minero en el artículo 14, el cual plantea que solamente se puede explorar y explotar minas de propiedad estatal mediante un contrato de concesión minera que debe ser inscrito en el Registro Minero Nacional.

Este contrato de concesión se define en el artículo 45 como aquel efectuado entre un particular y el estado, su objetivo es realizar por cuenta y riesgo del particular los estudios y trabajos de exploración de minerales que son propiedad estatal. Por otra parte, el contrato permite la explotación de dichos minerales de acuerdo con los términos y condiciones establecidos en este.

Con respecto a los trabajos exploratorios, (Capítulo VIII), especifica en el artículo 78 que el concesionario está obligado a realizar la exploración necesaria para determinar la existencia,

ubicación del mineral, geometría, cantidad, calidad, viabilidad técnica de la explotación 2
y posibles impactos que pueda tener para el medio ambiente.

Una vez realizados los estudios y trabajos de exploración, antes del vencimiento de este periodo se debe presentar para la aprobación de la autoridad el Programa de Trabajos y Obras de Explotación (PTO) que será adicionado al contrato y debe tener los siguientes elementos según el artículo 84:

- ✓ Delimitación definitiva del área de explotación.
- ✓ Mapa topográfico del área de explotación.
- ✓ Detallada información cartográfica del área
- ✓ Ubicación, cálculo y características de las reservas que habrán de ser explotadas en desarrollo del proyecto.
- ✓ Descripción y localización de las instalaciones y obras de minería, depósito de minerales, beneficio y transporte y, si es del caso, de transformación.
- ✓ Plan Minero de Explotación, que incluirá la indicación de las guías técnicas que serán utilizadas.
- ✓ Plan de Obras de Recuperación geomorfológica paisajística y forestal del sistema alterado.
- ✓ Escala y duración de la producción esperada.
- ✓ Características físicas y químicas de los minerales por explotarse.
- ✓ Descripción y localización de las obras e instalaciones necesarias para el ejercicio de las servidumbres inherentes a las operaciones mineras.
- ✓ Plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura.

**4.1.2 Resolución 100 de 2020 - Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR):
(Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, 2018)**

Colombia ha adoptado el estándar de recursos y reservas, un marco normativo que 3
establece los criterios y procedimientos para la estimación, clasificación y reporte de los recursos y reservas minerales. Estándar que se basa en principios internacionales reconocidos y busca garantizar la transparencia, la consistencia y la confiabilidad en la información sobre los recursos y reservas minerales. Su implementación contribuye a una evaluación precisa de los proyectos mineros, brindando una base sólida para la toma de decisiones, la planificación adecuada y el desarrollo sostenible de la industria minera en Colombia, es general y está enfocado en describir los aspectos de transparencia, materialidad, competencia e imparcialidad necesarios para garantizar veracidad en la información de recursos y reservas reportada a inversionistas e instituciones gubernamentales; fue acogido desde 2018 por la Agencia Nacional de Minería para la presentación de PTO, PTI (Plan de Trabajo e Inversiones) y demás documentos técnicos.

El ECRR también establece un marco de referencia para la categorización de las estimaciones de tonelaje y tenor para los Recursos y Reservas Minerales teniendo en cuenta el grado de confianza geo científica que dependen de la evaluación técnica y económica de estos. (Figura 1).

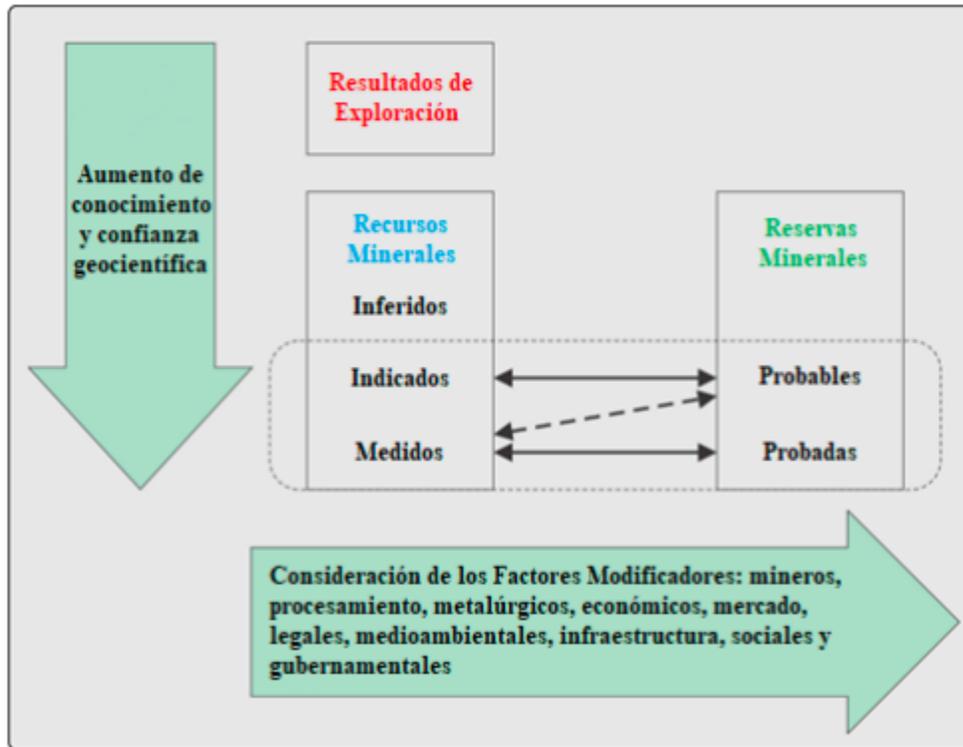


Figura 1. Clasificación de Recursos y Reservas Minerales según ECRR. Fuente: CCRR (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2018).

Un Recurso Mineral es definido según este estándar como una concentración de material sólido que tiene interés económico teniendo en cuenta su forma, cantidad, tenor o calidad, y tiene posibilidad de una extracción económica teniendo en cuenta la certeza geológica. Estos se categorizan de la siguiente forma:

Recurso Mineral Inferido: Es aquel que se aplica a situaciones donde se identifica una concentración de un mineral y el registro de mediciones es limitado lo que indica que la evidencia geológica es suficiente para asumir mas no para verificar la continuidad geológica, tenor o calidad.

Recurso Mineral Indicado: Es aquel que se aplica cuando la naturaleza, calidad, cantidad y demás factores permiten dar una interpretación confiable de la geología y permite asumir la continuidad de una mineralización.

Recurso Mineral Medido: Es aquel que se aplica cuando la naturaleza, calidad, cantidad y demás factores permiten asegurar un alto nivel de confianza y no dejan duda sobre su tonelaje y tenor. 5

El ECRR también clasifica las Reservas Minerales y establece que son aquellas porciones de los Recursos Minerales que posterior a la aplicación de los factores modificadores da como resultado la base de un proyecto viable tanto técnica como económicamente por lo tanto al preparar una declaración sobre Reservas Minerales, inicialmente, se debe desarrollar la información de los Recursos Minerales sobre los cuales dichas reservas están basadas y están divididas de la siguiente forma:

Reserva Mineral Probable: Es aquella de calidad suficiente para basarse en una decisión sobre el desarrollo de un depósito.

Reserva Mineral Probada: Es aquella que representa el nivel más alto de confianza en cuanto a Reservas e implica confianza en la continuidad geológica.

4.2 Materias primas para la elaboración del cemento

Para la fabricación de cemento se pueden utilizar tanto rocas o minerales de origen natural, como productos o subproductos industriales. Dependiendo de sus propiedades químicas y físicas, éstos se clasifican normalmente como materias primas principales, materias primas correctoras y materias primas alternas. La producción de cemento es un proceso que involucra varias materias primas clave, las cuales desempeñan un papel fundamental en la calidad y propiedades finales del producto.

Durante el proceso de fabricación de cemento, las materias primas principales y las correctivas se combinan para formar minerales sintéticos, que a su vez forman el Clinker. El Clinker está formado por más de 70% de silicatos de calcio, siendo el restante aluminatos y ferro-

aluminatos de calcio. Los elementos principales del clinker: calcio, silicio, aluminio y hierro, requieren ser proporcionados por las materias primas usadas, y para ello se deben de seleccionar las más adecuadas, sin olvidar que éstas pueden contener otros elementos minoritarios que pueden aportar un comportamiento perjudicial para el proceso o la calidad y las cuales se deben corregir con los materiales correctores. 6

Para la producción de Clinker el primer paso es la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de cemento, las materias primas comunes incluyen caliza, arcilla y mineral de hierro, las cuales se extraen de canteras o minas. En cuanto a la caliza su principal función es proporcionar el componente calcáreo necesario para la formación de los compuestos químicos clave, como el silicato tricálcico (con símbolo C_3S) y el silicato dicálcico (con símbolo C_2S), los cuales son responsables de la resistencia y capacidad de fraguado del cemento; mientras la arcilla tiene como función proporcionar los componentes de silicio, aluminio y hierro necesarios para la formación de los compuestos químicos adicionales presentes en el cemento, como el aluminato tricálcico (con símbolo C_3A) y el ferritoaluminato tetracálcico (con símbolo C_4AF) para la formación de este componente, se necesita la presencia de mineral de hierro o alguna fuente ferruginosa, como calamina o arcilla ferruginosa, que contribuyen de igual forma a la resistencia y propiedades de fraguado del cemento.

Seguidamente estos materiales se trituran y muelen en partículas más pequeñas; la caliza y la arcilla se combinan en proporciones específicas para obtener una mezcla homogénea de materia prima cruda o también llamada harina cruda. La mezcla de caliza y arcilla se alimenta en un horno rotatorio junto con otros componentes, como mineral de hierro, puzolanas y demás adiciones necesarias para el tipo de cemento que se está produciendo.

La mezcla de harina cruda se introduce en un horno rotatorio que se calienta a 7 temperaturas extremadamente altas, generalmente entre 1,450°C y 1,500°C. Durante la cocción, las reacciones químicas tienen lugar en la mezcla, lo que conduce a la formación de Clinker que es una masa sólida de gránulos esféricos o nodulares.

El Clinker caliente que sale del horno se enfría rápidamente para evitar la formación de fases no deseadas y para prepararlo para la siguiente etapa de procesamiento. El enfriamiento se realiza generalmente en un enfriador rotativo o mediante la inyección de aire frío.

Para el almacenamiento y molienda final, el clinker enfriado se almacena en silos antes de ser molido en un molino de cemento junto con pequeñas cantidades de yeso (sulfato de calcio) y otros posibles aditivos. La molienda final tiene como objetivo obtener un polvo fino que es el cemento final.

El proceso de formación del Clinker en el cemento es crítico para la calidad y las propiedades del producto final. La composición precisa de las materias primas y las condiciones de cocción en el horno son factores clave que influyen en la calidad del Clinker y, por lo tanto, en la calidad del cemento resultante.

5. METODOLOGÍA

8

Con el propósito de alcanzar los objetivos de la práctica, tanto los de carácter general como los específicos, se llevaron a cabo una serie de actividades. Estas actividades abarcaron un amplio espectro de acciones especificadas a continuación las cuales son (Figura 2):



Figura 2. Metodología para la realización de actividades en la etapa práctica.

5.1 Apoyo en elaboración de PTO

Durante la etapa practica se dio apoyo en la actualización del Plan de Trabajos y Obras (PTO) para los títulos 15823 y 0745-73, ubicados en Payandé Tolima y Rotinet Atlántico, respectivamente; ambos propiedad de la empresa CEMEX Colombia; las principales actividades realizadas se basaron en compilación de datos existentes de los anteriores PTO o anteriores proyectos de investigación para cada título correspondiente, como información cartográfica, hidrogeológica, hidrológica, estructural y geotécnica; con respecto a la información geotécnica se realizaron bases de datos con los resultados de laboratorio arrojados en el estudio de suelos de cada

título con el fin de resumir los mismos y posteriormente hacer un análisis de estabilidad y propiedades geo mecánicas del suelo. Para el capítulo de Recursos y Reservas Minerales se brindó apoyo de igual forma en la elaboración de bases de datos con información de pozos de perforación u otros análisis útiles para modelar, como los SEV, en el software Geovia Surpac; estas bases de datos son utilizadas para incluir toda la información en el software para modelar y posteriormente realizar el cálculo del volumen de Recursos y Reservas.

5.2 Visita Pedagógica

Al inicio de la etapa práctica, como proceso de inducción se realizó una visita pedagógica a la Planta Caracolito, ubicada en el corregimiento de Payandé Tolima, planta encargada de producción y elaboración del cemento de la empresa CEMEX Colombia; dicha visita se realizó a esta planta ya que es la mayor productora de la empresa a nivel Nacional. Esta visita se realizó con el fin de conocer todas las etapas para producción del cemento desde la extracción de la materia prima hasta el empaquetado del producto final; la cual parte en la extracción de la caliza en la Mina, extracción que se realiza con voladura, posterior a la extracción se realiza la trituración de la caliza para ser transportada hacia la planta, se observó el mecanismo de acumulación de la caliza y los demás materiales utilizados para producir el cemento; el mecanismo de producción del Clinker y finalmente la molienda del Clinker con las adiciones para formar el cemento y ser empacado.

5.3 Prospección de Aluminio

Durante la etapa practica se brindó apoyo en la prospección de aluminio para una planta de cemento de la empresa CEMEX Colombia, el apoyo se realizó desde el inicio de proyecto hasta la previa visita a campo; dicho apoyo se basó inicialmente en la búsqueda y compilación de la información geológica disponible por parte del Servicio Geológico Colombiano, con el fin de

conocer el tipo de rocas aledañas a la planta y cual sería de mayor interés para el proyecto de prospección; posteriormente se realizó el análisis de títulos y solicitudes para cada formación geológica con información que se descargó y compiló de la plataforma ANNA Minería de la Agencia Nacional de Minería, donde la información fue descargada en archivo shape y posteriormente fue superpuesta con la información geológica con el fin de ir disminuyendo el área de interés; posteriormente, en la misma plataforma se realizó la descarga de las capas de restricciones ambientales para determinar si la zona puede ser utilizada para una futura explotación.

10

5.4 Informes de producción

Los informes de producción y costos son informes realizados cada mes durante toda la etapa práctica, estos se basan en la compilación de datos de producción de cemento y utilización de caliza y demás materiales que son enviados por cada planta; así como los costos de producción del cemento. Una vez se tienen los archivos con la información disponible de cada planta se procede a actualizar los datos en tablas de Excel para el mes correspondiente y realizar la actualización de las fórmulas para luego generar gráficas que son las utilizadas para el análisis de producción y costos por parte del equipo de materias primas, dichas gráficas se realizan para las plantas de CEMEX en Colombia, Panamá, República Dominicana, Nicaragua, Trinidad y Jamaica.

5.5 Muestreo Mina El Suspiro

En la Mina el Suspiro, ubicada en el municipio Los Patios, Norte de Santander, propiedad de CEMEX Colombia se brindó apoyo en el muestreo de arcillolitas pertenecientes a la formación Capachos, dichas muestras se recolectaron en 4 puntos de la formación por medio del método de canal con el fin de tener mayor material de análisis y cumplir el principio de

equiprobabilidad en el muestreo; estas muestras fueron llevadas al laboratorio de la planta Los Patios donde se realizó análisis geoquímico a todas las muestras; una vez expuestos los resultados por parte del laboratorio se procede a hacer análisis de la cantidad de aluminio existente para determinar la utilidad de dichas arcillolitas. 11

6. RESULTADOS

6.1 Apoyo elaboración de Programas de Trabajos y Obras (PTO) para el título 0745-73.

El contrato de concesión 0745-73 pertenece a Cemex Colombia S.A, del cual se extraen rocas de origen volcánico, puzolana y basalto. Se localiza en los municipios de San Luis e Ibagué en el departamento del Tolima para el cual se realizó la actualización del PTO bajo los estándares CRIRSCO buscando dar cumplimiento a la normativa establecida por la autoridad minera y de igual forma actualizar el volumen de producción que indique la vida útil del proyecto minero, requerimiento para el cual se brindó en apoyo en la investigación bibliográfica, realización de bases de datos, anexos y cálculo de recursos y reservas.

De acuerdo con la disposición geológica del mineral de interés y la ubicación estructural del complejo minero de la compañía, se busca desarrollar y optimizar el consumo de puzolana, como adición del proceso industrial de la compañía en la producción de cemento.

A continuación, se muestran las generalidades con respecto al título ya que se debe cumplir el contrato de confidencialidad firmado al ingresar a la compañía.

6.1.1 Localización

El título minero 0745-73, se encuentra ubicado en el corregimiento de Payandé y la Vereda El Hobo, del municipio de San Luis, del Departamento del Tolima, el cual se encuentra a una altura de 655 msnm, (Figura 3).



Figura 3. Mapa de localización Título 0745-73. Fuente: Cemex S.A, 2023.

6.1.2 Geología

A continuación, se describe la estratigrafía de las unidades en orden cronológico y secuencial donde se ubica el título; estas son de edades triásico, jurásico, neógeno y sedimentos cuaternarios. (Figura 4)

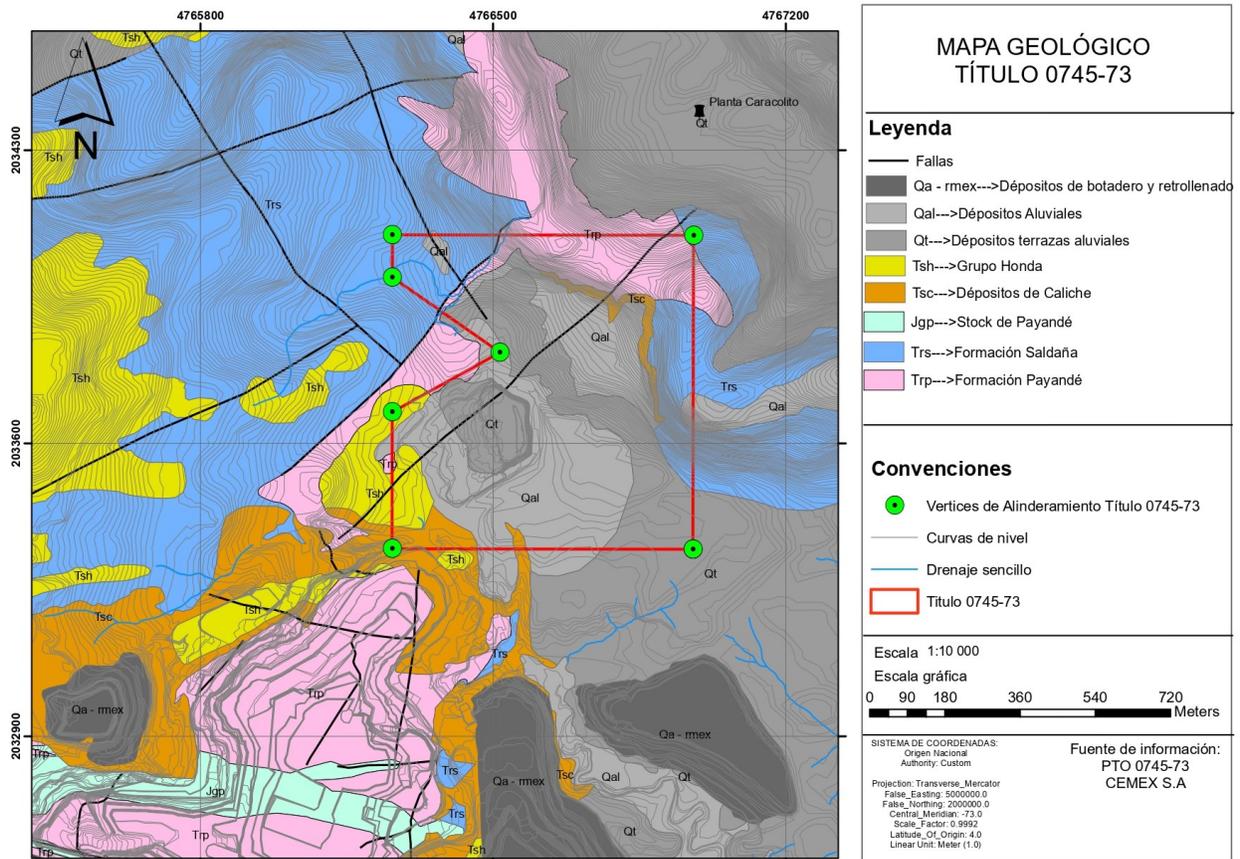


Figura 4. Mapa geología local para el contrato de concesión 0745-73. Fuente: CEMEX S.A, 2023

6.1.2.1 Triásico

- Formación Payandé (Trp).

Conformada por calizas grises con componente silíceo y arenoso, limolitas y lodolitas además de intercalaciones de chert; estratigráficamente INGEOMINAS divide esta formación en Tercio Inferior, Medio y Superior; el Inferior consta de 80 a 90 m de espesor y consta de niveles arenosos y arcillosos; la mayoría de las calizas en este sector son de origen detrítico con granos de cuarzo. Con respecto a los tercios Medio y Superior no se encuentran horizontes arenosos o arcillosos y la caliza es de origen químico principalmente.

Hacia el sector occidental del título ocurren calizas con metamorfismo de contacto asociado con el Stock de Payandé; sin embargo, en algunos sectores el contacto entre la Formación Payandé y el Stock de Payandé es fallado o discordante; como efectos más notorios se presentan sobre la Formación Payandé, ocasionados por las intrusiones son marmorización y aureolas de skarn. Asociada a esta formación se presenta una unidad denominada como caliche, que siempre se localiza en la parte superior de la secuencia calcárea. 14

Con base a correlaciones bioestratigráficas se intuye que la depositación de esta formación fue en el Triásico Tardío y que corresponde a una sedimentación marina de aguas cálidas y someras en paleo ambientes de infralitoral a litoral. (INGEOMINAS, 2002)

- Formación Saldaña (Trs).

Unidad conformada por rocas volcano-piroclásticas, estratigráficamente divididas en dos segmentos, el segmento 1 compuesto por intercalación de vulcanitas y tobas con capas de arenitas y calizas arenosas; el segmento 2 compuesto por intercalación de arenitas, conglomerados, limolitas y algunas vulcanitas y tobas. (INGEOMINAS, 2002).

Según INGEOMINAS los fósiles son escasos en esta formación, sin embargo, Wiedmann & Mojica (1980), (en Mojica & Llinás, 1984), reportan fósiles característicos del Triásico tardío en la parte inferior de la unidad.

Se localiza al Suroriente de Payandé y se presenta de manera discontinua, especialmente hacia el extremo oriental, dónde está cubierta (en contacto discordante) por las unidades paleógenas y neógenas y materiales cuaternarios del abanico de Ibagué. Los materiales de esta unidad no serán intervenidos por las actividades que se proyectan para el presente título.

6.1.2.2 Jurásico

- Stock de Payandé (Jgp).

Cuerpo intrusivo aflorante hacia la zona central en forma de diques a pequeña escala 15

y occidental del área de influencia, intruye las rocas adyacentes con presencia de diques y metamorfismo de contacto. Según INGEOMINAS está formado litológicamente por cuarzodiorita a granodiorita de grano medio y color gris claro, se encuentra intruyendo las rocas más antiguas formando metamorfismo de contacto generando marmorización y aureolas sobre la formación Payandé; los materiales de esta unidad no serán intervenidos por las actividades que se proyectan para el presente título. (INGEOMINAS, 2002)

6.1.2.3 Neógeno

- Grupo Honda (Tsh).

Estratigráficamente ha sido dividido en dos miembros según INGEOMINAS; segmento inferior formado por capas de arenitas conglomeráticas feldespáticas y líticas con cantos de andesitas y rocas metamórfica con alto contenido de micas y minerales pesados intercaladas con capas delgadas de lodolitas rojas abigarradas que forman pequeños valles; el segmento superior está formado por alternancia de arenitas cuarzo-feldespáticas de grano medio que contienen cantos de andesitas con estratificación cruzada intercalados con arcillolitas fisiles.

El límite superior es discordante bajo los depósitos cuaternarios del Abanico de Espinal y el Guamo.

- Depósito de Caliche (Tsc).

Está ubicado en la zona central del área de explotación, se ha catalogado como un depósito de origen continental que está formado por fragmentos de caliza, limolitas y granodiorita envueltos en una matriz arcillosa que está enriquecida de carbonatos debido a la disolución de las calizas de la formación Payandé; al occidente de la zona está enriquecido en fragmentos de rocas intrusivas,

areniscas y conglomerados que provienen de la erosión del Stock de Payandé y la Formación Luisa. (Cemex S.A, 2023) 16

6.1.2.4 Cuaternario

- Abánico de Ibagué (Qt).

Se trata de la unidad de interés para este título; unidad formada por una serie de depósitos volcanoclásticos generados por eventos de actividad volcánica del volcán Nevado del Tolima que está compuesto por cantos, clastos, guijarros y bloques de carácter polimíctico sobre una matriz arcillosa; se presenta al norte y oriente de Payandé sobre márgenes del Río Coello. (Cemex S.A, 2023)

Corresponde a depósitos cuaternarios de arena y gravas a nivel de profundidad y en su parte media de arenas puzolánicas; estas puzolanas se encuentran formadas por sedimentos arenosos con tamaño de grano medio a grueso, fragmentos de pómez y piroclastos colores marrón claro a grisáceo; matriz soportados y con tendencia a estar sueltos.

Según INGEOMINAS no hay registro de dataciones para el Abanico de Ibagué, pero al estar suprayacidos por depósitos del Volcán Cerro Machín datados para 5.100 años antes del presente, diferentes autores consideran esta formación de edad pleistocena. (INGEOMINAS, 2002)

- Depósitos Aluviales (Qal).

Está presente en el área oriental de la zona, principalmente sobre la vertiente del drenaje El Salado; está compuesto por limos, arenas y gravas de variada composición con clastos constituidos por fragmentos de caliza, limolita, granodiorita, arenisca conglomerática, son angulosos y de tamaño variable.

6.1.3 Geología Estructural

En el marco tectónico regional del Municipio de San Luis - Tolima, lugar donde se ubica el área de interés está afectado por fallas en dirección E-W y N-NE caracterizadas como fallas Salitre, Hondura, Gobernador, Contreras, La Cañada, Tomín y Tomogó; por otra parte, también se destacan el sinclinal San Anastasio y los anticlinales Cerro Gordo y Gallego; sin embargo no tienen influencia en el área del título. (EOT, Alcaldía de San Luis, Tolima. 2001). 17

6.1.4 Hidrogeología

El área del título cuenta con un sistema hidrológico que corresponde a un sistema profundo regional que está limitado por los ríos Coello al noroeste y Luisa, los cuales constituyen las principales zonas de descarga del sistema.

Las rocas presentes son de poca permeabilidad (Grupo Honda, Depósito de Caliche, Formación Saldaña, Formación Payandé), y sedimentos antrópicos que, aunque tienen alta permeabilidad no tienen posibilidad de transmitir agua subterránea ya que no están saturados.

Con respecto a las descargas, el río Coello es una zona de descarga de aguas superficiales y del sistema hidrogeológico, donde el agua proviene de la recarga local y de sistema aguas arriba, lo que alimenta el caudal del río y permite que tenga flujo continuo durante todo el año.

6.1.5 Cálculo de Recursos y Reservas Minerales

Teniendo en cuenta evidencia de campo, el logueo de núcleos de perforación e interpretaciones pertinentes a estas labores para proyectar las capas estratigráficas presentes, (evidencia que no puede ser mostrada en el presente informe debido a compromisos de confidencialidad), se realizó un modelo geológico local para la cantera. Este se realizó a partir de secciones geológicas que se construyeron a partir de las litologías encontradas en los núcleos de perforación, con las cuales se evidencia el espesor de cada uno de los materiales y fue modelado en el software minero Geovia Surpac; cuyo procedimiento se evidencia en la Figura 5. A partir de

este modelo se hizo la estimación de Recursos y Reservas y para la clasificación de los recursos de las capas de arenas puzolánicas en el área del título se sigue los parámetros definidos por la “Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR, 2018)” definida anteriormente. 18

6.1.5.1 Parámetros utilizados

Para la estimación y clasificación de los recursos minerales se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- La estimación de los recursos se realizó en el área del título 0745-73 teniendo en cuenta la geometría definida y conocida del cuerpo de interés
- La categorización y estimación de recursos se realizó para las capas de puzolanas presentes en el área de estudio.
- Las capas de materiales que no son de interés presentes en la zona se consideraron como material de descapote o estéril.

6.1.5.2 Metodología para el Cálculo Volumétrico

Para el procedimiento del cálculo volumétrico se utilizó el paquete computacional Surpac. con el cual se crearon los cortes entre sólidos y superficies necesarias para crear los modelos 3D que justifican los recursos minerales, siguiendo los siguientes pasos:

Cálculo volumétrico título 0745-73

Metodología

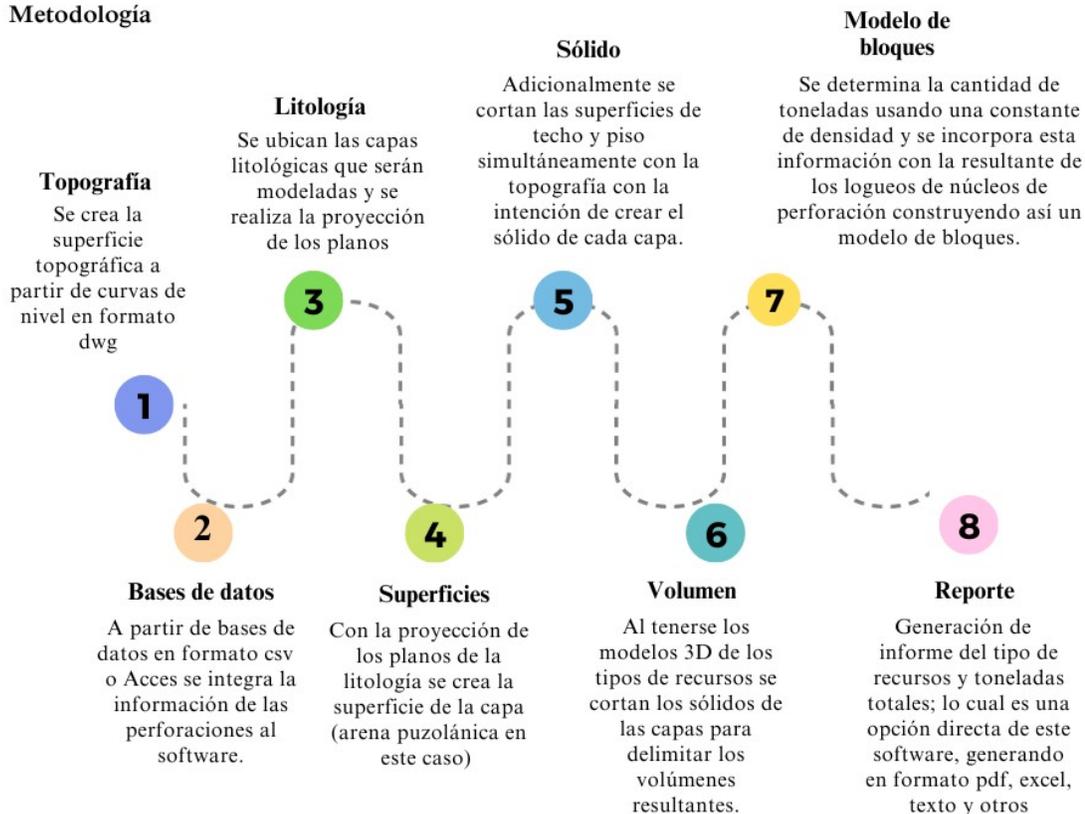


Figura 5. Diagrama de flujo: Metodología para cálculo volumétrico título 0745-73

6.2 Apoyo elaboración de Programas de Trabajos y Obras (PTO) para el título 15823.

El contrato de concesión 15823 pertenece a Cemex Colombia S.A, del cual se explotan arenas y gravas. Para el cual se realizó la actualización del PTO bajo los estándares CRIRSCO buscando dar cumplimiento a la normativa establecida por la autoridad minera y de igual forma actualizar el volumen de producción que indique la vida útil del proyecto minero para el cual se brindó apoyo en búsqueda bibliográfica, realización de bases de datos, anexos y cálculo de recursos y reservas.

6.2.1 Localización

El contrato de concesión 15823 está localizado en jurisdicción del corregimiento de Rotinet en el municipio de Repelón, Atlántico; su extensión es de 58.5 ha. (Figura 6)



Figura 6. Mapa de Localización título 15823. Fuente: Cemex S.A, 2023

6.2.2 Geología

El área de estudio se encuentra en el flanco oriental del anticlinorio de Luruaco, sector norte del Cinturón Plegado de San Jacinto en el norte, sobre la margen occidental del río Magdalena.

A continuación, la descripción litoestratigráfica de las unidades presentes en el área del título y de igual forma las unidades que lo rodean; Figura 7.

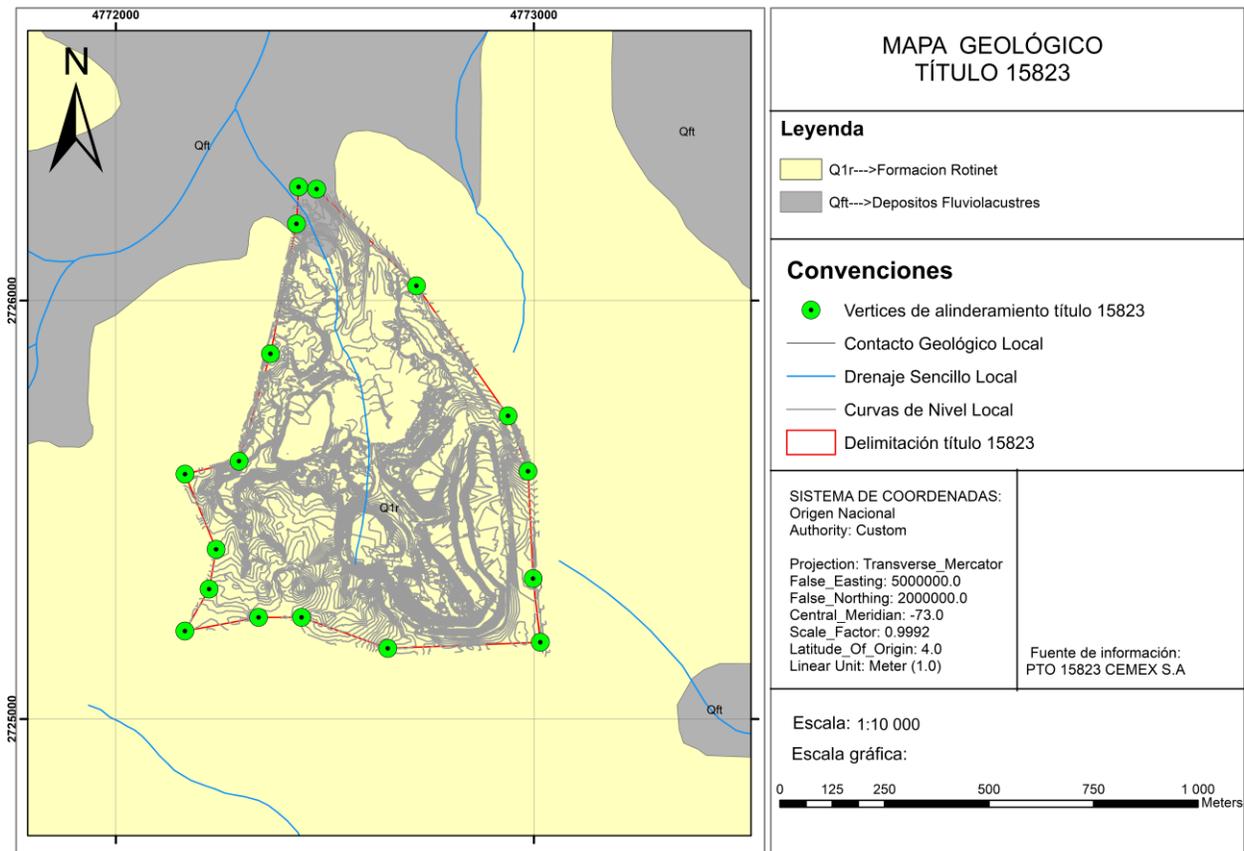


Figura 7. Mapa geológico para el contrato de concesión 15823. Fuente: CEMEX S.A, 2023

6.2.2.1 Cuaternario

- Formación Rotinet (Qpr):

Corresponde a la unidad de interés para el título, esta es extraída para uso en agregado; unidad aflorante entre Sabanalarga y Repelón, bordeando la cuenca que contiene la laguna El Guajaro. Está caracterizada por ser una unidad rudítica y psamítica compuesta por gravas de fragmentos de tobas, arenitas, cuarzo lechoso y chert en capas lenticulares; las arenas son líticas con estratificación cruzada y en algunos sectores están cementadas por calcita. (Cemex S.A, 2023).

La formación Rotinet hace contacto inferior discordante angular con las formaciones Pendales y Las Perdices y sobre ella solo hay depósitos recientes; según INGEOMINAS el ambiente de depósito es fluvial que relaciona con paleocorrientes del río Magdalena, también mencionan restos de vertebrados y relaciones estratigráficas es clasificada en el Pleistoceno inferior. 22

- Depositos Recientes (Qal-Qcal):

Los depósitos de Llanura Aluvial están formados por arcillas, arenas y gravas que fueron depositados por ríos y quebradas actuales, depósitos asociados a llanuras de inundación del río Magdalena que son catalogados como fluvio-lacustres conformados por lodos y arenas intercalados con gravas finas. (Cemex S.A, 2023)

Los depósitos Coluvio-Aluviales están formados por bloques y cantos angulares intercalados con arenas y arcillas y suprayacen depósitos cuaternarios antiguos. (Cemex S.A, 2023).

6.2.3 Geología Estructural

El área del título minero está ubicada sobre el flanco oriental de la subprovincia correspondiente al Anticlinorio de Luruaco y está enmarcada entre la Falla de Sinú al Oeste y la Falla María la Baja al este; esta subprovincia se caracteriza por tener fallas inversas dextrales las cuales son subparalelas a anastomosadas; las estructuras más cercanas a la zona de estudio son: Falla Luruaco, Falla Banco, Falla Henequén, Falla de Sabanalarga, Anticlinorio de Luruaco, Falla de Tubará. (Cemex S.A, 2023).

6.2.4 Hidrogeología

En el área de estudio hay dos sistemas hidrogeológicos, cada sistema es un conjunto de unidades hidrogeológicas en las cuales las características de funcionamiento dependen de la

superficie, profundidad y caso de recarga; el sistema hidrogeológico superior está formado por acuíferos libres, detríticos de la formación Rotinet y depósitos cuaternarios; este sistema es infrayacido por las formaciones Péndales y San Cayetano. 23

El tránsito subterráneo se da por medio de recargas directas e indirectas; la recarga directa se da por la infiltración de precipitaciones a través de las unidades porosas mientras la recarga indirecta en el acuífero se da por contacto lateral con unidades de otros acuíferos. (Cemex S.A, 2023).

6.2.5 Cálculo de Recursos y Reservas Minerales

La actualización del modelo geológico de la mina San Jorge se desarrolló a partir de datos obtenidos en sondeos eléctricos verticales (SEV), con los cuales se evidencia el espesor de cada uno de los materiales y fue modelado en el software minero Geovia Surpac.

A partir de este modelo se hizo la estimación de Recursos y Reservas y para la clasificación de los recursos en el área del título se siguió los parámetros definidos por la “Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR, 2018)” definida anteriormente.

6.2.5.1 Metodología para el Cálculo Volumétrico

Inicialmente la información registrada en el informe geofísico fue recopilada para construir las tablas Survey, Assay (Resistividad para el presente caso), Geology y Collar, con el fin de definir la base de datos para que por medio del software Surpac se construyese el modelo geológico en tres dimensiones y el modelo de bloques para gravas y arenas que corresponde al mineral de interés.

Para la generación del modelo en 3D se analizaron las resistividades obtenidas en los SEV, por compromiso de confidencialidad no se puede exhibir en dicho documentos los resultados del

modelo, sin embargo, en la Figura 8 se observa la metodología empleada para la realización del mismo. 24

Cálculo volumétrico para el título 15823

Metodología

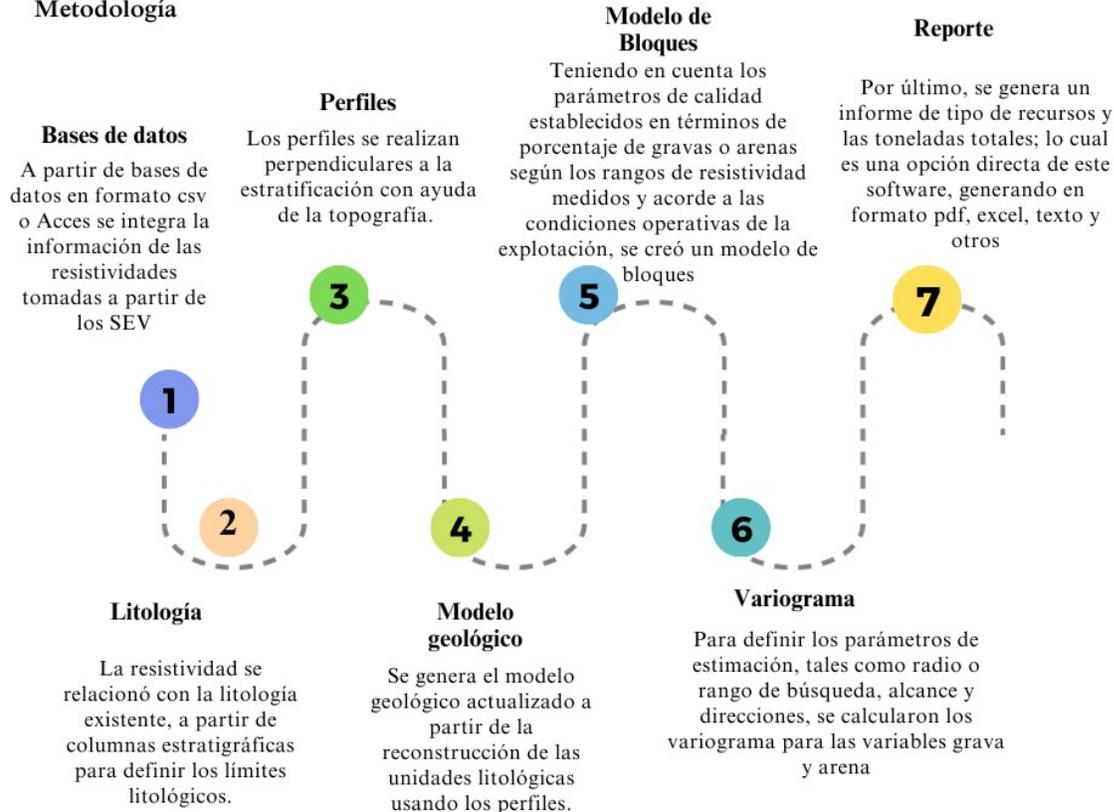


Figura 8. Diagrama de flujo: Metodología para el cálculo volumétrico Título 15823.

6.3 Visita Pedagógica Planta Caracolito

Con el objetivo de profundizar el conocimiento sobre la industria del cemento y comprender minuciosamente el proceso de producción, se realizó una visita pedagógica a la planta Caracolito de CEMEX Colombia ubicada en el corregimiento de Payandé Tolima. En esta visita se tuvo la oportunidad de conocer las complejidades técnicas que subyacen en cada etapa de producción, comenzando desde la extracción primaria del material en la mina; por lo que a

continuación, se explica con detalle los aspectos técnicos y operativos de la fabricación de cemento que fueron mencionados de forma general al inicio de este informe. 25

La Planta Caracolito actualmente es la principal planta productora de cemento de Cemex S.A en Colombia, ya que produce la mayor cantidad de cemento y además Clinker.

El proceso de la producción en esta planta corresponde a un proceso integral, ya que se realiza la extracción y procesamiento en el mismo lugar; para el caso particular de la extracción de material, en este caso caliza se realiza en la Mina La Esmeralda, correspondiente al título 4205 del cual es propietario Cemex Colombia S.A. y también se realiza la extracción de puzolana correspondiente al título 0745-73 (del cual se habla a detalle en el numeral 5.1 de este informe); ambos títulos están ubicados en el mismo sector, uno superpuesto del otro por lo que en el caso de la estratigrafía corresponde a las mismas unidades mencionadas anteriormente en el numeral 5.1.2; sin embargo, para la extracción de caliza cabe aclarar que la unidad de interés en este caso corresponde a la formación Payandé.

En la Figura 9 se observa que las calizas de la formación Payandé están siendo instruidas por diques del stock de Payandé, lo cual influye en la composición química de la caliza y por lo tanto su calidad.



Figura 9. Fotografía Mina La Esmeralda, Payandé Tolima

Esta corresponde a una mina a cielo abierto donde la extracción de caliza se realiza por medio de voladura donde se destroza el material y también por medio de precorte que contribuye a perfilar los taludes y llevar a cabo el diseño minero definido para la mina.

Específicamente para la voladura hay un total de 224 barrenos donde se hospeda el explosivo, estos barrenos se ubican en una malla espaciados a una distancia determinada con respecto al volumen que se desee extraer y la composición química de la caliza, la conexión entre uno y otro se da por medio de una emulsión que permite la conductividad eléctrica para que la explosión se realice de forma sucesiva.

Una vez se extrae la caliza se procede a hacer el cargue por medio de excavadoras y volquetas para luego ser llevada la trituradora con la finalidad de disminuir el tamaño, en este caso

corresponde a una trituradora primaria con mandíbula móvil con el fin de disminuir el tamaño de caliza extraída de la mina. Una vez realizada la trituración se procede al transporte hacia la Planta, el cual se realiza por medio de una banda mina que mide alrededor de 1.6 km que conecta la planta Caracolito con la Mina La Esmeralda. Figura 10



Figura 10. Fotografía Banda mina donde se realiza el transporte desde la mina hacia la planta.

Al final de esta banda Mina se hace la clasificación del material y posteriormente se recolecta en el domo, dentro del cual hay una homogenizadora que por medio de movimientos continuos de 180° reparte el material y hace que se mezcle.



Figura 11. Fotografía Domo recolector y homogeneizador del material.

Una vez en la planta los materiales son recolectados, ya sea directamente de las minas como la caliza o la puzolana y arcillas, yeso, y demás adhesivos correctores se procede a la calcinación de los materiales para formar el Clinker; inicialmente se muele la caliza, arcillas y puzolana para formar la harina cruda que pasa al horno para formar el Clinker, este se funde con temperaturas entre 685°C y 1300°C , luego se enfría y forma nódulos denominados Clinker y luego transportados tal como se observa en la Figura 12.



Figura 12. Fotografía Nódulos de Clinker

A través de la anterior banda transportadora se lleva el Clinker al molino de cemento, donde se mezcla con el yeso y otras adiciones que dependen del tipo de cemento a producir, una vez combinados y molidos se crea el cemento que posteriormente es empacado por máquinas rotativas y finalmente llevado por una banda transportadora al camión.

6.4 Prospección de Aluminio para plantas CEMEX S.A

En la industria del cemento, como se mencionó al inicio de este informe, la caliza es la materia prima principal para su producción, este proceso de producción implica una reacción química llamada calcinación, en la que la caliza se calienta a altas temperaturas en el horno para generar el Clinker. Durante esta etapa, el carbonato de calcio presente en la caliza se descompone

en óxido de calcio (cal viva) y dióxido de carbono (CO₂). La reacción química se representa de la siguiente manera: 30



El CO₂ liberado durante la calcinación es un gas de efecto invernadero que contribuye significativamente al cambio climático al atrapar el calor en la atmósfera. Debido a que el cemento es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, su producción a gran escala resulta en una considerable liberación de CO₂. Se estima que aproximadamente el 6% de las emisiones mundiales de CO₂ provienen de la industria del cemento, según la revista PUCP de Perú (Emisiones de carbono por parte de la industria del cemento vs cemento verde). Esta es una de las razones por las que se ha reconocido la necesidad urgente de reducir las emisiones de CO₂ en el sector. La adopción de tecnologías más limpias y eficientes, así como la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción de cemento, son cruciales para mitigar el impacto ambiental y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

Algunas de las soluciones que se están explorando incluyen la utilización de materias primas menos carbonatadas, el uso de energías renovables en el proceso de producción y la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂. Estos esfuerzos buscan hacer que la producción de cemento sea más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

A partir de la necesidad de generar alternativas para la disminución del dióxido de carbono durante la producción del cemento, parte la prospección de aluminio para algunas plantas ya que este material al usarse como adición en la producción contribuye a la disminución de la cantidad de caliza utilizada y por lo tanto la disminución de CO₂ generado durante la calcinación.

A continuación, se muestran las etapas realizadas para dicha prospección.

6.4.1 Búsqueda bibliográfica

31

- I. Como punto inicial se realiza una compilación de las planchas geológicas ubicadas en un rango de 100 Km alrededor de la planta.

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, sin embargo, no se encuentra libre, sino en rocas y minerales; los minerales característicos típicos de aluminio son: Principalmente la bauxita, gibbsita ($AlOH_3$), bohemita ($AlO(OH)$), diáspora ($AlO(OH)$), silimanita (Al_2SiO_5), corindón (Al_2O_3), criolita (Na_3AlF_6), caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). (Servicio Geológico Colombiano, 2020).

La bauxita es característica por su contenido de aluminio, en cuanto a composición se trata de una mezcla de óxidos de aluminio hidratados, los principales componentes son la gibbsita, bohemita y diasporo. La bauxita es de origen supergénico y se origina en por meteorización prolongada de rocas con contenido alumínico en condiciones tropicales a subtropicales; como rocas con contenido feldespático, silicatos alumínicos como sienita, sientina de nefelina y acumulación de arcillas, es de color blanco, gris, amarillo y rojo con brillo mate a terroso. (Klein, Dana, & Hurlbut, 1997).

Independientemente de la forma como se genere la bauxita, se clasifican como: Depósitos lateríticos formados en la superficie o cerca de ella, generados por meteorización in situ de rocas en condiciones climáticas propicias para esto; cerca del 85% de las bauxitas producidas en el mundo se dan de esta forma. (Gonzalez, 1995). El siguiente tipo corresponde a depósitos en bolsones o en calizas y dolomitas de origen kárstico, las cuales se forman por acumulaciones en los orificios de las calizas; el 14% de las bauxitas producidas en el mundo se dan de esta forma. Finalmente, las clasificadas como depósitos transportados, son aquellas que se dan sobre superficies de rocas meteorizadas, (esta

meteorización no se da in situ) que posteriormente son transportadas y depositadas como estratos. (Gonzalez, 1995). 32

Como se menciona anteriormente el Al_2O_3 se asocia a rocas enriquecidas en feldespatos y minerales tipo filosilicatos como arcillas y micas, así como a la meteorización de basaltos y rocas volcánicas alcalinas, de acuerdo con esto las regiones con altos valores de Al en el territorio colombiano son la Andina, los cinturones esmeraldíferos, la Sierra Nevada de Santa Marta y parte del Macizo Colombiano. (Servicio Geológico Colombiano, 2020). Por lo que, según esto, dicho elemento se encuentra asociado generalmente a rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias con buen contenido arcilloso.

A partir de lo anterior se determina como unidades de interés aquellas unidades conformadas por rocas de composición básica a intermedia; con contenido de feldespatos, ígneas basálticas y aquellas rocas con contenido hornbléndico, anfibolitas, esquistos, dioritas y aquellas que puedan tener minerales con buen contenido aluminico.

A continuación, una breve descripción geológica de las unidades de interés con respecto a la planta que actualmente se está haciendo dicha prospección:

- ✓ **Formación Barroso:** Unidad constituida por lavas basálticas y andesíticas que están intercaladas con tobas y paquetes de chert, lodolitas y grauvacas; los basaltos y andesitas; el material sedimentario que se intercala con los flujos volcánicos tiene fósiles que permiten determinar la edad de las rocas y ha sido asignada en Campaniano-Maastrichtiano (Hall et al., 1972; Álvarez & González, 1978), en (INGEOMINAS, 2002).

El ambiente de formación de esta unidad corresponde a un vulcanismo producido en un ambiente marino determinado de igual forma a partir de la fauna encontrada.

- ✓ **Complejo Arquía:** Corresponde a una franja alargada, estrecha y discontinua de 33 esquistos anfibolíticos, sericiticos, cuarcitas y neises junto a anfibolitas y gabros asociados a cuerpos ultramáficos; esta unidad se encuentra limitada por la Falla Silvia-Pijao al oriente que las separa del Complejo Quebradagrande. (Rodriguez & Arango, 2013).

Los Esquistos de esta unidad corresponde a esquistos verdes con buen desarrollo de esquistosidad intercalados con esquistos cuarzo-moscovíticos con grafito en bandas centimétricas a métricas; las anfibolitas corresponden a rocas de color verde con bandeamiento composicional de plagioclasa, hornblenda y ocasionalmente granate. (Ruiz, y otros, 2012).

- ✓ **Neis y Anfibolitas de Tierradentro:** Según Osorio, et al., 2015 esta es una unidad de edad precámbrica y corresponde a condiciones de formación en facies anfibolita y posiblemente granulitas que luego tuvieron retrogradación a esquistos verdes; está compuesta por neises anfibolíticos, neis cuarzofeldespáticos, neises biotíticos, neis sillimaníticos, cuarcitas, mármoles y granulitas.

La anfibolita presenta estructura foliada, bandeada y masiva que registra paragénesis progradada enmarcada por clorita, actinolita y otros minerales de hornblenda y plagioclasa; con respecto al Neis cuarzo feldespático registra bandeamiento con bandas claras de microclina, plagioclasa y cuarzo y bandas de biotita, moscovita, clorita, epidota y titanita. (Osorio Granada, Vallejo, & Toro, 2015).

- ✓ **Complejo Icarcó:** Corresponde a rocas metamórficas de grado medio a alto que no están muy bien mezclados; está compuesta por anfibolitas, neises de cuarzo, plagioclasa, migmatitas cuarzo-feldespáticas y neis anfibolíticos el cual es el cuerpo principal de este complejo, en algunas ocasiones con estructuras migmatitas con intercalaciones de neises

de cuarzo. Este complejo está intruido por tonalitas, granodioritas y monzogranitos. (Zapata, Rodríguez García, Ramírez, & Correa Martínez, 2022). 34

- ✓ **Complejo Cajamarca:** Corresponde a esquistos actinolíticos, este complejo está delimitado por el sistema de fallas Otú-Pericos y el Sistema de Fallas Romeral; con respecto a la petrografía corresponde a series heterogéneas con cambios texturales paragenéticos, conformados por esquistos máficos, esquistos cuarzo micáceos con o sin grafito, filita, cuarcita y mármoles (Toro, Gómez, & Bedoya, 2005).

Según Núñez A., 2001, este complejo está formado por rocas de metamorfismos regional de bajo grado con facies esquistos verde hasta anfibolita; ocasionalmente se encuentran mármoles, esquistos micáceos, esquistos anfibolíticos y anfibolitas. Está dividido en diferentes unidades de acuerdo con las características mineralógicas y texturales como: Grupo Pelítico formado por filitas, esquistos sericíticos y metasedimentitas; Grupo Cuarzoso formado por cuarcitas y Grupo Básico formado por esquistos verdes y anfibolitas.

- ✓ **Gabro de Anserma:** Gabro de forma tabular que aflora cerca del Municipio de Anserma, tiene contacto fallado con rocas volcánicas de la formación Barroso al este y oeste. Corresponde a una roca de color gris oscuro a verde oscuro con tamaño de grano fino a medio, está compuesta por plagioclasa cálcica, clinopiroxeno, olivino, ortopiroxeno y anfíbol. El Gabro de Anserma presenta una edad de $71 \pm 2,7$ Ma, K/Ar en roca total (González & Londoño, 1998), que corresponde al intervalo Campaniano –Maastrichtiano (INGEOMINAS, 2001)
- ✓ **Gabro de Belén:** Corresponde a un cuerpo de forma irregular que aflora entre Puente Umbría y La Isla con contacto fallado; las rocas que componen esta unidad corresponden

a rocas con tamaño de grano de fino a grueso, masivas, compuestas por plagioclasa cálcica, clinopiroxeno uralitizado de color verdoso y con habito fibroso; están relacionadas con rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso. (Villagra, 2016) 35

- ✓ **Anfibolita Saussurítica de Chinchiná:** Cuerpo aflorante entre el sur del municipio de Chinchiná y al norte del municipio de Neira; este se encuentra en los límites entre las cordilleras Central y Occidental. Corresponde a rocas de color verde a gris verdoso, masivas con tamaño de grano fino a medio y presencia de bandeamiento entre minerales claros y oscuros y hay segregaciones de feldespato y anfíbol, petrográficamente está compuesto por anfíboles, plagioclasa y sulfuros; el protolito corresponde a metagabro honrbléndico, basado en minerales esenciales (Gómez Cruz, Ossa Meza, & Toro Toro, 2004).
- ✓ **Complejo Rosario:** Esta unidad está emplazada entre los Grupos Cajamarca y Bugalagrande; corresponde a rocas ígneas de composiciones básicas a ultrabásicas y metabasitas, específicamente secuencia de anfibolitas granatíferas y saussuríticas las cuales son abundantes en el río Rosario, son de color gris oscuro con foliación y bandeamiento composicional. (Rodriguez-Arango, 2013)

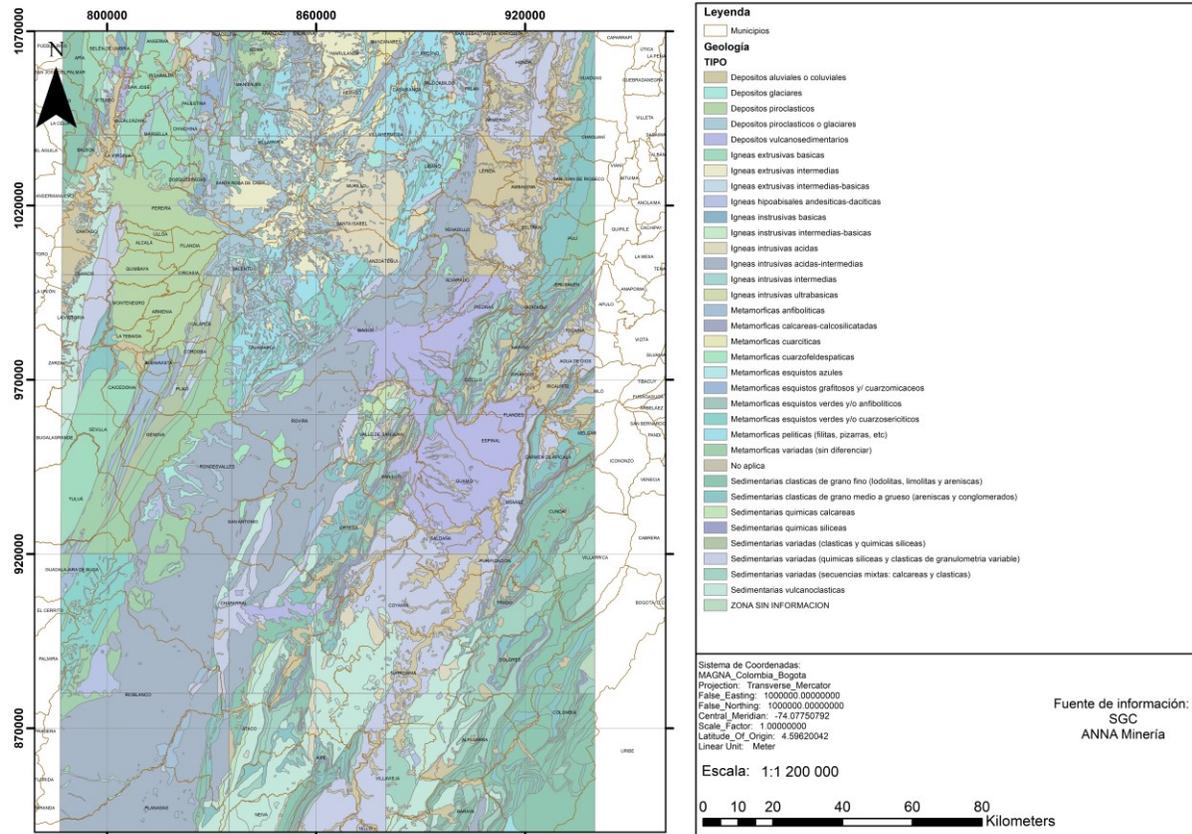


Figura 13. Mapa del tipo de rocas aledañas a la planta de interés. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2002.

II. Posteriormente se realiza la búsqueda de títulos y solicitudes vigentes que están en aquellas unidades de interés, con el fin de determinar los materiales extraídos por los dueños del título y a partir de esto identificar si alguna empresa posee materiales que no utiliza o desechos y sean ricos en aluminio y puedan ser de utilidad para esta prospección.

La información de estos títulos y solicitudes fueron extraídos de la plataforma ANNA Minería de la Agencia Nacional de Minería y posteriormente superpuestos con el mapa de unidades de interés. (Figura 14)

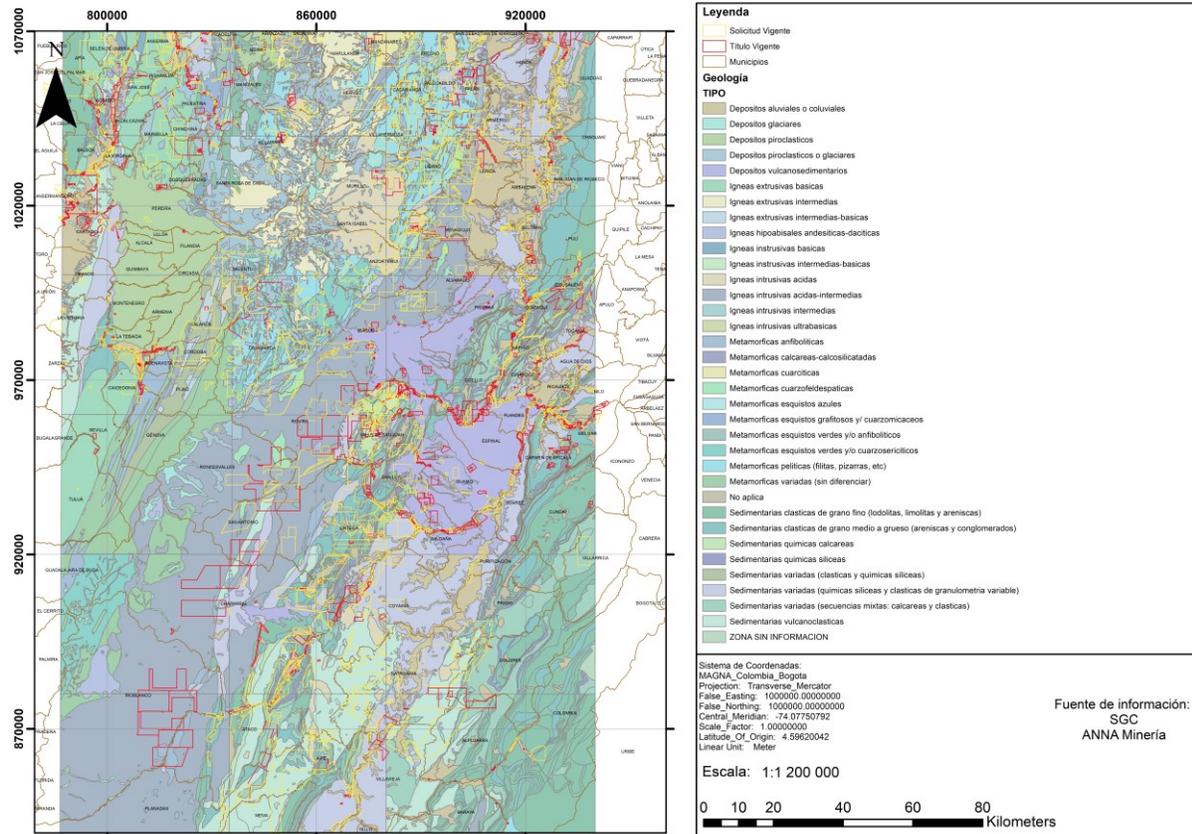


Figura 14. Mapa de Títulos y solicitudes cercanos a la planta de interés. Tomado de: ANNA Minería, Agencia Nacional de Minería, 2020.

Tabla 1. Tabla de títulos y solicitudes vigentes con respecto a las unidades de interés.

Unidad Geológica	Litología	Ubicación	Solicitudes Vigentes	Título Vigente	Estatus ambiental	Restricciones ambientales	Restricciones socioambientales	Estatus operativo		
Formación Barroso	Lavas basálticas y andesíticas intercaladas con tobos, aglomerados, tuñas y paquetes sedimentarios de chert, lodolitas, limolitas y grauwacas	QUINCHÍA	PKK-08011	DLK-14544X	NA	Paise cultural (25%)	NA	Construcción y montaje		
Formación Barroso		QUINCHÍA	RE3-09061	2270	NA		NA	Construcción y montaje		
Formación Barroso		FILADELFA, QUINCHÍA	PHT-08201	22159	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		QUINCHÍA	501772	GC4-15002X	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		QUINCHÍA	506127	18567	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		Caldas, Risaralda	502322	FCG-08356X	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		ANSERMA, QUINCHÍA	500492	EDLD-01	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		BELEN DE UMBRÍA	KHL-15421	GCA-161	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		GUÁTICA	OG2-08112	ODT-16221	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		ANSERMA	OG2-090916	QIA-09351	NA		NA	Explotación		
Formación Barroso		VITERBO, APÍA	RE3-09121	GIU-101	NA		Paisaje cultural (70%), Sistema de áreas protegidas informativas (10%)	NA	Explotación	
Formación Barroso		CHINCHINÁ, MARSELLA, SANTA ROSA DE CABAL	503817	HIT-11422X	NA		Licencia Ambiental (Central hidroeléctrica)	NA	Explotación	
Formación Barroso		RISARALDA, SAN JOSÉ	504097	QEJ-14051	NA		Paisaje cultural (100%)	NA	Explotación	
Formación Barroso		SEVILLA, TULUÁ	502867	KCA-14281	NA		Paisaje cultural (80%)	NA	Explotación	
Formación Barroso	TULUÁ	RE3-09121	ICQ-08012	NA			NA	Explotación		
Formación Barroso	PEREIRA, ANSERMANUEVO, CARTAGO	LB5-15281	FI2-121	NA		Area susceptible de la minería (95%)	NA	Explotación		
Formación Barroso	VITERBO	507422	10214	NA			NA	Explotación		
Formación Barroso	BELEN DE UMBRÍA	LIA-14161	GC8-111	NA			NA	Explotación		
Formación Barroso	CHINCHINÁ	LHR-11491	0062-17	NA		Licencia Ambiental (Central hidroeléctrica)	NA	Explotación		
Formación Barroso		506136		NA			NA			
Formación Barroso		505782		NA			NA			
Flujos andesíticos	Son lavas basálticas, dacíticas y localmente basálticas como flujos de lava masivas que generalmente están cubiertas por cenizas volcánicas	NEIRA	TDH-09221	597-17	NA		Paisaje cultural (40%) Reservas forestales de ley segunda, Areas susceptibles de la minería (100%)	NA	Explotación	
Flujos andesíticos		VILLAMARIA	SFS-08261	GEWM-12	NA		Reservas forestales de ley segunda (100%)	NA	Explotación	
Flujos andesíticos		VILLAMARIA	R12-08131	6127	NA		Reservas forestales de ley segunda (100%)	NA	Explotación	
Flujos andesíticos		VILLAMARIA	504127	15115	NA		Reservas forestales de ley segunda (100%)	NA	Explotación	
Flujos andesíticos			OG9-15571		NA			NA		
Flujos andesíticos			500944		NA			NA		
Flujos andesíticos			OG2-08288		NA			NA		
Formación Armenia	Depositos de deformación decaídos de cenizas semi-consolidadas y flujos de lodos volcánogenéticos	CASABIANCA, HERVEO	501698	14696	NA			NA	Explotación	
Formación Armenia			503858		NA			NA		
Gabro de Belén	Predominan la plagioclasa y los minerales máficos (píroxenos y hornblendas)	BELEN DE UMBRÍA	501772	17672	NA		Paisaje cultural (80%)	NA	Explotación	
Gabro de Belén		VITERBO	501410	10214	NA			NA	Explotación	
Gabro de Belén			504774		NA			NA		
Gabro de Belén			OGA-16214		NA			NA		
Gabro de Belén			501314		NA			NA		
Gabro de Belén			TBI-08451		NA			NA		
Gabro de Belén					NA			NA		
Gabro de Anserma			500492		NA			NA		
Gabro de Anserma			503817		NA			NA		
Stock Diorítico de Santa Rosa	Cristales de Fk y Pg, alteración a Caolín, sericita y clorita, diques ricos en en Fk (cuarzoesienita, sienita y granito).		ARE-504584		NA		Paisaje Cultural	NA		
Stock Diorítico de Santa Rosa			ODQ-08131		NA			NA		
Neis y Anfibolita de Tierradentro	Se identifican litologías tales como anfibolita, neis anfibolíticos, neis cuarzo-feldespaticos, neis biotíticos, sillimaníticos, mármoles y granulitas	FALAN	503719	502272	NA		Área susceptible de la minería	NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		FALAN	503723	502028	NA		Área susceptible de la minería (10%)	NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		ARMERO (Guayabal), FALAN	507352	HFL-151C1	NA		Área susceptible de la minería (95%)	NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		ARMERO (Guayabal)	503172	16727	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		SANTA ISABEL	500743	0850-73	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		SANTA ISABEL, VENADILLO	LLE-16311	0911-73	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		ALVARADO, ANZOÁTEGUI, SANTA ISABEL, VENADILLO	505908	II4-08041	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		IBAGÜE, ANZOÁTEGUI	500742	16704	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		IBAGÜE, ANZOÁTEGUI	JAV-14211	1061	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		IBAGÜE, RDVIRA, SAN LUIS	JAV-14191	JA3-11141	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		IBAGÜE	503844	HU6-09531X	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro		IBAGÜE	503999	JA3-11142X	NA			NA	Explotación	
Neis y Anfibolita de Tierradentro			504614		NA			NA		
Neis y Anfibolita de Tierradentro			OGT-08021		NA			NA		
Anfibolita Sausurítica de Chinchiná		Anfibolitas compuestas por hornblenda actinolítica y plagioclasa sausurizada	NEIRA	TIA-09111	759-17	NA			NA	Explotación
Anfibolita Sausurítica de Chinchiná			MANIZALES	500912	461-17	NA			NA	Explotación
Anfibolita Sausurítica de Chinchiná			CHINCHINÁ, VILLAMARIA	506282	564-17	NA		Paisaje cultural (90%)	Rutas colectivas	Explotación
Anfibolita Sausurítica de Chinchiná				RE3-09221		NA			NA	
Complejo Icarcá		Rocas metamórficas de medio a alto grado, entre anfibolitas, neises de cuarzo, plagioclasa, moscovita, biotita y sillimanita, migmatitas de cuarzo-feldespatito y granulitas	CHAPPARRAL	OG2-084712	HID-12141	NA		Reserva Natural (90%)	NA	Explotación
Complejo Icarcá	ATACO, RIOBLANCO			HID-12191	NA			NA	Construcción y montaje	
Complejo Icarcá	ATACO, RIOBLANCO			HID-12231	NA		Reserva Natural (40%)	Rutas colectivas	Explotación	
Complejo Icarcá	ATACO, RIOBLANCO			HID-12031	NA		Reserva Natural (30%)		Construcción y montaje	
Complejo Rosario	Secuencia de anfibolitas y esquistos macizos, localmente granatífera, asociadas parcialmente a rocas ultrabásicas tectonizadas	GÉNOVA, CAICEDONIA	504136	23028	NA		Paisaje cultural (70%)	NA	Explotación	
Complejo Rosario		GÉNOVA, PIAO, CAICEDONIA	504129	20101	NA			NA	Explotación	
Complejo Rosario		PIAO, CAICEDONIA		20995	NA		Paisaje cultural (80%)	NA	Explotación	
Complejo Rosario		CORDOBA-QUINDIO		20914	NA			NA	Explotación	
Complejo Rosario		CORDOBA-QUINDIO		22528	NA			NA	Explotación	
Complejo Rosario		CORDOBA-QUINDIO		21556	NA		Paisaje cultural (80%)	NA	Explotación	
Complejo Rosario		PIAO, CAICEDONIA		22253	NA		Paisaje cultural (90%)	NA	Explotación	
Complejo Arquíla		MANIZALES	RE3-09221	771-17	NA			NA	Explotación	
Complejo Arquíla		NEIRA	505999	759-17	NA			NA	Explotación	
Complejo Arquíla			500912		NA			NA		
Complejo Arquíla		OKU-08361		NA			NA			
Complejo Arquíla		505952		NA			NA			

III. Por otra parte, se busca identificar aquellas zonas que estén libres de títulos o solicitudes en las unidades de interés, por lo que se identifican y posteriormente se busca si presentan algunas restricciones ambientales, lo que dificultaría o anularía la explotación del material. 39

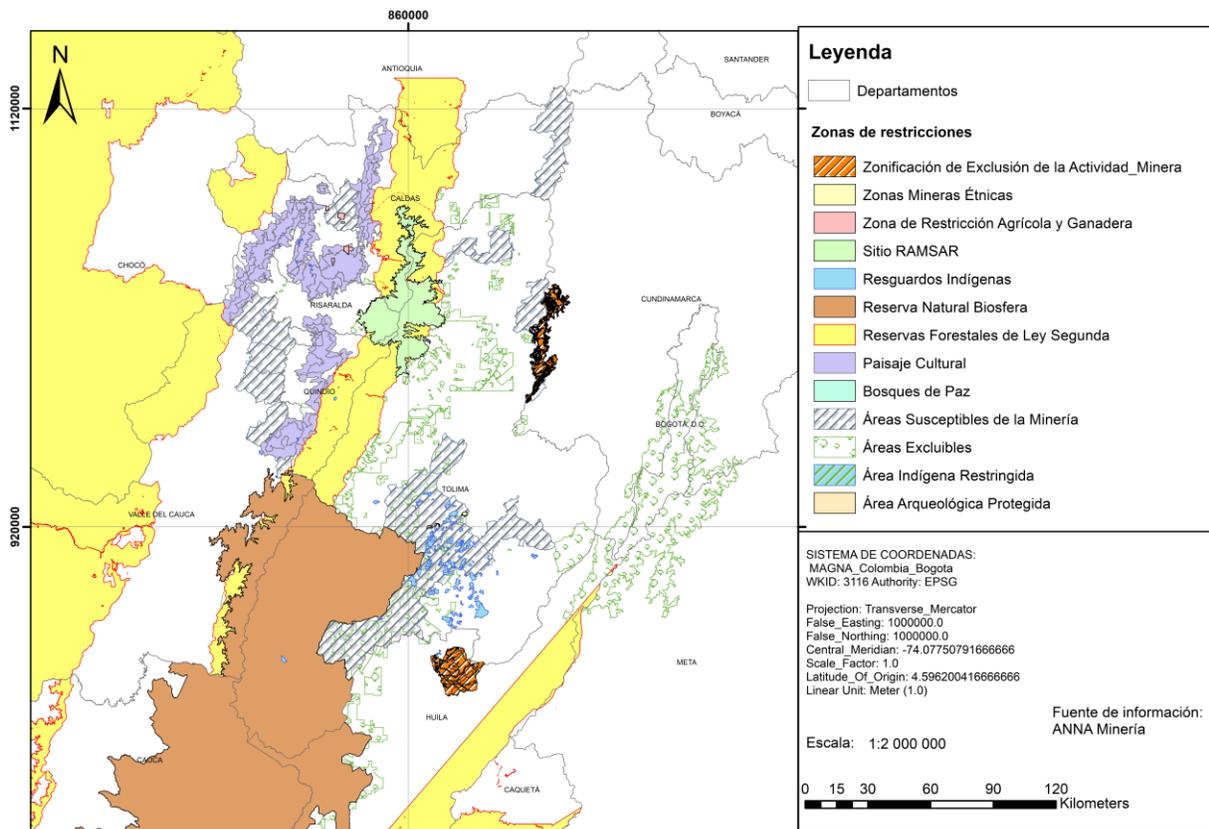


Figura 15. Mapa de restricciones ambientales aledañas a la planta de interés. Tomado de: ANNA Minería, Agencia Nacional de Minería, 2020.

IV. Con todo lo anterior se restringen las unidades de interés, tanto con zonas libres como con títulos y solicitudes, para las cuales se realiza una investigación bibliográfica de la geoquímica de elementos mayores para analizar tanto el contenido de aluminio como los otros elementos y a partir de esto determinar el valor de módulo aluminico, módulo silícico y LSF explicados a continuación. (Tabla 2)

El módulo silíceo y aluminico se refiere a la relación entre la sílice (SiO_2) y el aluminio (Al_2O_3) presentes en las materias primas utilizadas en la producción de cemento, las cuales fueron descritas al inicio del informe; el módulo silíceo en principio se usa para controlar la cantidad de fase sólida disponible para llevar a cabo la reacción mientras el aluminio determina que tan viscosa será la fase líquida en el horno en el proceso de Clinkerización. 40

La sílice y el aluminio son componentes clave en la formación de silicatos y aluminatos, que son los principales componentes del cemento. La reacción entre la sílice, el aluminio y otros materiales en el proceso de cocción del cemento a altas temperaturas produce el Clinker. El módulo silíceo (M.S.) y módulo aluminico (M.A.) en la producción de cemento se controla para obtener una composición adecuada de los silicatos y aluminatos, lo que garantiza la calidad y resistencia del cemento resultante, es decir, con el fin de tener las propiedades deseadas en el cemento utilizado en la construcción.

Las fórmulas son las siguientes:

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Con respecto al LSF (Lime Saturation Factor) es otro parámetro importante en la producción de cemento. Este es la relación que existe entre la cal (CaO) y los otros óxidos, evalúa la proporción de cal en las materias primas.

La fórmula para calcular el LSF es la siguiente:

$$LSF = \frac{\text{CaO} - 0.7 \times \text{SO}_3}{2.8 \times \text{SiO}_2 + 1.18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

El LSF permite determinar la adecuación de las materias primas para la producción de Clinker, valores bajos de LSF indican que hay un exceso de sílice, aluminio o hierro y deficiencia de cal en las materias primas, mientras que valores altos indican un exceso de cal y deficiencia de sílice, aluminio o hierro.

El objetivo es obtener un LSF adecuado para asegurar que las reacciones químicas durante el proceso de cocción del Clinker sean eficientes y se formen los compuestos necesarios para obtener un producto de calidad y garantizar la resistencia y propiedades adecuadas del cemento final.

Tabla 2. Tabla resumen para geoquímica bibliográfica de las unidades de interés.

UNIDAD	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	Módulo Silíceo	Módulo Aluminico	LSF	Litología	Fuente
Fm. Barroso	56.62	17.22	9.02	1.51	5.84	5.22	0.4	0.21	2.16	1.91	0.82	Andesita	Formación Barroso Arco volcano-telítico y diabasas de San Jose de Urama, Rodriguez-Arango (2013)
Fm. Barroso	51.56	16.05	10.61	5.75	5.75	1.67	0.62	0.52	1.93	1.51	3.37	Basalto porfídico	Formación Barroso Arco o volcano-telítico y diabasas de San Jose de Urama, Rodriguez-Arango (2013)
Complejo Arquia	46.29	14.52	12.99	12.98	5.84	1.9	2.23	0.09	1.68	1.12	8.35	Andesita	Geoquímica y petrografía de las metabasitas del complejo Arquia, Ruiz et al (2012)
Complejo Arquia	45.89	16.58	10.23	10.53	8.26	1.81	1.88	0.05	1.71	1.62	6.79	Esquistos	Geoquímica y petrografía de las metabasitas del complejo Arquia, Ruiz et al (2012)
Complejo Arquia	48.25	14.275	10.9925	10.87	6.9775	2.7425	1.5625	0.27	1.91	1.33	6.82	Esquistos verdes	Características geológicas de la unidad de esquistos del complejo arquia, al occidente de Manizales en el sector de La Mamela y Lisboa, Colombia; Osorio, Hemo et al (2022)
Neis y Anfibolitas de Tierradentro	74.225	12.845	0.15	1.065	0.5475	2.9925	0.3	3.0125	5.79	102.98	0.48	Rx metamórficas	Rocas greenvilianas de Puerto Berrio, Antioquia, Carrama et al (1999)
Complejo Icaño	52.74	19.01	6.58	8.41	2.82	3.55	0.97	2.72	2.06	2.89	4.81	Neis de P-Hb-rizo	Ortonesis de la Cordillera Central, Servicio Geológico Colombiano, 2022
Complejo Icaño	55.51	17.62	7.98	7.13	3.77	2.99	0.92	1.85	2.17	2.21	3.92	Metatonalita	Ortonesis de la Cordillera Central, Servicio Geológico Colombiano, 2022
Complejo Cajamarca	45.515	12.69	7.305	8.555	9.895	3.135	1.645		2.37	1.96	5.80	Esquistos Actinolíticos	Condiciones de P-T de los esquistos actinolíticos del Complejo Cajamarca al sureste de Montebello, Antioquia
Gabro de Anserma	48.55	15.2	7.43	13.79	10.14	1.6	0.53	0.09	2.15	2.05	8.67	Gabro	Petrografía y geoquímica de las rocas intrusivas aflorantes entre los municipios de Mistrató y Belén de Umbría, Vallejo-Salazar- Toro, 2011
Gabro Belén	50.6	14.5	10.2	12.9	8.9	1.7	0.9	0.1	2.05	1.42	7.78	Gabro	Temperalidad y características geoquímicas del vulcanismo cretácico del sector norte de la Cordillera Occidental Colombiana: implicaciones tectónicas, Villarraga (2016)
Stock Diorítico de Santa Rosa (Anfibolita Sausserita de Chinchiná)	49.43	16.72	1.65	3.63	10.03	3.05	1.35	0.02	2.69	10.13	2.28	Metagabro Horblendico	Geoquímica de las rocas del Stock Chinchiná- Santa Rosa, Gonzo-Ossa-Toro (2004)
Complejo Rosario	44.08	20.03	12.63	12.66	6.69	1.27	1.584	0.31	1.35	1.59	8.13	Anfibolitas en la parte norte	Reinterpretación de Geoquímica y Radiométrica de las Metabasitas del Complejo Arquia, Rodriguez-Arango (2013)
Complejo Rosario	51.31	15.38	9.44	10.43	7.15	2.84	1.131	0.31	2.07	1.63	6.20	Anfibolitas en la parte sur	Reinterpretación de Geoquímica y Radiométrica de las Metabasitas del Complejo Arquia, Rodriguez-Arango (2013)
Formación Saldaña	48.855	16.6575	8.48	9.905	8.1925	2.215	1.24125	0.185	2.04	3.69	6.10	Andesita	Rodriguez, G. (2018). Caracterización petrográfica, química y edad Ar-Ar de cuerpos porfídicos intrusivos en la formación Saldaña. Boletín Geológico, 44, 5-23.

6.4.2 Salida de campo

Con los resultados de investigación geoquímica y su posterior cálculo de M.S, M.A y LSF se establece una visión general de los componentes de las unidades: sin embargo, se busca tener más certeza de la composición química de cada unidad, por lo que se planea una visita a campo con el fin de extraer muestras de las unidades de interés las cuales se envían al laboratorio para su análisis específico.

6.5 Informes de producción y generación de indicadores

Mensualmente se lleva a cabo un proceso esencial para el funcionamiento eficiente de las plantas de cemento a cargo del área de materias primas en la región, corresponden a 7 plantas en total, las cuales están ubicadas en Colombia, Panamá, República Dominicana, Nicaragua, Trinidad y Jamaica. Este proceso implica la elaboración de informes de producción y la generación de indicadores que desempeñan un papel fundamental en la gestión y optimización de la operación, los cuales permiten evaluar de manera exhaustiva el rendimiento de las plantas, identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para mantener los estándares de calidad y eficiencia. 42

En este contexto, la labor del área de materias primas no solo se centra en garantizar los materiales para la producción, sino que también tiene en cuenta factores cruciales como el costo de estas materias primas, los valores de producción y la calidad del producto final. La evaluación de estos aspectos permite lograr un equilibrio entre la eficiencia económica y la excelencia en la producción. Asimismo, la recolección y análisis de datos sobre los costos y la calidad de las materias primas influyen directamente en la toma de decisiones estratégicas, permitiendo ajustes o mejoras en los procesos para maximizar la rentabilidad y la satisfacción del cliente y reflejan el compromiso continuo con la excelencia en la producción de cemento y la adaptación constante a la demanda del mercado.

En resumen, la elaboración de informes de producción y la generación de indicadores por parte del área de materias primas son un pilar fundamental para garantizar la operación exitosa y sostenible de las plantas de cemento.

A continuación, las gráficas que se elaboran para estos informes mensuales, sin especificar el mes ni planta a la que corresponde debido a contrato de confidencialidad:

6.5.1 Análisis de producción:

En este caso, para cada planta se compara la producción de los dos últimos meses, tanto para el año actual como para el año anterior (% stock compliment). Con respecto al inventario de caliza triturada, en esta grafica se analiza la producción de la planta para el mes correspondiente, teniendo en cuenta el cumplimiento de los parámetros mínimos de producción diarios y el total de la capacidad; en caso de que estos no se cumplan se trata de identificar la problemática y como abordarla. (Figura 16)

PRODUCCIÓN



Figura 16. Gráfica de análisis de producción realizadas mensualmente.

6.5.2 Análisis de calidad:

CALIDAD

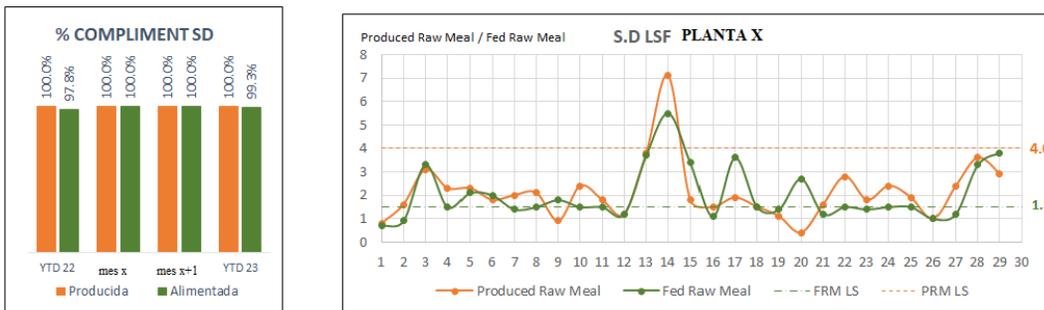


Figura 17. Gráfica de análisis de calidad realizadas mensualmente.

En este caso se comparan los valores de harina cruda producida y alimentada para los dos últimos meses y con respecto al año actual y el anterior (% Compliment SD). Para el caso de S.D

LSF se analiza para cada planta si supera el LSF, mencionado anteriormente, ya que con este se define que las reacciones químicas durante la producción del Clinker sean eficientes y así poder garantizar la resistencia adecuada del cemento y de igual forma tener buena calidad. (Figura 17). Con respecto a la harina cruda se refiere a una mezcla de materiales crudos, como caliza, arcilla y sílice, que se muelen hasta obtener una consistencia similar a la harina. Esta harina cruda es un ingrediente clave en la producción de cemento. Existen dos tipos de harina cruda: la harina cruda producida y la harina cruda alimentada. La harina cruda producida corresponde a una mezcla de materiales crudos que se han diseñado y compuesto para cumplir con las proporciones y composiciones exactas necesarias para la producción de cemento de alta calidad; la calidad del cemento producido depende en gran medida de la consistencia y precisión de la harina cruda producida, al mantener las proporciones y composiciones adecuadas, se logra un cemento más uniforme y confiable. Mientras la harina cruda alimentada se refiere a la mezcla de materiales crudos que se introduce en el proceso de producción, que puede variar ligeramente de las proporciones ideales debido a cambios en la calidad de los materiales o ajustes en el proceso, esta puede afectar la calidad al introducir variaciones en las propiedades del cemento. Por lo tanto, el control riguroso de la harina cruda producida y la monitorización cuidadosa de la harina cruda alimentada son cruciales para garantizar la calidad del cemento final.

6.5.3 Costos de producción:

Estos se analizan para seguir los cambios en la rentabilidad para la producción de cemento en cada planta, teniendo en cuenta los materiales específicos que se realizan en cada una, de igual forma se comparan los dos últimos meses con respecto al año actual y al año anterior. (Figura 18).

COSTOS DE PRODUCCIÓN


Figura 18. Gráfica de análisis de costos realizadas mensualmente.

6.6 Muestreo de Materiales Mina El Suspiro

En la Mina El Suspiro, la Formación Capacho, unidad utilizada para la extracción de caliza, encargada de abastecer la Planta Los Patios para la producción de cemento, presenta intercalaciones con otros materiales y al estar en una zona tan afectada estructuralmente como se explica a continuación no registra una calidad alta o adecuada para la elaboración del cemento, esto debido a contaminación de sílice, materia orgánica y agua percolada en las zonas de fracturas.

Con el fin de corregir la calidad de esta caliza, y cumplir con los estándares establecidos se busca obtener una adición con módulo aluminico alto para corregir la calidad a la hora de la mezcla, por lo que se muestrea un material anteriormente catalogado como estéril y sin aprovechamiento.

6.6.1 Localización

La Mina El Suspiro se encuentra ubicada en el contrato de concesión FABI-02 del cual es titular CEMEX Colombia S.A, se localiza en el Municipio de Los Patios, Norte de Santander, en la vereda Agua Linda. La mina está categorizada según la Agencia Nacional de Minería como mediana minería con un total de 1000 hectáreas.



Figura 19. Mapa de Localización Título FABI-02 Mina El Suspiro, 2023.

6.6.2 Geología

A continuación, se describe la estratigrafía de las unidades en orden cronológico y secuencial donde se ubica el título; estas son de cretácico,

6.6.2.1 Cretácico

- Formación Aguardiente: Según INGEOMINAS está conformada por Areniscas calcáreas de grano fino a grueso, de color oscuro y cementadas; están intercaladas con shales carbonosos micáceos; esta unidad aflora en ambos lados del Sinclinal de Ricarte, las capas

son tabulares, de areniscas con granos subangulares a subredondeados con presencia de glauconita y óxidos de hierro. Se encuentra en contacto superior discordantemente y transicional con la Formación Capacho; en cuanto a la edad de formación, algunos autores como Notestein et al. (1944), asignan edad de Albiano y Sutton (1946), le asigna edad de Cenomaniano. 47

- Formación Capacho: Corresponde a la unidad de interés de extracción en la Mina El Suspiro ya que se explotan calizas de la parte superior de esta unidad, en el extremo norte del título minero.

Esta unidad está compuesta por una secuencia de calizas, limolitas, arcillolitas y areniscas que se encuentran altamente plegadas debido a que hay un fuerte control estructural en el área; las areniscas son cuarzosas, de grano fino a muy fino con cemento calcáreo; las limolitas se encuentran interestratificadas con las calizas, son de color negro y gris con laminación y fuerte fracturamiento; la arcillolita está presente en estratos en toda la zona del título, son de color gris claro, con laminación y fracturamiento; las calizas presentes en la formación corresponden a la litología de interés para ser extraída, ya que se utiliza como materia prima para elaboración de cemento en la Planta Los Patios de CEMEX Colombia S.A, estas calizas en la formación están divididas en tres tipos: caliza con bioclastos tipo bivalvos que tienen color gris medio con una matriz bio-soportado, calizas lumaquéticas que tienen matriz de color gris y matriz bio-soportado, las lumaquelas van de pocos milímetros hasta 6 cm; y calizas masivas que son de color gris oscuro.

Según INGEOMINAS, el contacto regional entre la Formación Capacho en el techo y la Formación La Luna es neto, la edad sugerida para esta formación, según Sutton (1946), en (Servicio Geológico Colombiano, 2016) es Cenomaniano.

- ✓ Formación La Luna: Sucesión de calizas grises fosilíferas intercaladas con lodolitas grises, con grandes concreciones calcáreas de hasta 1 m de diámetro; en la parte superior hay presencia de capas de chert de color negro a gris oscuro y capas fosfáticas. INGEOMINAS, 2011.

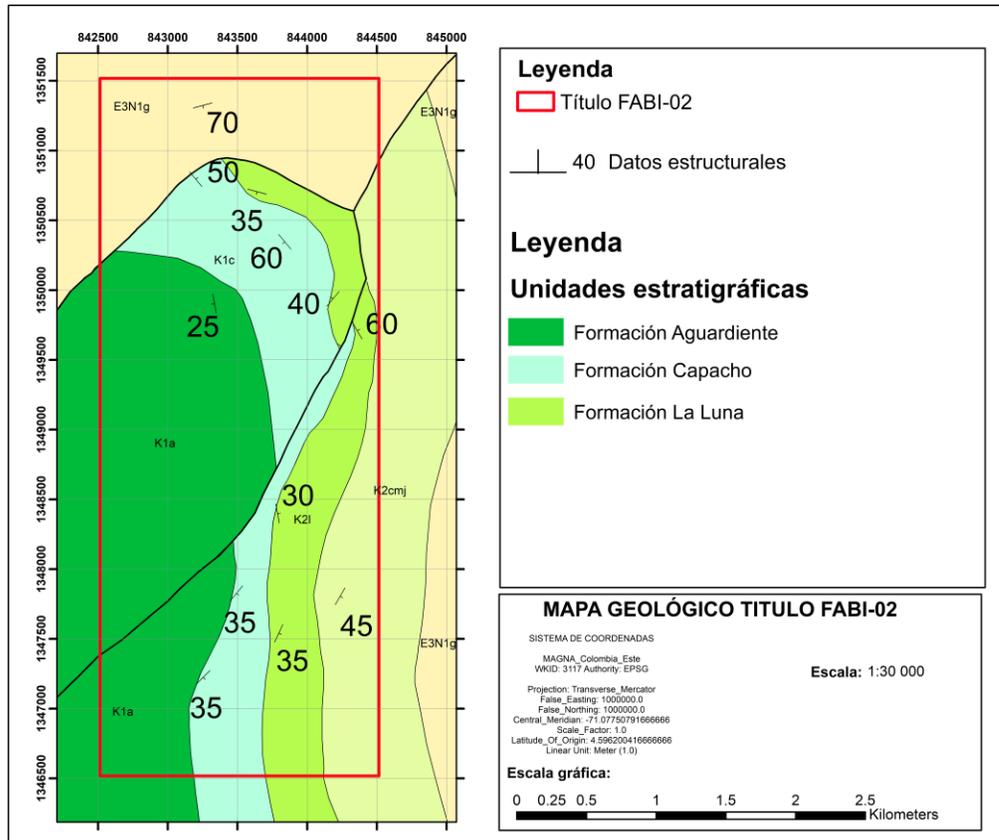


Figura 20. Mapa geológico título FABI-02. Tomado de: CEMEX S.A, 2023.

6.6.3 Geología estructural

Por su localización, la mina El Suspiro se encuentra dentro de un área tectónicamente activa, con actividad sísmica generada por los sistemas de fallas cercanas, como Santa Marta – Bucaramanga, Pamplona – Mercedes, Boconó, y por la subducción de la placa Caribe bajo el bloque de los Andes del Norte (Taboada et al., 2000 en Integral S.A., 2017).

6.6.4 Metodología

Dado que de la Formación Capacho solo se utiliza la caliza, los demás componentes de esta Formación, limolitas, arcillolitas y areniscas son separados como material estéril y no son utilizados actualmente para otro proceso; sin embargo, las arcillolitas en general se caracterizan por tener buen contenido de aluminio, por este motivo parte la idea de muestrear las arcillolitas correspondientes a la Formación Capacho para realizar análisis químico de elementos mayores y así establecer si son aptas en cuanto a módulo aluminico para la corrección de las calizas en la producción del cemento. 49

- ✓ Se ubican las Arcillolitas actualmente aflorantes en la Mina El Suspiro de un sector en específico, en el cual actualmente no hay explotación.
- ✓ Se proceden a muestrear las Arcillolitas por método de canal, el cual consiste en extraer las muestras de forma perpendicular a la estratificación para obtener roca de todos los estratos.
- ✓ Estas rocas son almacenadas en bolsas ziploc de tamaño mediano con su respectivo rótulo para luego ser enviadas al laboratorio

6.6.5 Resultados

A continuación, en la Tabla 3 se muestran los resultados de laboratorio obtenidos.

Los datos mostrados en esta tabla son datos multiplicados por un factor sin afectar la proporcionalidad entre los resultados de un elemento y otro, por lo que el total de la suma entre elementos corresponde a más de 100.

Tabla 3. Resultados geoquímicos para las arcillolitas muestreadas

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P*F	LSF	MS	MA	CaCO ₃
AZ1	74.484	30.396	3.96	1.464	0.072	0	0.192	2.34	1.224	0.72	2.17	7.68	2.3
AZ2	78.876	28.176	3.444	1.068	0.216	0	0.192	2.448	1.068	0.504	2.49	8.18	1.97
AZ3	77.892	27.744	3.828	0.36	0.204	0.024	0.204	2.592	0.504	0.168	2.47	7.25	0.89
AZ4	72.144	33.084	4.008	0.468	0.228	0	0.192	2.604	0.612	0.228	1.95	8.25	1.09

Estos resultados muestran que las arcillolitas pueden ser utilizadas como adición con el fin de corregir la calidad en el cemento, evidenciados en el contenido de módulo aluminico que en estas muestras están entre 7.5 y 8.5, estos valores son altos en comparación a otras arcillas de la zona que pueden oscilar entre 2 y 3; por lo que, por parte de la empresa, en el área de geología se planea continuar con el muestreo y demás análisis para aprovechar este material estéril.

7. CONCLUSIONES

51

- Llevar a cabo una planeación a detalle para la exploración ha permitido una mayor eficiencia en la asignación de recursos y enfoque en áreas prioritarias, lo que debería conducir a una exploración más efectiva en el futuro.
- Los análisis realizados han proporcionado una visión más clara de los desafíos y oportunidades en curso, lo que ha llevado a la identificación de medidas correctivas y estrategias de mejora.
- La investigación y recopilación de requisitos y regulaciones ha permitido a la organización cumplir de manera más efectiva con los requisitos establecidos por las autoridades, evitando posibles sanciones o retrasos en los proyectos.
- El apoyo en la elaboración de informes y reportes ha demostrado ser esencial para mantener una operación minera y ambientalmente responsable, al tiempo que se cumple con las regulaciones vigentes.
- El uso de herramientas y software especializado para el manejo y análisis de información geológica ha demostrado ser fundamental para optimizar los procesos y garantizar la calidad de los datos recopilados.
- El muestreo constante y seguimiento a los datos geoquímicos de los materiales permite tener un seguimiento minucioso de la calidad específica de cada material y general para garantizar una buena producción de cemento.
- Se observa una necesidad constante en el abastecimiento de aluminio para las plantas productoras de cemento, dada su contribución a la eficiencia en la producción hasta su función crucial en la calidad y consistencia del producto final.

8. RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar un sistema de gestión de datos geológicos que facilite la recopilación, almacenamiento y acceso eficiente a la información geológica con el fin de garantizar la disponibilidad de datos actualizados para la toma de decisiones en exploración.
- ✓ Establecer un equipo de análisis de proyectos con la responsabilidad de llevar a cabo evaluaciones periódicas y detalladas de los proyectos en curso. Esto asegurará la identificación temprana de desafíos y oportunidades.
- ✓ Establecer un equipo dedicado a la gestión de cumplimiento regulatorio que se mantenga al tanto de los cambios en las regulaciones y que esté preparado para implementar ajustes correspondientes.
- ✓ Utilizar métodos de muestreo geológico aleatorio para garantizar que todas las áreas de interés estén cubiertas de manera equitativa, teniendo en cuenta el tamaño, mantenimiento de la calidad del muestreo evitando contaminación y normativas aplicables al tipo de muestreo.
- ✓ Considerando la búsqueda continua del aluminio en las plantas de cemento, se sugiere continuar con la dedicación a la investigación y desarrollo para garantizar un suministro constante y eficiente de este recurso clave. Explorar nuevas fuentes de obtención que sean exitosas, así como implementar prácticas de reciclaje y reutilización, asegurando así la estabilidad operativa y económica de la empresa.

9. Bibliografía

53

- Agencia Nacional de Minería. (2020). *ANNA Minería*. Obtenido de Visor geográfico: <https://annamineria.anm.gov.co/sigm/externalLogin>
- Alcaldía Municipal de San Luis, Tolima. (2001). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Ibagué, Tolima.
- CEMEX S.A. (2023). *Programa de Trabajos y Obras para el título FABI-02*. Bogotá, Colombia.
- Cemex S.A. (2023). *Programa de Trabajos y Obras para el título 15823*. Bogotá, D.C.
- Cemex S.A. (2023). *Programa de Trabajos y obras y reporte de Recursos y Reservas para el título 0745-73*. Bogotá D.C.
- Ley 685 de 2001. *Por el cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones* (15 de agosto de 2001). Bogotá, Colombia.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. (2018). *Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales*. Colombia.
- Emisiones de carbono por parte de la industria del cemento vs cemento verde. (s.f.). *Revistas PUCP*, 12-13. Obtenido de Revistas PUCP. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Gómez Cruz, A. d., Ossa Meza, C. A., & Toro Toro, L. M. (2004). Geoquímica de las rocas del stock de Chinchiná-Santa Rosa. *Boletín de Geología Vol. 26 Número 42*.
- Gonzalez, H. G. (1995). *Geología económica de los Yacimientos Minerales y Yacimientos de Colombia*. Editorial Clave.

- INGEOMINAS. (1987). *Geología y Prospección Geoquímica de la plancha 281- Rioblanco, Tolima*. Ibagué, Tolima .
- INGEOMINAS. (2001). *Geología de la plancha 205 Chinchiná*. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS. (2002). *Memoria explicativa plancha 245 Girardot*. Bogotá D.C .
- Klein, C., Dana, J. D., & Hurlbut, C. S. (1997). *Manual de mineralogía volumen 2: basado en la obra de J. Dana*. Barcelona: Reverté.
- Osorio Granada, E., Vallejo, J., & Toro, L. M. (2015). Análisis petrográfico de los Neises y Anfibolitas de Tierradentro. *Congreso Colombiano de Geología, 2015*.
- Rodríguez, G., & Arango, M. I. (Julio-Diciembre de 2013). Reinterpretación geoquímica y radiométrica de las metabasitas del Complejo Arquía. *Boletín de Geología* , págs. 66-79.
- Rodríguez-Arango. (2013). *Reinterpretación de Geoquímica y Radiométrica de las Metabasitas del Complejo Arquía*.
- Ruiz, E. C., Balnco-Quintero, I. F., Toro-Toro, L. M., Moreno-Sánchez, M., Vinasco, C. J., García-Casco, A., & Gómez-Cruz, A. (29 de Noviembre de 2012). Geoquímica y Petrología de las metabasitas del Complejo Arquía (Municipio de Santafé de Antioquia y Río Arquía, Colombia): Implicaciones geodinámicas.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Geología de la Plancha 88-Cúcuta a escala 1:100.000 Departamento de Norte de Santander- Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Geología de la plancha 88-Cúcuta a escala 1:100.000, departamento de Norte de Santander-Colombia* . Bogotá, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Atlas Geoquímico de Colombia*.

- Toro, L. M., Gómez, A. d., & Bedoya, R. D. (2005). Condiciones de P-T de los esquistos actinolíticos del Complejo Cajamarca al sureste de Montebello Antioquia. *Boletín de Geología vol- 27 No. 2.* 55
- Villagra. (2016). *Temporalidad y características geoquímicas del vulcanismo cretácico del sector norte de la Cordillera Occidental Colombiana: implicaciones tectónicas.*
- Zapata, J. P., Rodríguez García, G., Ramírez, D., & Correa Martínez, A. M. (2022). Ortoneises de la cordillera Central. *Servicio Geológico Colombiano.*

